

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

MARCOS VINÍCIUS DO PRADO SILVA

ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA
DA FIBRA DO COCO EM CONCRETOS

Marechal Deodoro – AL

2021

MARCOS VINÍCIUS DO PRADO SILVA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA
DA FIBRA DO COCO EM CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso

Coorientadora: Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques

Marechal Deodoro – AL

2021



**Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação**
Instituto Federal de Alagoas
Campus Marechal Deodoro
Biblioteca Dorival Apratto

S586e

Silva, Marcos Vinícius do Prado.

Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da fibra do coco em concretos / Marcos Vinícius do Prado Silva. – 2021.

99 f. : il., col.

1 CD-ROM : 2,69 megabytes (PDF) ; 4 ¾ pol. ; caixa acrílica (12,5 cm x 14 cm).

Inclui bibliografia e figuras.

Apêndices: p. 85-99.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Marechal Deodoro*, Marechal Deodoro, 2021.

Orientadora: Profa. Dra. Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso.

Coorientadora: Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques.

1. Adições minerais. 2. Adição em concretos. 3. Subproduto do coco – fibras. 4. Cinzas do coco. I. Título. II. Rapôso, Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva. III. Marques, Sheyla Karolina Justino.

CDD: 620.197

Maria Jôse Nascimento Leite Machado
Bibliotecária – CRB-4/2125

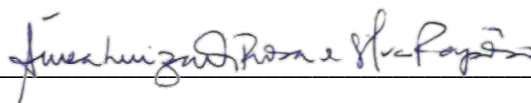
MARCOS VINÍCIUS DO PRADO SILVA

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DAS CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA
DA FIBRA DO COCO EM CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (Modalidade Mestrado Profissional) como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.


Aprovado em:

Orientadora:



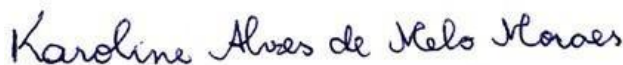
Prof. Dra. Áurea Luiza Q. Rosa e Silva Rapôso, IFAL / *campus* Maceió

Coorientadora:

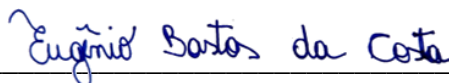


Prof. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques, IFAL / *campus* Palmeira dos Índios

Banca examinadora:



Prof. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes, UFAL



Prof. Dr. Eugênio Bastos da Costa, IFAL / *campus* Coruripe

Marechal Deodoro – AL

2021

*Dedico este trabalho a minha esposa
Patrícia e aos meus filhos Filipe e Lucas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, fonte da vida, autor e consumidor da minha fé.

Aos meus pais, por todo amor, educação e sacrifícios feitos por nossa família.

A minha amada esposa e dona do meu coração, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus filhos, que me dão força e me fazem querer ser uma pessoa melhor a cada dia.

Aos meus irmãos, porque mamãe disse que nos criou unidos e é falta de educação deixar a família de fora dos agradecimentos.

A todo corpo docente do PPGTEC-Ifal, em especial as Professoras Áurea Luiza Rapôso e Sheyla Karolina Marques, exemplos de profissionalismo e dedicação, que foram fundamentais para conclusão de cada etapa desse mestrado.

Aos membros da banca examinadora, Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes, UFAL, e Prof. Dr. Eugênio Bastos da Costa, IFAL / *campus* Coruripe, por todas as contribuições no desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos os discentes da turma “corda de caranguejo”, por ajudarem a tornar essa jornada mais leve, em especial a Kadja, Natiele e minha dupla vitalícia, Laila.

Ao Diretor Geral do Ifal Campus Coruripe, professor José Roberto e aos professores Esdras, Fabrício e Alex, pelo apoio e ensinamentos no laboratório.

Aos técnicos de laboratório do Ifal Campus Maceió, Rinaldo e Diego, pela disponibilidade e ensinamentos, mesmo no contexto atual de pandemia.

Ao senhor Hugo, técnico de laboratório do CTEC – UFAL, pela disponibilidade em abrir as portas do laboratório e me ajudar com os ensaios necessários.

Ao senhor André e à empresa Maruska Fibras, pelo fornecimento dos subprodutos do coco, utilizados nesta pesquisa.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão de mais essa etapa da minha vida.

SILVA, Marcos Vinícius do Prado. **Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da fibra do coco em concretos**. 100 f. 2021. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - *Campus Marechal Deodoro*, Instituto Federal de Alagoas Marechal Deodoro, 2021.

RESUMO

O Brasil destaca-se na produção mundial de coco, gerando cerca de 3,0 milhões de toneladas deste fruto por ano. Aproximadamente 80% do peso bruto do coco é considerado resíduo; que, por sua difícil degradação, grande volume e descarte inadequado, gera problemas ao meio ambiente. A casca do coco constitui-se em subproduto agrícola com alto potencial de aproveitamento; mas, com poucas ações de reaproveitamento implantadas no Brasil. A região Nordeste é a maior produtora de coco do país, sendo responsável por mais de 60% da produção nacional. Em Alagoas, os produtos agrícolas de maior ênfase, na região litorânea do estado, são a cana-de-açúcar e o coco, com destaque para o município de Coruripe, que têm produção superior a 20 milhões de cocos ao ano. O presente trabalho teve por objetivo analisar as características de cinzas geradas pela queima por combustão e degradação térmica em forno Mufla da fibra da casca do coco, visando à aplicação como adição mineral em concretos. A primeira fase da pesquisa foi dedicada à caracterização das cinzas, através dos ensaios de análise granulométrica, fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados obtidos no ensaio de granulometria demonstraram que as cinzas foram classificadas como material fino, passando 100% pela peneira 0,3 mm. No ensaio de FRX, percebeu-se que as cinzas produzidas por degradação térmica em Mufla a 400°C, nos tempos de 1h, 2h e 4h apresentaram os mesmos elementos químicos isolados, variando o percentual em função da mudança de temperatura, sendo os principais componentes químicos Potássio (K), Cloro (Cl), Cálcio (Ca), Silício (Si), Sódio (Na) e Ferro (Fe). A análise por DRX demonstrou, nas cinzas produzidas no forno Mufla com controle de temperatura (CFC-LAB), a presença dos compostos químicos: Nitrato de Potássio (KNO₃), Cloreto de Potássio (KClO₃), Quartzo (SiO₂), Grafite (C) e Fosfato de Alumínio (AlPO₄), variando os percentuais do composto associado à mudança de permanência no forno Mufla. Quanto à composição química por DRX da cinza produzida por combustão sem controle de temperatura (CFC-LIV), os principais compostos identificados foram: Cloreto de Potássio (KCl), Quartzo (SiO₂) e Silicato de Cálcio (Ca₂(SiO₄)). Os ensaios tecnológicos no concreto das cinzas geradas por combustão e degradação em diferentes percentuais (0%, 3%, 5% e 7%), em substituição parcial à massa do cimento, demonstram que o abatimento do tronco de cone diminui quanto mais cinza for incorporada no traço, passando de 60 mm para 0 mm na maior substituição. A absorção de água por imersão foi maior, quanto maior o percentual de cinzas incorporadas, variando de 5,85% a 7,56% de absorção para as substituições de CFC-LIV; e, 8,31% a 9,92% de absorção para as CFC-LAB. As CFC-LIV apresentaram melhores resultados de resistência, com aumento de 12,19% em relação à resistência do traço de referência, quando houve substituição de 3% de cimento por cinzas; e, perda de resistência de 6,67% para substituição de 5%. Pelos resultados, pode-se concluir que existe viabilidade de usar as CFC-LIV como substituição parcial do cimento em até 5%. A CFC-LAB não apresentou resultados satisfatórios no concreto, com perda de resistência à compressão de até 59%, contudo a descoberta de Grafite (C) na CFC-LAB abre possibilidades de nova aplicação para a fibra do coco em estudos futuros.

Palavras-chave: Adições minerais; Adição em concretos; Subproduto do coco; Cinzas do coco.

SILVA, Marcos Vinícius do Prado. **Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da fibra do coco em concretos**. 100 f. 2021. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - *Campus Marechal Deodoro*, Instituto Federal de Alagoas Marechal Deodoro, 2021.

ABSTRACT

Brazil stands out in world coconut production, generating around 3.0 million tons of this fruit per year. Approximately 80% of the coconut's gross weight is considered residue; which, due to its difficult degradation, large volume and inadequate disposal, generates problems for the environment. Coconut shell is an agricultural by-product with high potential for use; but, with few reuse actions implemented in Brazil. The Northeast region is the largest producer of coconut in the country, accounting for more than 60% of the national production. In Alagoas, the most important agricultural products in the coastal region of the state are sugarcane and coconut, especially in the municipality of Coruripe, which produces more than 20 million coconuts a year. The objective of this work was to analyze the characteristics of ash generated by combustion burning and thermal degradation in a Muffle furnace of coconut husk fiber, aiming at its application as a mineral addition in concrete. The first phase of the research was dedicated to the characterization of ash, through tests of particle size analysis, X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (DRX), thermogravimetric analysis (TG) and scanning electron microscopy (SEM). The results obtained in the Granulometry test showed that the ashes were classified as fine material, passing 100% through the 0.3 mm sieve. In the FRX test, it was noticed that the ash produced by thermal degradation in Muffle at 400°C, in the times of 1h, 2h and 4h presented the same isolated chemical elements, varying the percentage depending on the temperature change, being the main chemical components Potassium (K), Chlorine (Cl), Calcium (Ca), Silicon (Si), Sodium (Na) and Iron (Fe). The XRD analysis showed, in the ashes produced in the Mufla furnace with temperature control (CFC-LAB), the presence of chemical compounds: Potassium Nitrate (KNO₃), Potassium Chloride (KClO₃), Quartz (SiO₂), Graphite (C) and Aluminum Phosphate (AlPO₄), varying the percentages of the compound associated with the change in permanence in the Muffle furnace. As for the chemical composition by XRD of ash produced by combustion without temperature control (CFC-LIV), the main compounds identified were: Potassium Chloride (KCl), Quartz (SiO₂) and Calcium Silicate (Ca₂(SiO₄)). Technological tests on concrete from ash generated by combustion and degradation in different percentages (0%, 3%, 5% and 7%), in partial replacement of the cement mass, demonstrate that the slump of the cone trunk decreases the more ash is incorporated in the dash, going from 60 mm to 0 mm in the largest replacement. The absorption of water by immersion was greater, the greater the percentage of incorporated ash, ranging from 5.85% to 7.56% of absorption for CFC-LIV replacements; and, 8.31% to 9.92% absorption for CFC-LAB. The CFC-LIV showed better strength results, with an increase of 12.19% in relation to the strength of the reference mix, when 3% of cement was replaced by ash; and, 6.67% endurance loss to 5% replacement. From the results, it can be concluded that there is feasibility of using CFC-LIV as a partial replacement for cement in up to 5%. CFC-LAB did not show satisfactory results in concrete, with loss of compressive strength of up to 59%, however the discovery of Graphite (C) in CFC-LAB opens up possibilities of new application for coconut fiber in future studies.

Keywords: Mineral additions; Addition in concrete; Coconut by-product; Coconut ash.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Corte longitudinal do coco verde (Cocos Nucifera) com a descrição de suas partes	15
Figura 2 - Descarte da casca do coco	19
Figura 3 - Quantidade produzida de Coco-da-Baía em Alagoas em 2017	23
Figura 4 - Sistema produtivo do coco comumente utilizado em Coruripe-AL	26
Figura 5 - Curvas TG e DTG obtidas para fibras de coco	29
Figura 6 - Curvas TG e DTG obtidas para fibras de coco	29
Figura 7 - Exemplos de adições minerais utilizadas na Construção Civil.....	30
Figura 8 - Efeito das adições sobre os concretos	32
Figura 9 - Fluxograma da primeira parte do procedimento experimental	36
Figura 10 - Queima das cascas do coco no terreno por combustão.....	38
Figura 11 - Destorroamento das cinzas produzidas sem controle no terreno.....	38
Figura 12 - Fibra triturada e armazenada em recipiente metálico com tampa	39
Figura 13 - Produção da cinza no forno Mufla.....	40
Figura 14 - Fluxograma da segunda etapa do procedimento experimental.....	45
Figura 15 - Ensaio de massa específica da areia	48
Figura 16 - Ensaio de massa específica da brita.....	49
Figura 17 – Ensaio de massa específica das cinzas	50
Figura 18 – CPs moldados e submersos no tanque de cura.....	53
Figura 19 - Cinzas produzidas com e sem controle de temperatura.....	54
Figura 20 - Gráfico de DRX das CFC-LAB. (a) – Cinza 400°C por 1h; (b) – Cinza 400°C por 2h; (c) – Cinza 400°C por 4h.....	59
Figura 21 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 1h	61
Figura 22 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 2h	62
Figura 23 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 4h	63
Figura 24 - DRX da CFC-LIV.....	63
Figura 25 – Micrografias com aumento de 500x.....	65
Figura 26 – Abatimento do tronco de cone do traço de referência e traço com adição de cinzas	66
Figura 27 – Pesagem comparativa do cimento e da cinza produzida no forno Mufla	67
Figura 28 - Resumo dos resultados de absorção de água e curvas de tendência.....	69
Figura 29 - CPs após ensaio de resistência à compressão	72

Figura 30 - CPs moldados com CFC-LAB.....	72
Figura 31 - CPs após ensaio de resistência à compressão	73
Figura 32 - Resumo das resistências à compressão e linha de tendência	75
Figura 33 - Curva de Abrams	86
Quadro 1 - Principais Características do sistema produtivo do coco em períodos distinto ...	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das principais propriedades da fibra de coco	28
Tabela 2 - Resumo dos parâmetros adotados e calculados	47
Tabela 3 - Consumo de materiais e traço de referência em massa	48
Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova e tratamentos propostos	51
Tabela 5 - Distribuição granulométrica das CFC-LIV	55
Tabela 6 - Distribuição granulométrica da CFC-LAB	57
Tabela 7 - Composição química da CFC-LIV	58
Tabela 8 - Elementos químicos presentes na CFC-LAB	59
Tabela 9 - Compostos químicos e concentração identificados na CFC-LAB	60
Tabela 10 - Compostos químicos identificados por DRX na CFC-LIV	65
Tabela 11 - Abatimento do tronco de cone - <i>Slump Test</i>	69
Tabela 12 - Absorção de água por imersão dos tratamentos propostos	70
Tabela 13 - Resistência à compressão dos CPs produzidos com os traços propostos	72
Tabela 14 - Mediana, variância e desvio padrão dos resultados de resistência à compressão dos CPs	76
Tabela 15 - Consumo aproximado de água (l/m^3)	86
Tabela 16 - Granulometria da areia	87
Tabela 17 - Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m^3 de concreto	88
Tabela 18 - Consumo em massa dos materiais para traço proposto e consumo total	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/cimento
CP	Corpo de prova
CFC-LAB	Cinza da fibra do coco produzida no forno Mufla - laboratório
CFC-LIV	Cinza da fibra do coco produzida por combustão ao ar livre
Dmax	Diâmetro máximo
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimétrica derivada
Fck	Resistência característica do concreto
FRX	Fluorescência de Raios X
g	Gramas(s)
h	Hora
kg	Quilograma
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais
m	Metro
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
mm	milímetros
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Técnica Brasileira
Ret.	Retida
RS	Resistente a sulfatos
TG	Termogravimétrica
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande no Norte

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contextualização do Tema e Problema de Pesquisa	15
1.2 Justificativa	18
1.3. Objetivos	20
1.3.1 Objetivo geral	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 Estrutura da dissertação	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1. Produção e principais usos industriais do coco	22
2.2. Sistema produtivo do cultivo do coqueiro	24
2.3. Fibras da casca do coco	27
2.4. Adições Minerais	30
2.5. Estudos de reaproveitamento da fibra do coco em Argamassas e Concretos	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1. Caracterização e ensaios físico-químicos das cinzas produzidas	36
3.1.1. Produção das cinzas: queima no terreno por combustão	37
3.1.2. Produção das cinzas: temperatura controlada em forno Mufla	39
3.1.2.1. Determinação da temperatura de operação no forno Mufla	40
3.1.2.2. Determinação do tempo de operação do forno Mufla	41
3.1.3. Análises físico-químicas das cinzas produzidas	41
3.1.3.1. Análise Granulométrica das cinzas	41
3.1.3.2. Massa específica das cinzas	42
3.1.3.3. Análise Termogravimétrica	42
3.1.3.4. Fluorescência de Raios X	43
3.1.3.5. Difração de Raios X	44
3.1.3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura	44
3.2. Confeção dos concretos e moldagem dos Corpos de Prova (CPs)	45
3.2.1. Definição dos materiais e cálculo do traço de referência	46
3.2.1.1. Traço de referência em massa e consumo dos materiais	46
3.3. Ensaio tecnológicos no concreto	51
3.3.1. Confeção dos concretos, tratamentos e quantidades de CPs	51
3.3.1. Consistência do concreto no estado fresco por abatimento de tronco de cone (<i>Slump Test</i>)	52
3.3.2. Absorção de água por imersão	52
3.3.3. Resistência à compressão	53

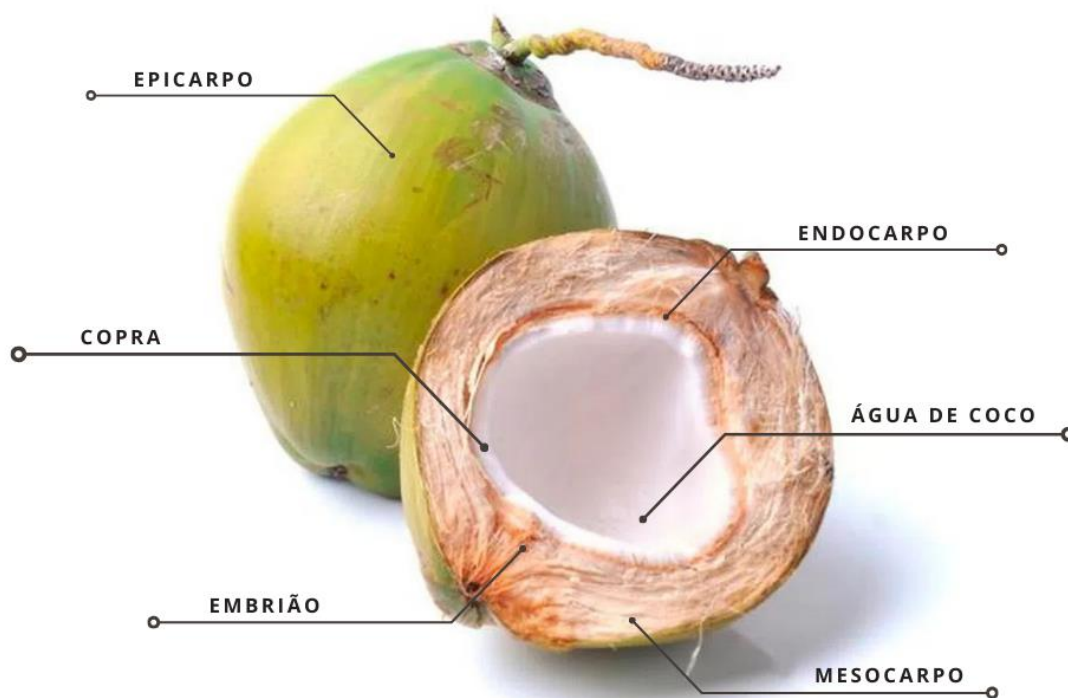
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1. Caracterização físico-química das cinzas produzidas	55
4.1.1. Análise Granulométrica	55
4.1.2. Massa específica das cinzas	56
4.1.3. Fluorescência de Raios X	57
4.1.4. Difração de Raios X	59
4.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV	65
4.2. Ensaio Tecnológicos do Concreto	66
4.2.1. Ensaio de Consistência - <i>Slump Test</i>	66
4.2.2. Absorção de água por imersão	68
4.2.3. Resistência à compressão	70
5. CONCLUSÃO.....	76
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	78
7. REFERÊNCIAS	79
8. APÊNDICES	85
8.1. Apêndice A: Cálculo do traço de referência	85
8.2. Apêndice B: Artigo para submissão à Revista Principia	90

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Tema e Problema de Pesquisa

A casca do coco constitui-se em resíduo agrícola com alto potencial de aproveitamento, mas com poucas ações de reaproveitamento implantadas no Brasil. Segundo Carrijo *et al.* (2002), de 80% a 85% do peso bruto do coco verde é considerado resíduo, sendo descartado. Embora orgânico, o resíduo do coco mostra-se de difícil degradação e demora de 8 a 12 anos para se decompor completamente. A Figura 1 apresenta as partes que constituem o coco verde, cuja casca é composta pelo epicarpo e mesocarpo.

Figura 1 - Corte longitudinal do coco verde (*Cocos Nucifera*) com a descrição de suas partes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Souza *et al.* (2015), o Nordeste apresenta a maior quantidade de resíduos do coco, sendo que aproximadamente 65% do resíduo coletado é encaminhado para lixões ou aterros controlados que, do ponto de vista ambiental, pouco se diferenciam dos próprios lixões.

Observando esse aspecto, percebe-se que a cadeia produtiva do coco não está em ciclo técnico fechado, ou seja, o ciclo industrial de fabricação de produtos derivados do coco gera subprodutos, mais conhecidos como resíduos, que se constituem em insumos que não foram totalmente processados ou que não são reaproveitados, ocasionando impactos ambientais e desperdício de matéria-prima (RAPÔSO, 2013). Neste estudo, a casca do coco, a fibra e as cinzas, delas derivadas, são consideradas e denominadas como subprodutos.

Em paralelo a isso, a indústria da Construção Civil vem incorporando subprodutos de diversas cadeias produtivas. Apesar de ser reconhecida como uma das mais importantes atividades produtivas e econômicas, a indústria da Construção Civil é responsável também por grandes impactos ao meio ambiente, tanto pelo grande consumo de matérias-primas, como pelos processos produtivos geradores de resíduos (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Sabe-se que a composição do concreto, material da Construção Civil mais consumido do mundo, consiste basicamente na mistura de cimento, areia, brita e água. Ao longo do tempo, as técnicas de dosagem, produção e utilização do concreto passaram por inúmeras inovações. Dessa forma, a evolução da tecnologia de produção de concretos foi incrementada com o desenvolvimento e emprego de adições e/ou aditivos. Pela importância na produção de concretos, autores já consideram as adições e/ou aditivos como o quinto elemento da mistura (SCHWAAB, 2015).

A utilização de produtos adicionados ao concreto para melhorar suas propriedades remonta a civilizações antigas; entretanto, foi no século passado (século XX) que as tecnologias para desenvolvimento de adições e aditivos ganharam ênfase, sendo desenvolvidos produtos que permitem a melhoria das características físico-químicas do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os diversos tipos de obras em concreto consomem entre 15% e 50% de todos os recursos naturais extraídos do planeta. Só no Brasil, em 2013, houve consumo de mais de 400 milhões de toneladas de agregados (britas e areia natural). Assim, o desenvolvimento de pesquisas, que visem substituições e/ou modificação na produção do concreto e que busquem reduzir as emissões de poluentes, mostram-se de interesse socioambiental e propiciam significativa melhoria na qualidade de vida da população (BONATO, 2014).

A demanda por cimento está crescendo ao longo dos anos. Nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, a produção de cimento aumenta, conforme a modernização torna-se maior e, este crescimento revela-se contínuo. O consumo total de cimento no Brasil, em 2019, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento foi

de 54,8 milhões de toneladas. Bonato (2014) apresentou em sua pesquisa prospecção de cenários de menor e de maior crescimento mundial, em que a demanda de cimento para 2050 será entre 3,69 e 4,40 bilhões de toneladas, respectivamente.

A indústria de produção do cimento, por sua vez, é uma das indústrias que mais contribuem para a geração de poluentes na atmosfera. Esta é responsável pela emissão de cerca de 5% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO₂) do planeta, gerada pelo homem. Isso se deve ao fato de que o cimento é a principal matéria-prima do produto mais consumido no planeta em termos de volume, o concreto, ficando atrás apenas da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A aplicação de adições minerais e orgânicas na produção de concreto, em substituição ao cimento, promove a minimização do impacto ambiental referente à sua fabricação, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera e de gases intensificadores do efeito estufa, tais como: monóxido de Carbono (CO), metano (CH₄), dióxido de azoto (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂); além de minimizar o consumo de energia e preservar as jazidas de calcário e argila utilizadas na fabricação do cimento Portland. Além disso, com a utilização de adições minerais almeja-se melhoria do desempenho mecânico e de durabilidade do concreto. Outra vantagem no desenvolvimento de concretos com subprodutos, caso da cinza da casca de coco, é a redução da poluição visual oriunda do descarte desordenado, que ultrapassa o ganho econômico pelo valor não mensurável dos benefícios ao meio ambiente (BONATO, 2014).

Existe possibilidade de aproveitamento da casca do coco como matéria-prima para diversos setores de produção, inclusive como biomassa para geração de energia. Segundo Padilla *et al.* (2018), a casca do coco tem poder calorífico superior (PCS) de cerca de 18,7 MJ/kg, o que possibilita este subproduto ser queimado diretamente em fornalhas ou aproveitado para a produção de carvão vegetal ou briquetes. Em virtude desse potencial calorífico, algumas empresas já utilizam a casca do coco como fonte de energia. A partir desse processo, um dos subprodutos sólidos gerados pela produção da energia é a cinza da casca do coco.

A indústria da Construção Civil vive o enorme desafio que é possibilitar o desenvolvimento tecnológico de forma mais sustentável, principalmente, por conta dos danos socioambientais associados à produção do Cimento Portland (MATOS; GUIMARÃES, 2017). O aproveitamento de subprodutos pode contribuir para que a redução da degradação ambiental e a promoção do desenvolvimento sustentável sejam alcançados.

Por todo o exposto, essa pesquisa propõe-se a responder à seguinte pergunta: **A aplicação das cinzas derivadas da combustão e/ou degradação térmica da casca de coco**

poderá resultar em concreto com características mecânicas equivalentes a concretos estruturais?

O estudo estabeleceu como hipótese básica:

- **As cinzas derivadas da combustão e/ou degradação térmica da casca de coco, quando aplicadas em substituição parcial do cimento, resultam em concreto com características mecânicas correspondentes a concretos estruturais.**

Como hipótese secundária, a pesquisa definiu:

- **As cinzas produzidas pelo processo de degradação térmica no forno Mufla, com controle de temperatura e tempo, apresentam características químicas diferentes das cinzas produzidas no processo de combustão ao ar livre, que podem melhorar características mecânicas do concreto, quando aplicadas em substituição parcial do cimento.**

1.2 Justificativa

O Brasil destaca-se na produção mundial de coco, ficando na quinta posição e gerando cerca de 3,0 milhões de toneladas do fruto por ano, em área colhida de 257 mil hectares de coqueiros. Esse valor representa cerca de 80% da produção total da América do Sul (EMBRAPA, 2014). Apesar da diversidade de produtos oriundos do coco como a água, o leite e o óleo de coco, aproximadamente 85% em massa do fruto torna-se perda produtiva. Assim, principalmente em cidades turísticas litorâneas, esse subproduto tem sido destinado aos lixões, aterros sanitários e locais públicos de forma inapropriada (CORRADINI *et al.*, 2009).

Segundo dados do IBGE, a região Nordeste é a maior produtora de coco do país, sendo responsável por mais de 70% da produção nacional. O grande número de cidades litorâneas e turísticas nessa região estimula o comércio desse fruto e justifica essa produção (JESUS JR *et al.*, 2015). A maior parte do produto acaba sendo considerada resíduo, sendo subutilizada ou descartada no meio ambiente, como mostra a Figura 2, gerando impactos socioambientais e dificuldades no sistema de coleta de resíduos sólidos urbanos, visto que o coco possui alta resistência à degradação ambiental.

Figura 2 - Descarte da casca do coco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo a fibra de coco sendo utilizada na fabricação de produtos como: fios, cordas, tapetes, colchões, painéis de isolamento, a matéria-prima reaproveitada alcança apenas 450 mil toneladas de fibras por ano, quantidade bastante inferior ao total do subproduto disponível. Nesse sentido, pesquisas com foco na produção de novos materiais que utilizem as fibras de coco e sejam capazes de atender as necessidades do mercado, como os materiais compósitos, são de grande interesse socioambiental (AYRILMIS *et al.*, 2011).

No cenário nacional, a atividade da Construção Civil, mesmo no contexto de pandemia pelo COVID-19, mantém-se aquecida com grandes obras de infraestrutura em concreto armado. Os investimentos nesse setor são os principais responsáveis por promover um crescimento sustentável da economia, que permitem elevar a produtividade de outros investimentos e agregar ganhos a várias atividades. Ações públicas em infraestrutura funcionam como fator de redução na desigualdade social e urbana, bem como contribuem para melhorias da qualidade de vida da população. Além disso, o setor da Construção civil é capaz de dinamizar diversos outros setores econômicos (COSTA *et al.*, 2019).

A busca constante pelo melhoramento das técnicas construtivas e otimização do uso de recursos naturais, propicia que pesquisas sejam executadas em misturas cimentícias, com o objetivo de minimizar a emissão de gases poluentes na atmosfera, seja pela adição de materiais alternativos na elaboração de argamassas e concretos, como no desenvolvimento de novos cimentos (BONATO, 2014).

Existem vantagens técnicas e econômicas da utilização de adições minerais em estruturas de concreto. Em alguns casos, pode haver redução dos custos de produção em virtude da substituição de parcela de clínquer por materiais energeticamente menos nobres, uma vez que as adições minerais são obtidas, geralmente, a partir de subprodutos industriais ou

agroindustriais. Destacam-se também características associadas a maior durabilidade e resistência a ataques químicos, ambas evidenciadas pela presença de microestrutura mais compacta e homogênea, devido ao refinamento dos poros e grãos, obstruindo a percolação de fluidos pelos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentro desse contexto, considerando a abundância de subprodutos do coco disponíveis e atualmente subutilizados, as características das fibras da casca do coco, a necessidade do desenvolvimento de novos produtos com reaproveitamento de matérias-primas secundárias da cadeia produtiva, e a importância das adições e aditivos na construção civil, a casca do coco apresenta-se com potencial de aproveitamento e alternativa sustentável na produção de adição mineral para concreto.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

- Analisar a aplicação das cinzas da fibra do coco, provenientes da queima por combustão e degradação térmica em forno Mufla, como adição em concretos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar a produção do coco em Alagoas, os principais usos, o sistema produtivo e as destinações dadas aos subprodutos derivados do coco;
- Identificar as propriedades físico-químicas das cinzas geradas com e sem controle de temperatura;
- Averiguar a proporção das cinzas da fibra do coco que represente os melhores resultados nas propriedades mecânicas do concreto;
- Obter uma comparação entre as propriedades mecânicas obtidas no concreto com adição da cinza da fibra do coco em relação ao concreto sem uso de cinzas.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho foi desenvolvido e organizado com a seguinte estrutura:

A seção 1 aborda aspectos norteadores da pesquisa como introdução, objetivo geral, objetivos específicos e justificativa. Na seção 2 está contida a revisão bibliográfica sobre dados de produção de coco no Brasil e no mundo e seus principais usos dentro de cada contexto. Em

seguida, são apresentadas as fibras do coco e suas características físico-químicas; e, na sequência, as adições utilizadas na Construção Civil, definições e principais características.

A seção 3 apresenta a descrição dos materiais e métodos que está dividida em 2 etapas principais. A primeira etapa apresenta a caracterização físico-química das cinzas produzidas pelos processos de combustão e pirólise, sendo eles: Análise Granulométrica, Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A segunda etapa aborda os ensaios tecnológicos no concreto com e sem uso das cinzas em diferentes percentuais, sendo os ensaios: consistência no estado fresco (*Slump Test*), absorção de água por imersão e resistência mecânica à compressão aos 28 dias.

Na seção 4, estão contidos os resultados experimentais da pesquisa, composta por estrutura semelhante à descrita na seção 3, correlacionando os resultados com outras pesquisas e entre os 2 tipos de cinzas produzidas. Já a seção 5 mostra as conclusões da pesquisa; e, a seção 6, as sugestões de trabalhos futuros. Na seção 7, estão relacionadas as referências, utilizadas durante a elaboração dessa dissertação.

Na seção 8, referente aos apêndices, encontram-se os cálculos para determinação do traço de referência, e o produto técnico e tecnológico da pesquisa (PTT), a saber: artigo referente a estudo da aplicação da cinza produzida por combustão ao ar livre como adição mineral em concretos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Produção e principais usos industriais do coco

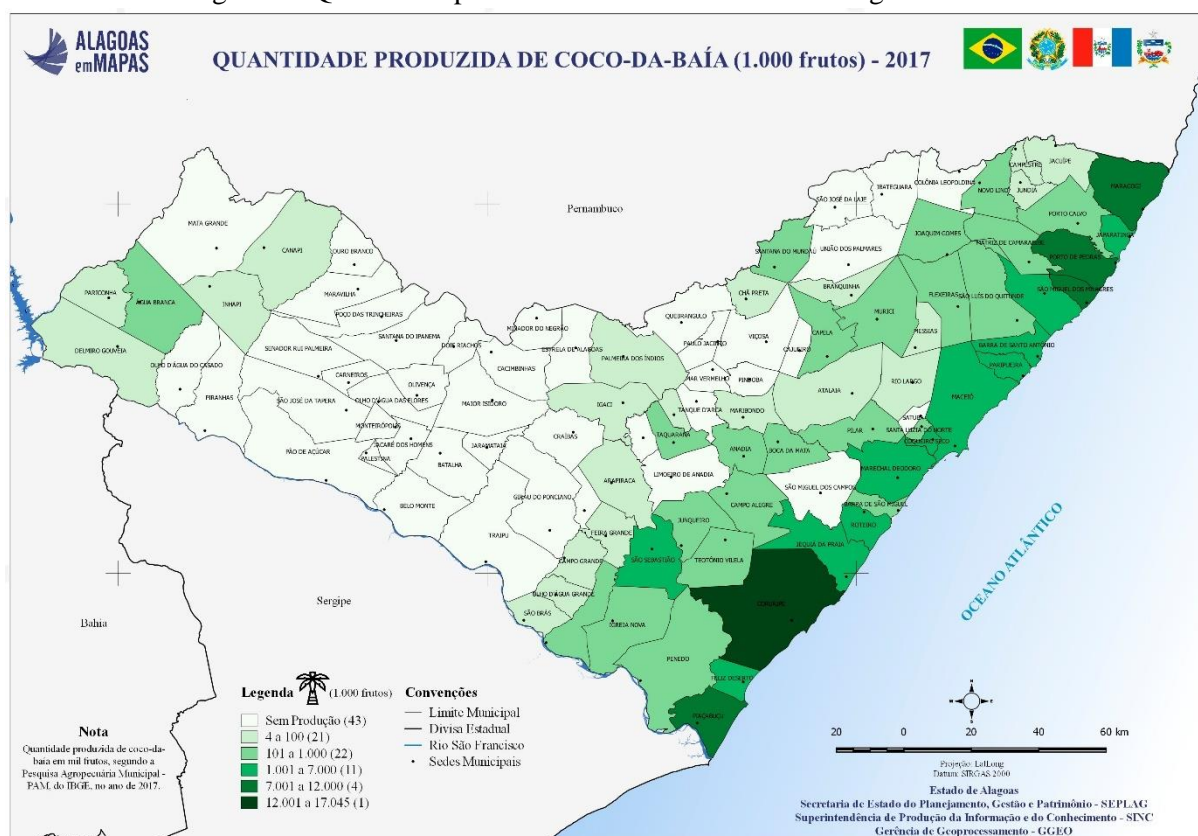
A produção mundial de coco, estimada para 63,6 milhões de toneladas em 2020, continua bastante concentrada em três Países, Indonésia (30,1%), Filipinas (24,7%) e Índia (19,0%). O Brasil é o quinto maior produtor, com a participação de 4,5% do total mundial, após Sri Lanka. No mercado global, o fruto do coqueiro é destinado, especialmente, à produção de copra, tendo como principais derivados, óleo de coco (62,0%) e farinha de coco (33,1%) (BRAINER; XIMENES, 2020).

No Brasil, a previsão estimada em 2020 era que a área colhida de coco-da-baía chegasse a 223 mil hectares com produção de 1,95 bilhão de frutos. Diferente do principal direcionamento dos maiores produtores mundiais, os cultivos brasileiros destinam-se à produção de coco seco in natura, coco ralado, leite de coco e água de coco. O Nordeste constitui-se na maior região produtora, com 81,3% da área e 71,2% da produção nacional. Posição que foi conquistada desde a introdução dos primeiros plantios em seu litoral e que ainda se mantém (BRAINER; XIMENES, 2020).

Considerando os estados do Nordeste, Alagoas ocupa a quarta colocação em área destinada ao plantio de coco, sendo de 21 mil hectares; com produção, no ano de 2019, de 92 mil toneladas do fruto. Contudo, Alagoas ocupa a quinta colocação em produção; sendo a Bahia, o maior estado produtor, com 38,5 mil hectares de área cultivada e produção de 333 mil toneladas; seguido pelo Ceará, com 38 mil hectares e produção de 302 mil toneladas; depois, Sergipe, com 24 mil hectares e produção de 152 mil toneladas; e, Pernambuco, com 8,5 mil hectares de plantio e produção de 143 mil toneladas (IBGE, 2019).

Em Alagoas, os produtos agrícolas de maior ênfase na região litorânea do estado são a cana-de-açúcar e o coco. O município de Coruripe, por exemplo, possui área de 4 mil hectares destinada à plantação de coqueiros, representando 2% de toda a área nacional destinada ao plantio desse fruto, com produção superior a 20 milhões de cocos ao ano, cerca de 4% de toda a produção nacional (IBGE, 2017). A Figura 3 apresenta a produção de coco no estado de Alagoas no ano de 2017.

Figura 3 - Quantidade produzida de Coco-da-Baía em Alagoas em 2017



Fonte: SEPLAG, 2019.

A Figura 3 apresenta mapa do estado de Alagoas e legenda detalhando a produção de coco por município, a partir da escala de tonalidades de verde. Os municípios destacados em branco não apresentam produção de coco para comercialização. Dentre as tonalidades de verde, a figura apresenta escala com 5 níveis de produção, entre 4000 unidades até 17 milhões de unidades produzidas em 2017. Destaque para o município de Coruripe, maior produtor de coco do estado de Alagoas, com produção entre 12 e 17 milhões de unidades do fruto, seguido pelos municípios de Maragogi e Porto de Pedras, com produção entre 7 e 12 milhões de frutos (SEPLAG, 2019).

A produção de coco em Alagoas e no Brasil tem como maior finalidade a produção de insumos da indústria alimentícia; contudo, como subproduto, são geradas milhões de toneladas de cascas deste fruto por ano. Para maior compreensão da produção alagoana de coco, na próxima subseção, apresenta-se o sistema produtivo do cultivo do coqueiro.

2.2. Sistema produtivo do cultivo do coqueiro

Segundo Siqueira *et al.* (2002), o coco não é um fruto genuinamente brasileiro; foi importado de outros países até que a produção nacional se consolidasse. De acordo com os autores, as primeiras mudas de coqueiro gigante foram introduzidas no país somente em 1553, pelos portugueses, quando houve o plantio de coqueiros no atual Estado da Bahia.

Quanto aos sistemas produtivos de coco no Brasil, podem ser divididos em 4 períodos. O primeiro período de produção de coco no Brasil foi de 1553 até meados de 1800, representado pela fase exclusivamente extrativista, quando apenas eram plantadas as árvores e colhidos os frutos dos coqueiros gigantes, sem a utilização de quaisquer instrumentos técnicos e/ou a realização de tratos culturais (CAVALCANTE, 2017).

No segundo período, compreendido entre 1800 até meados da década de 1930, houve considerável intervenção humana no processo produtivo do coco. Os coqueiros continuavam sendo produzidos em práticas extrativistas, mas já havia relativa preocupação com a produtividade das árvores; e, os produtores já aplicavam adubos orgânicos e realizavam a poda dos coqueiros e a capina do local, onde eles eram cultivados (CAVALCANTE, 2017).

O terceiro período, de meados de 1930 a 1990, marcou a consolidação do cultivo e do consumo de coco no Brasil. Também foram produzidos produtos derivados, como o leite de coco, óleo de coco e o coco ralado. Esse período foi marcado pelo surgimento das primeiras grandes empresas agrícolas e agroindustriais do setor, especialmente, a Sococo (fundada em 1966 em Alagoas) e a Ducoco (fundada em 1982 no Ceará), que são pioneiras no cultivo de variedades de coqueiros anões e híbridos (CAVALCANTE, 2017).

O quarto e atual período constitui-se o marco na transição entre dois distintos modelos produtivos, caracterizados pela inserção, cada vez maior, da técnica, ciência e informação no processo produtivo do coco. É somente nesse último período que há o crescimento considerável da produtividade das árvores, em virtude da disseminação de novas e modernas técnicas associadas ao processo produtivo do fruto (CAVALCANTE, 2017). As principais características do sistema produtivo do coco são apresentadas no Quadro 1.

De forma geral, observando o Quadro 1 e considerando o contexto nacional, o sistema de produção do coco vem sendo, significativamente, modificado nas últimas décadas, sobretudo nas produções de coqueiros do tipo anão e híbrido, onde se percebe a passagem de modelo de produção, baseado no extrativismo, para o modelo produtivo, inserido em contexto representado pelo advento da agricultura científica. Isso significa que a produção do fruto deixou de depender, essencialmente, de condicionantes naturais e passou a depender

sobremaneira de insumos e implementos difundidos com a modernização agrícola (CAVALCANTE, 2017).

Quadro 1 - Principais Características do sistema produtivo do coco em períodos distintos

Períodos	Características do sistema produtivo do coco
Período 1 (1553 - 1800)	Predominantemente no Nordeste Produção apenas de coqueiro gigante Exclusivamente extrativista Sem uso de recursos técnicos e tratos culturais Coqueiros plantados de forma aleatória
Período 2 (1800 - 1930)	Intervenção humana no processo produtivo Produções extrativistas e semiintensivos Uso de adubos orgânicos e poda dos coqueiros Produção voltada também para o mercado Atividade prioritariamente de subsistência
Período 3 (1930 - 1990)	Cultivo e consumo em todo o Brasil Produção de derivados (Leite de coco, óleo de coco) Surgimento de grandes empresas agroindustrias do setor Cultivo de variedades de coqueiro (Anão e híbrido) Expansão do uso de insumos químicos Desenvolvimento de sistemas de irrigação
Período 4 (1990 - atualmente)	Inserção cada vez maior da técnica Crescimento considerável na produtividade das árvores Biotecnologia passa a assumir um papel importante Utilização da ciência e da informação a serviço do cultivo

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Cavalcante, 2017.

Na região Nordeste, cerca de 60% da variedade plantada ainda é de coqueiro gigante, destinado à produção de coco seco, com baixos preços no mercado e menor remuneração por área. Isso reflete em menor rendimento, quando comparado a outras regiões do país, visto que a renda do produtor, muitas vezes, não é suficiente para cobrir os custos com insumos e adoção de tecnologias, continuando o mesmo sistema de cultivo semi extrativista, principalmente em áreas litorâneas (BRAINER; XIMENES, 2020).

Considerando a área de recorte dessa pesquisa, que se delimitou ao município de Coruripe-AL, maior produtor de coco do estado de Alagoas, tem-se cenário semelhante ao apresentado por Brainer e Ximenes (2020) para o nordeste. Segundo dados obtidos na Secretaria de Agricultura do município, estima-se que a produção de coco acontece em torno de 60 sítios, na sua maioria por pequenos e médios produtores, que variam a produção entre 2 mil unidades

até 100 mil unidades por colheita, seguindo sistema produtivo semelhante ao apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema produtivo do coco comumente utilizado em Coruripe-AL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 4, percebe-se que o ciclo produtivo do coco na região de estudo gera grande quantidade de subprodutos desperdiçados, associado a aspectos culturais e organizacionais dos produtores e à falta de empresas na região, que façam a coleta e aproveitamento das cascas do coco dos sítios, comprometendo o fechamento do ciclo produtivo do coco na região. Observa-se que as cascas do coco, enquanto matérias-primas subutilizadas, apresentam custos e impactos para a sociedade e o meio ambiente; ao passo em que o seu aproveitamento agrega valor ao subproduto, podendo trazer benefícios socioambientais para o setor produtivo e para a sociedade como um todo (MIOLA *et al.*, 2020).

No sistema de produção, apresentado na Figura 4, percebe-se que o modelo de produção, sem o reaproveitamento dos subprodutos, encontra-se baseado em modelo produtivo vinculado à Economia Linear, que consiste em processo composto pelas etapas: (I) extração de insumos; (II) produção; (III) distribuição de produtos; (IV) consumo; e (V) descarte de resíduos e/ou produtos, que não estão sendo utilizados. A Economia Linear consiste em organização, em que a cadeia produtiva se ocupa apenas de extrair recursos, produzir bens e descartar resíduos. Esse modelo é o mais enraizado na economia mundial e brasileira, mas tem se provado inviável, por

causar o esgotamento dos recursos finitos do meio ambiente e provocar enorme geração de resíduos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Em contrapartida ao modelo linear de produção, surgiu novo modelo econômico, baseado na Economia Circular, que incentiva nova maneira de utilizar as matérias-primas e a energia. Este modelo constitui-se em três princípios básicos. O primeiro, diz respeito à preservação e ao aumento do capital natural. Quando há necessidade de recursos naturais no sistema produtivo, esses são determinados a partir de tecnologias e processos, que apresentam melhor desempenho e utilização de recursos renováveis, que são estimulados através da criação de condições necessárias para a sua regeneração. O segundo princípio refere-se à circulação constante dos materiais, tanto no ciclo biológico como no técnico, permitindo a otimização da produção de recursos. O terceiro e último princípio possui como base a eficácia do sistema que, só é possível, através da identificação e exclusão das externalidades negativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Portanto, a Economia Circular busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos durante e após o seu uso, reduzindo o consumo de insumos e recursos não-renováveis e optando pela utilização de recursos renováveis e insumos de base biológica; propondo a maior circulação dos subprodutos através do reuso, seja na mesma cadeia produtiva, seja para o reaproveitamento em outras indústrias (LUZ, 2017). O que ressalta a importância desse estudo para a análise das cinzas da casca enquanto subproduto para a indústria da Construção Civil. Na sequência desta subseção, são apresentadas as características físicas e químicas das fibras da casca do coco.

2.3. Fibras da casca do coco

As fibras vegetais existentes na casca do coco são formadas por diversos componentes químicos, constituídos a base de Hidrogênio (H) e Carbono (C), sendo os principais: a celulose, a hemicelulose e a lignina. A lignina consiste em polímero complexo, responsável pela formação da parede celular, cuja concentração fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, influenciando a estrutura, as propriedades, a morfologia e a flexibilidade. Fibras com alto teor de lignina são de excelente qualidade e alta flexibilidade, pois fornecem resistência à compressão ao tecido celular, protegendo contra danos físicos e químicos (CABRAL *et al.*, 2017). A Tabela 1 apresenta as principais propriedades da fibra do coco.

Tabela 1 - Valores médios das principais propriedades da fibra de coco

Componentes	Percentual
Celulose	43,44%
Lignina	45,84%
Solúveis em água	5,25%
Pectina	3,00%
Resíduo mineral	2,22%
Hemicelulose	0,25%

Fonte: Elaborado pelo autor, com base de Oliveira *et al.*, 2015.

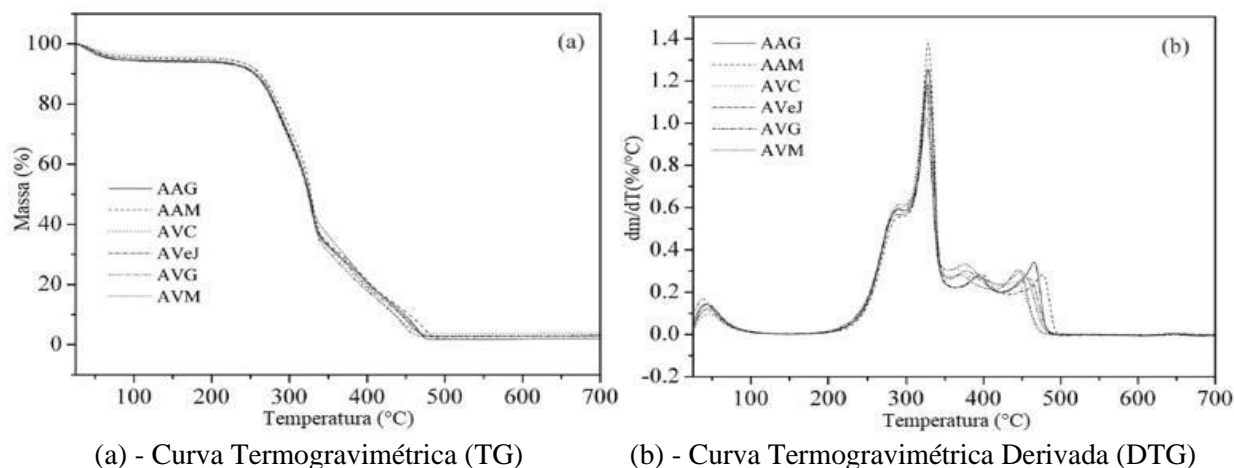
Royer *et al.* (2005) afirmaram que o primeiro aditivo redutor de água utilizado pela indústria da Construção Civil foi um polímero dispersante à base de lignina. De acordo com Moura (2014), as fibras da casca do coco (mesocarpo) são materiais lignocelulósicos compostos por mais de 40% de lignina, atribuindo dureza e durabilidade, quando comparadas com outras fibras naturais.

Ataie e Riding (2014), desenvolveram pesquisa com uso de cinzas com alto teor de lignina, na substituição parcial de cimento em concretos, e obtiveram ganho de resistência à compressão de mais de 32%. Dantas *et al.* (2018) e Calado *et al.* (2021) também desenvolveram pesquisas com uso de subproduto rico em lignina em argamassas e concreto e verificaram a viabilidade da utilização desse tipo de cinza na construção civil.

Estudos apontam para a utilização de cinzas de biomassa na produção de materiais de construção, a exemplo da casca de arroz (PEREIRA *et al.*, 2015), do bagaço de cana-de-açúcar (DE PAULA, 2009), da folha de bananeira (KANNING, 2010), e da cinza da casca do coco (BONATO, 2014).

Na pesquisa desenvolvida por Corradini *et al.* (2009), em 5 (cinco) cultivares de coqueiros, verificou pouca variação do teor de lignina associada à idade da fibra. Em relação à degradação das fibras, a pesquisa apresentou as curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétricas derivadas (DTG) para os cultivares de fibra de coco aos 210 dias de maturação. Na Figura 5, as curvas TG e DTG das fibras de coco dos cinco cultivares estudados por Corrandini *et al.* (2009) em diferentes pontos de maturação apresentaram semelhança bastante acentuada, ou seja, as curvas geradas ficaram praticamente sobrepostas.

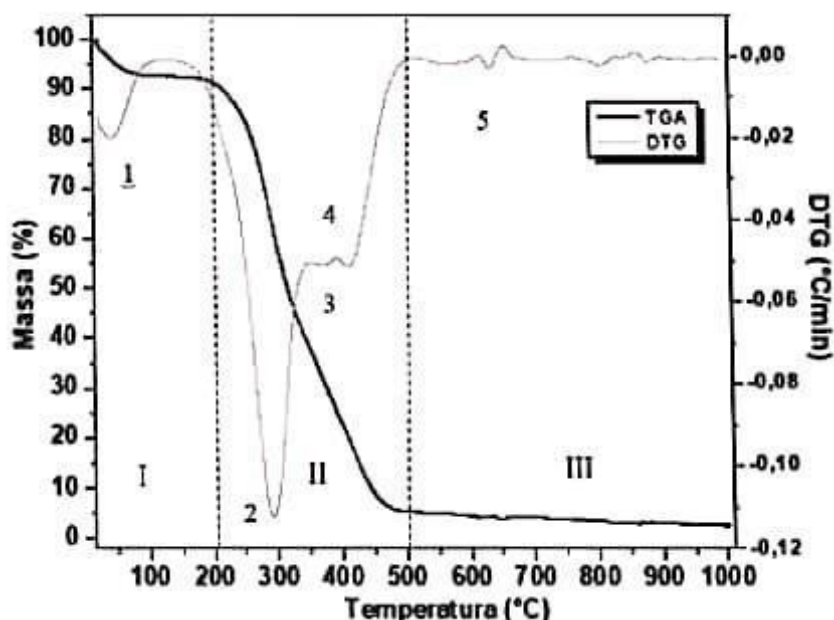
Figura 5 - Curvas TG e DTG obtidas para fibras de coco



Fonte: Corradini *et al.*, 2009, p. 884.

Já na Figura 6, os dados obtidos nas curvas TG/DTG, geradas no estudo de Marcelino *et al.* (2017), exibem etapa de perda de massa em torno de 25 °C-120 °C, relativa à quantidade de água absorvida pelas amostras. A degradação térmica dos componentes das fibras de coco ocorre em faixa de temperatura entre 200 °C a 500 °C, a qual pode variar, dependendo do cultivar e das condições empregadas nas análises (MARCELINO *et al.*, 2017).

Figura 6 - Curvas TG e DTG obtidas para fibras de coco



Fonte: Marcelino *et al.*, 2017, p. 347.

É possível observar, através da curva DTG, a existência de 4 (quatro) estágios de decomposição. O primeiro refere-se à evaporação de água da amostra, com ocorrência até a temperatura de 100 °C. O segundo estágio, com variação de massa significativa entre 190 °C e

353 °C, está relacionado à decomposição da hemicelulose, a 292 °C. O terceiro estágio, a 374 °C, representa a degradação da celulose. A decomposição da lignina ocorre aos 413 °C, caracterizando o quarto estágio (MARCELINO *et al.*, 2017). Os resultados obtidos por Marcelino *et al.* (2017) contribuíram na definição da temperatura adotada no aquecimento do forno Mufla para degradação térmica das fibras do coco, que será detalhado no item 3.1.2.1.

Considerando a abundância de subprodutos do coco disponíveis e a necessidade de desenvolvimento de novos produtos com reaproveitamento da casca do coco para a Construção Civil, a seção 2.4 aborda os tipos de adições minerais, características e principais utilizações.

2.4. Adições Minerais

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990), o termo *adição* deve ser empregado para designar “produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”, sendo classificadas quanto à ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas. A Figura 7 apresenta alguns exemplos de adições minerais utilizadas na Construção Civil. Na parte (a) da Figura 7, tem-se a Sílica Ativa; na parte (b), está a Escória de Alto Forno; e na parte (c), o Metacaulim.

Figura 7 - Exemplos de adições minerais utilizadas na Construção Civil



Figura 5(a) - Sílica Ativa

Figura 5(b) - Escória de Alto Forno

Figura 5(c) - Metacaulim

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Costa *et al.*, 2019.

As adições minerais inertes promovem basicamente três efeitos físicos principais sobre a hidratação do cimento Portland: redução do consumo do cimento; aumento no teor de finos e nucleação heterogênea. A redução do consumo do cimento é equivalente ao aumento da relação

água/cimento. Quanto maior o teor de substituição, menor a quantidade de cimento, acarretando menor teor de hidratos produzidos ao longo do tempo (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Entre os efeitos físicos, está o efeito microfiller, que consiste na ocupação dos espaços vazios por micropartículas de adição. O efeito da redução do consumo do cimento consiste na menor concentração de cimento, reduzindo a quantidade de produtos da hidratação; e, o efeito de nucleação heterogênea proporcionado pela adição mineral funciona com a restrição do espaço para o crescimento dos cristais na superfície do cimento (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

O aumento no teor de finos depende da finura e da quantidade de material inerte utilizado e promove alteração na porosidade inicial da mistura, conseqüentemente, contribui com a velocidade de hidratação do cimento e com a formação de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H). O efeito de nucleação heterogênea, processo físico conduzido pela ativação química da hidratação do cimento, que catalisa o processo de nucleação dos hidratos por meio da redução da barreira de energia, é tanto mais significativo quanto maior a finura do material adicionado, funcionando apenas como uma superfície onde ocorre a hidratação (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

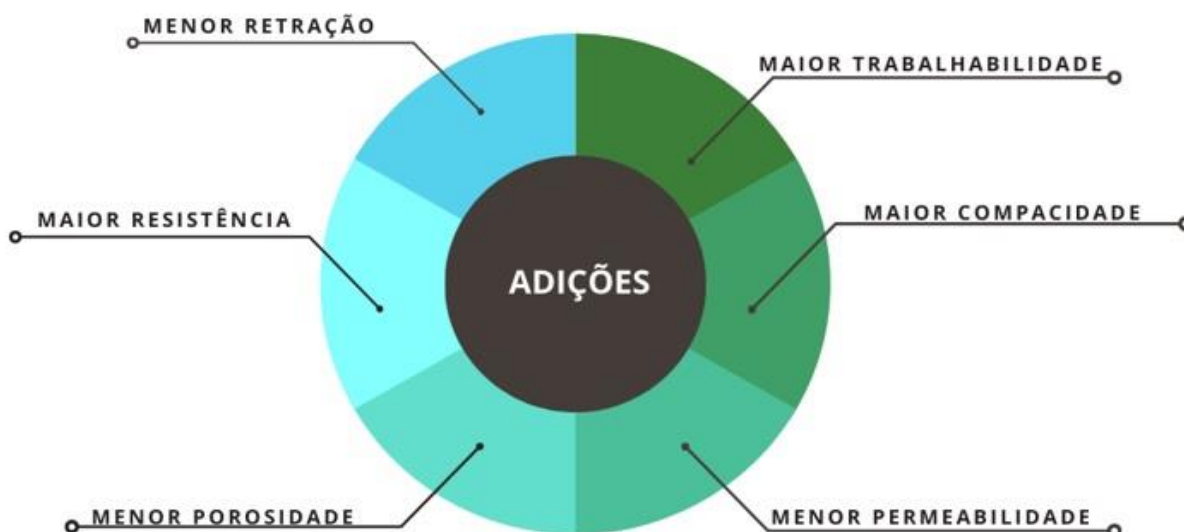
As adições denominadas cimentantes dispõem de hidratação lenta e a quantidade de C-S-H produzida não é suficiente para que essas adições sejam utilizadas com finalidade estrutural. Esse tipo de adição não precisa de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{HO})_2$) para formar os produtos cimentantes C-S-H; contudo, quando usada em substituição parcial ao cimento Portland ou como adição, a presença da gipsita e do $\text{Ca}(\text{HO})_2$ aceleram a sua hidratação, proporcionando a formação de C-S-H (DAL MOLIN, 2005). Um exemplo desse tipo de adição é a escória granulada de alto forno.

Adições pozolânicas são definidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que dispõem de pouca ou nenhuma atividade aglomerante; no entanto, apresentam granulometria fina e, na presença de água, fixam o $\text{Ca}(\text{HO})_2$ à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades hidráulicas.

As adições pozolânicas necessitam do $\text{Ca}(\text{HO})_2$ resultante da hidratação do cimento para produzir o C-S-H e os aluminatos hidratados. Dessa forma, a atividade pozolânica consiste na formação de produtos de hidratação secundários, tendendo a preencher os vazios capilares com material C-S-H de baixa densidade e não orientados (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A Figura 8 apresenta o resumo dos principais efeitos das adições minerais nos concretos.

Os efeitos físicos e químicos das adições minerais alteram características dos materiais cimentícios nos estados fresco e endurecido. No estado fresco, a adição mineral pode influenciar no consumo de água, no calor de hidratação, e aspectos reológicos, tais como: viscosidade e plasticidade. Já no estado endurecido, a adição mineral pode interferir nas resistências à compressão e à tração, bem como na durabilidade desses materiais (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

Figura 8 - Efeito das adições sobre os concretos



Fonte: Elaborado pelo autor.

No estado fresco, o efeito das adições está ligado ao aumento da coesão, à redução da tendência de exsudação e de segregação dos agregados. Geralmente, o aumento no teor de finos aumenta a demanda por água para se atingir uma mesma consistência. O calor de hidratação, normalmente, é reduzido no caso de substituição do Cimento Portland por adição. No estado endurecido, a adição mineral, geralmente, provoca um ganho de resistência à compressão por conta do processo de refinamento dos poros, além de um ganho pouco significativo de resistência à tração por conta do menor consumo do cimento. Comumente, as adições interferem na durabilidade, influenciando na porosidade capilar, na resistência a sulfatos, na corrosão da armadura e na reação álcali agregado (DAL MOLIN, 2005).

Observando o potencial físico-químico de alteração das características das matrizes cimentícias, nos estados fresco e endurecido, espera-se que a adição mineral resulte em economia do clínquer e realize mudanças que proporcionem melhora no desempenho da pasta, argamassa ou concreto. A partir disso, a eficiência da adição está diretamente ligada à

capacidade de atuar sobre as propriedades mecânicas (ganho de resistência à tração e à compressão), propriedades no estado fresco (aspectos reológicos, consumo de água, redução da fissuração por retração plástica) e durabilidade (redução da permeabilidade e absorção) (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

A eficiência na utilização das adições minerais está diretamente relacionada à composição química, grau de amorficidade, finura e quantidade utilizada. Quanto ao uso de cinzas como adição mineral, a eficiência está relacionada ao tipo de biomassa utilizada e às condições de queima (variação de temperatura, tipo de caldeira, entre outros), pois estes fatores influenciam diretamente nas propriedades químicas e físicas da cinza e determinam seu efeito sobre os materiais à base de cimento, seja na aplicação como pastas, argamassas ou concretos (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

Após serem vistos os tipos de adições minerais existentes, principais funcionalidades e características, na seção seguinte serão apresentados alguns trabalhos que utilizaram a fibra do coco *in natura* e em forma de cinzas na composição de argamassas e concretos.

2.5. Estudos de reaproveitamento da fibra do coco em Argamassas e Concretos

Em pesquisa desenvolvida por Matos e Guimarães (2017), foi estudado a aplicação de cinzas da casca do coco como substituição parcial de cimento em argamassas. A produção das cinzas utilizou os procedimentos de secagem das cascas em Mufla por 7 dias, combustão em “fogão artesanal” sem controle de temperatura e degradação por 30 min no forno Mufla a 600°C. A substituição foi feita nos percentuais de 5%, 10% e 15% em relação à massa de cimento, além do uso de aditivo superplastificante em dosagens diretamente proporcionais ao aumento da substituição de cimento por cinzas, para manter a trabalhabilidade da argamassa. Obteve, como resultado, a possibilidade de utilização de cinzas da casca do coco, como adição mineral nas argamassas em percentuais de até 10%.

O estudo de Bonato (2014) analisou o uso de adições minerais e orgânicas em concretos, com a substituição parcial de cimento por cinzas de casca do coco, além das fibras naturais da casca do coco e sisal. A produção das cinzas utilizou os seguintes procedimentos: Pré-tratamento em forno elétrico entre 400°C e 550°C; e, posteriormente, forno mufla em temperaturas de 600°C a 900°C, por 1 hora em cada temperatura, aumentando a cada 100°C, no total de 4 horas no forno Mufla, visando posterior análise química e ensaios mecânicos das cinzas geradas. As substituições feitas foram de 3%, 5% e 8,5%. Obteve, como resultado, que

o percentual de substituição com melhor desempenho ocorreu em torno de 3,5% de substituição de cimento por cinzas, sendo viável a utilização das cinzas como adições minerais em concretos.

Araújo e Araújo (2019) desenvolveram pesquisa em que utilizaram cinzas de coco babaçu em substituição parcial do cimento em concretos. Foram utilizados dois tipos de cinzas: Cinza de Coco Babaçu Inteiro (CCBI) e Cinza de Coco Babaçu residual da indústria de produção de óleo (CCBU). Os teores de substituição parcial do cimento foram nos percentuais de: 5%, 10%, 15% e 20%, para os 2 tipos de cinzas produzidas. A CCBU foi produzida em forno, que utiliza o calor da queima das cascas do coco para aquecimento da água da indústria; e, a CCBI foi produzida em forno de tijolos refratários. Ambos os processos sem controle de temperatura da queima.

Os ensaios realizados foram: análise granulométrica das cinzas geradas, consistência do concreto no estado fresco (Slump Test) e resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias. Os resultados obtidos foram que a granulometria apresentou distribuição de 5% na peneira 2,36 mm; 6,2% na peneira 1,2 mm; 10,6% na peneira 0,6 mm; 20,2% na peneira 0,3 mm; 26,6% na peneira 0,15 mm, restando 31,3% no fundo. O Slump variou entre 75 mm para o traço de referência até 35 mm para a substituição de 20% de cimento por cinzas. Quanto à resistência à compressão, os resultados foram que substituições de até 10% geraram concretos com resistência equivalente à resistência do concreto de referência, e perda de resistência de 6% em percentuais de substituição de 15% e 20%. Araújo e Araújo (2019) concluíram, em seu estudo, que substituições de até 10% seriam viáveis.

Cardoso (2014) desenvolveu estudo que aplicou cinzas da casca do coco babaçu em argamassas. Foram avaliadas 2 possibilidades: adição de 10% das cinzas na argamassa; e, substituição de 10% de massa de cimento pelas cinzas. As cinzas utilizadas na pesquisa foram coletadas do forno de indústria de cerâmica, que utiliza a casca do coco como fonte energética. A temperatura de queima desse forno foi estimada em 900°C. Quatro tratamentos foram adotados: cinzas conforme coletadas; cinzas moídas; cinzas coletadas e colocadas na Mufla a 700°C por até 24 horas; e, cinzas moídas, após procedimento no forno Mufla. Os resultados obtidos foram que as cinzas que não foram moídas apresentaram maior índice de atividade pozolânica; nas argamassas, as cinzas adicionadas em substituição atendem os requisitos mínimos previstos na norma que estava em vigor na época do estudo, NBR 13276 (ABNT, 2005). Essa norma foi atualizada em 2016 e, também teve como resultado que o tratamento em Mufla a 700°C não trouxe melhoria às cinzas coletadas na indústria.

A pesquisa de Brasileiro (2013) avaliou a utilização de material particulado da fibra do coco em compósitos cimentícios. Nessa pesquisa, as partículas da fibra não passaram por tratamentos de degradação térmica em Mufla nem por combustão por chamas, sendo aplicado de forma natural. O material particulado de fibra de coco substituiu o agregado miúdo, observando as influências da granulometria e tratamentos químicos no pó, visando analisar o desempenho dos materiais compósitos. Obteve, como resultados, que os tratamentos químicos do material particulado do coco com pH alcalino e a diminuição da granulometria influenciaram positivamente na compatibilidade com o cimento, deixando-os mais densos e resistentes.

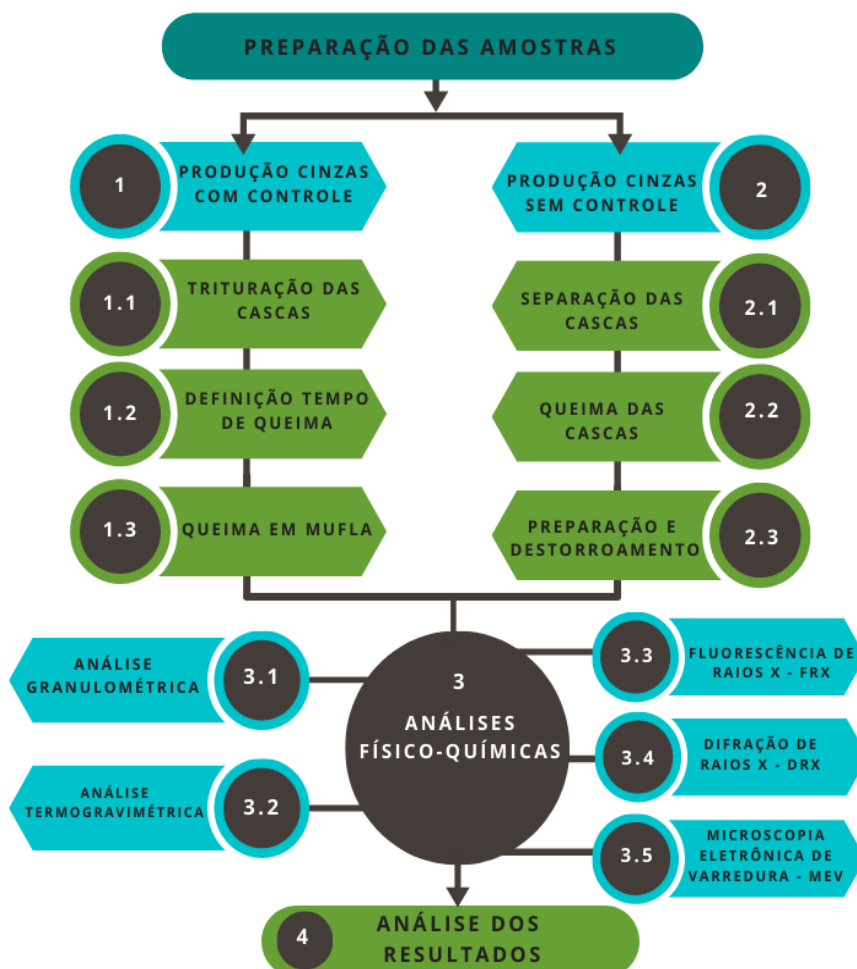
3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida caracteriza-se como pesquisa aplicada, de natureza tecnológica, com abordagem quantitativa e qualitativa. Quanto ao objetivo, classifica-se como exploratória, tendo delineamento experimental e ensaios realizados em laboratório (SOUZA *et al.*, 2013). O desenvolvimento da pesquisa foi dividido em 2 etapas, a saber: 1. Caracterização e ensaios físico-químicos das cinzas geradas com e sem controle de temperatura; 2. Utilização das cinzas em traços de concretos, com realização de ensaios de consistência, absorção de água e resistência à compressão.

3.1. Caracterização e ensaios físico-químicos das cinzas produzidas

A Figura 9 apresenta o fluxograma da primeira parte do procedimento experimental, onde é exemplificado o percurso da caracterização físico-química do subproduto.

Figura 9 - Fluxograma da primeira parte do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

A preparação das amostras ocorreu de 2 formas distintas: cinzas produzidas com controle de tempo e temperatura de degradação térmica no forno Mufla (CFC-LAB), e cinzas produzidas pelo processo de combustão, sem controle de tempo e temperatura de queima (CFC-LIV).

A produção das CFC-LAB contou com as etapas de trituração das fibras da casca do coco, definição do tempo e temperatura de aquecimento do forno Mufla e degradação do material no forno Mufla. Já as CFC-LIV passaram pelas etapas de separação e amontoamento das cascas de coco, queima das cascas, coleta e destorroamento do material resultante, após resfriamento das cinzas.

Após a preparação dos 2 tipos de cinzas, elas foram submetidas a ensaios físico-químicos, sendo: Análise granulométrica; Análise termogravimétrica; Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), e por fim Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Posteriormente foram analisados e comparados os resultados obtidos.

3.1.1. Produção das cinzas: queima no terreno por combustão

A produção e coleta das CFC-LIV ocorreram em sítio situado na cidade de Coruripe-AL. Trata-se de pequena produção, como outras existentes naquela região, que faz colheita trimestralmente, de aproximadamente 2 mil unidades de coco. Após a finalização da colheita, que demanda cerca de 2 dias de trabalho, os cocos são descascados no próprio terreno e vendidos para empresário local, sendo que apenas o endocarpo é comercializado.

Após os cocos serem descascados, as cascas são amontoadas e, dias depois, queimadas no próprio terreno, por não terem nenhuma alternativa de reuso no próprio cultivo, sendo a alternativa mais barata para liberar espaço no terreno. A Figura 10, a seguir, ilustra os procedimentos de amontoamento (Figura 10(a)) e queima das cascas de coco (Figura 10(b)).

A queima é realizada de maneira induzida, com uso de álcool combustível em 1 ou 2 cascas na base do amontoado ou apenas com fósforo, já que as cascas secas entram em combustão com facilidade. Para a pesquisa, foram queimadas, separadamente, em torno de 100 cascas em cima de base metálica para facilitar a coleta das cinzas, após a combustão. Foram coletadas para a caracterização e ensaios em torno de 1 quilograma (kg) de cinza.

Figura 10 - Queima das cascas do coco no terreno por combustão



Figura 10(a) – amontoamento das cascas

Figura 10(b) – queima das cascas do coco

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o resfriamento, as CFC-LIV passaram pelo processo de destorroamento, que tem por finalidade desagregar as partículas menores das partículas maiores. Nos estudos desenvolvidos por Bonato (2014) e Matos e Guimarães (2017), foram utilizados moinho de bolas no processo de destorroamento; contudo, por limitações nos equipamentos disponíveis, na pesquisa em tela foi adotado o destorroamento manual.

Figura 11 - Destorroamento das cinzas produzidas sem controle no terreno



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 11, a amostra foi colocada no almofariz de porcelana, e aos poucos, com auxílio da mão de gral, recoberta de borracha, foi pressionada, fazendo-se movimentos circulares até a total desagregação das partículas. Os equipamentos usados estão descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016).

3.1.2. Produção das cinzas: temperatura controlada em forno Mufla

Para produção da CFC-LAB, foram coletadas e trituradas cascas de coco em empresa de médio porte, localizada na cidade de Barra de São Miguel-AL, que trabalha com subprodutos da casca de coco, sendo os principais: a fibra triturada e em pó para uso como substrato agrícola; e a “fibra longa”, que é destinada à confecção de mantas em empresa de fora do estado de Alagoas. A trituração foi necessária para otimizar o espaço disponível no forno. O procedimento de trituração da fibra é feito por maquinário composto por sistema de laminas, movido por motor elétrico. A Figura 12, a seguir, apresenta a fibra triturada acondicionada em recipiente metálico.

Figura 12 - Fibra triturada e armazenada em recipiente metálico com tampa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realização da degradação térmica no forno Mufla, as cascas de coco trituradas foram armazenadas em recipientes metálicos com tampa. No espaço disponível no equipamento, foram colocados 6 recipientes metálicos por vez.

3.1.2.1. Determinação da temperatura de operação no forno Mufla

Para determinação da temperatura para degradação térmica da fibra no forno Mufla, foram analisados estudos anteriores que fizeram Análises Termogravimétricas em fibras do coco, como os apresentados por Corradini *et al.* (2009) e Marcelino *et al.* (2017); e, enviadas fibras de coco para o Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Contudo, em virtude do cenário de pandemia pela COVID-19, as atividades nos laboratórios da UFRN foram suspensas para preservação da saúde dos técnicos e pesquisadores.

Por isso, para essa etapa foram considerados os resultados de estudo correlato, feito por Marcelino *et al.* (2017), que constataram que a maior degradação da matéria orgânica da fibra do coco ocorre até 350 °C; e, em segundo intervalo, até 550 °C, acontece a degradação da lignina. Considerando esses intervalos e a hipótese secundária desse trabalho, pela qual se buscou produzir cinzas com maior degradação da matéria orgânica e conservação da lignina, na intenção de verificar a influência da cinza incorporada no concreto, foi definido 400 °C como temperatura de operação do forno Mufla.

O forno Mufla utilizado na pesquisa foi do modelo Fortlab ME 1700/10, pertencente ao laboratório de Processos de Soldagem e Tratamentos Térmicos do Ifal, campus Coruripe. A Figura 13 demonstra o procedimento de degradação térmica da fibra em forno Mufla, na parte (a) da Figura 13, tem-se a visão geral do equipamento utilizado; na parte (b) é apresentado o visor da temperatura, a que o forno foi aquecido; e, a parte (c) apresenta a cinza após passar 1h no forno.

Figura 13 - Produção da cinza no forno Mufla

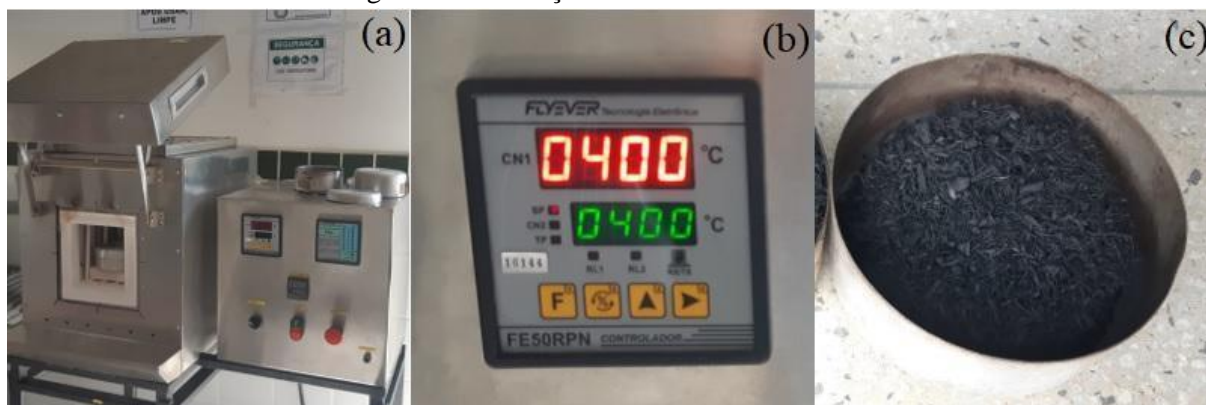


Figura 13(a) - Forno mufla utilizado

Figura 13(b) - Visor de temperatura da mufla

Figura 13(c) - cinza produzida

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em função do espaço interno do forno Mufla, foi necessária a repetição do processo de degradação térmica, até que a massa das cinzas produzidas fosse suficiente para a confecção dos corpos de provas (CPs) nos percentuais de substituição previstos.

3.1.2.2. Determinação do tempo de operação do forno Mufla

Após definição da temperatura de referência de degradação, o forno foi aquecido até a temperatura de 400 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min; e, a fibra triturada, separada em 4 porções de 20 g, armazenadas em recipientes metálicos com tampa, que foram colocados para degradação em 4 tempos distintos: 1h, 2h, 3h e 4h. O objetivo desse procedimento foi verificar a influência do tempo na degradação das fibras e as diferenças de composição dos elementos químicos das cinzas, visando otimizar o procedimento, já que maior tempo no forno Mufla representa maior gasto energético. Nos estudos desenvolvidos por Bonato (2014), Matos e Guimarães (2017) e Cardoso (2014) foram adotados tempos no forno Mufla de até 24 horas.

Os recipientes foram identificados e colocados ao mesmo tempo no equipamento, sendo retirados 1 por vez, quando alcançados os tempos de degradação estabelecidos. Em seguida os recipientes foram deixados em temperatura ambiente para resfriamento e novamente pesados.

3.1.3. Análises físico-químicas das cinzas produzidas

3.1.3.1. Análise Granulométrica das cinzas

A análise granulométrica foi realizada nos laboratórios de Materiais e de Solos do Ifal, Campus Maceió. A determinação da granulometria é dada através da distribuição dos grãos da amostra, ou seja, a porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa total utilizada para o ensaio (BONATO, 2014). Para realização dessa análise, foram separadas 2 amostras de 300 g de cada tipo de cinza produzida, com vistas à repetição do procedimento; em seguida, foi realizado o processo de peneiramento, utilizando parte da série normal de Tyler, sendo as peneiras utilizadas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

Contudo, por se tratar de cinzas finas, e considerando que a última peneira da série normal é a de 0,15 mm, foi acrescentada a peneira de 0,075 mm, para melhoria da análise. Justifica-se o acréscimo da peneira de 0,075 mm, além das previstas na série de Tyler, com base em Matos e Guimarães (2017) e na NBR 12653 (ABNT, 2014), visto que o efeito filer está

diretamente influenciado pela finura do material. De acordo com as referências adotadas, mais de 65% do material deve passar pela peneira de 0,045 mm para que o efeito fíler seja verificado. No laboratório de Materiais e de Solos do Ifal, Campus Maceió, a menor peneira existente era a de 0,075 mm, a qual foi acrescentada para se obter dados mais consistentes sobre a granulometria das cinzas.

Além do peneiramento no agitador por 2 min, foi adotado peneiramento manual e individual das peneiras, até que fosse percebido que a passagem de material foi inferior a 1% do material retido. Após a execução dos procedimentos nas 2 porções e verificado o atendimento aos parâmetros normativos, foi realizado o cálculo das porcentagens médias, retidas e acumuladas, em cada peneira. Os procedimentos adotados estão descritos na NBR NM 248 (ABNT, 2003), que foi adotada por esse estudo, por ser a mesma utilizada por Bonato (2014), apesar de existir 2 (duas) normas técnicas em vigor que poderiam ser consideradas para análise granulométrica das cinzas, a saber a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a NBR 7181 (ABNT, 2016).

3.1.3.2. Massa específica das cinzas

Considerando que não há norma técnica para determinação de massa específica das cinzas enquanto subproduto, para a pesquisa em tela, foi adotada a NBR 16605 (ABNT, 2017). A norma determina massa mínima de 60 gramas para realização do ensaio para obtenção da massa específica. A massa das cinzas utilizada no ensaio foi adaptada, visto que foi percebido, visualmente, que as cinzas tinham menor densidade, sendo necessário usar menor massa de cinzas, para ser possível fazer a leitura do resultado dentro dos limites estabelecidos do frasco Le Chatelier.

O líquido utilizado no ensaio foi o querosene e as massas adotadas das cinzas foram: 25 g para a CFC-LAB; e, 50 g para CFC-LIV. O ensaio de massa específica das cinzas foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais - LEMA, da Universidade Federal de Alagoas - UFAL.

3.1.3.3. Análise Termogravimétrica

As técnicas de análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG) possibilitam a visualização do registro da perda de massa da amostra quando submetida a um programa pré-estabelecido de aquecimento. A TG permite obter informações das reações que

ocorrem durante a degradação do material pelo calor. Parâmetros como composição química, razão de aquecimento e temperatura podem ser comparados nessa análise para determinar a correlação com o rendimento (PADILLA, 2018).

A fibra triturada foi submetida ao ensaio para observação das temperaturas de decomposição dos componentes. A curva termogravimétrica revela as modificações de massa que ocorrem durante o aquecimento de um material e que podem ter duas causas: decomposição ou oxidação (DENARI, 2013). A partir dos gráficos gerados, foram observadas as temperaturas de decomposição dos compostos orgânicos, para posterior comparação com dados da literatura e verificação da temperatura adotada de degradação térmica.

A CFC-LIV também passou por análise termogravimétrica, para a observação de temperatura aproximada da queima; e, para saber, após a combustão, quanto do material foi degradado. As CFC-LAB também passaram pela análise TG, objetivando verificar o percentual de material combustível ainda presente nas cinzas.

As curvas diferencial e termogravimétrica foram obtidas no Laboratório de Propriedades Físicas dos Materiais Cerâmicos da UFRN (LaPFiMC-UFRN), usando termobalança modelo DTG-60H da Shimadzu. A análise foi realizada na faixa de temperatura de 20 °C a 1000 °C sob atmosfera de argônio, usando razão de aquecimento de 5 °C/min e vazão de 50 ml/min. A massa das amostras pesadas em cadinho de alumina foi de aproximadamente 15 mg.

3.1.3.4. Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios X é a técnica não destrutiva em que é possível realizar tanto análises quantitativas como qualitativas, assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra (GOMES, 2015).

A análise por espectrometria de Fluorescência de Raios X é baseada no fato de que os elementos químicos emitem radiações características quando submetidos à excitação adequada. Neste método, o material a ser analisado é atingido com feixe de Raios X, que interage com os átomos da amostra, provocando a ionização das camadas mais internas dos átomos, sendo possível a identificação dos componentes químicos existentes (BONATO, 2014).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais da UFRN, através do espectrômetro EDX-720 da Shimadzu em atmosfera a vácuo, empregando o método semiquantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras.

3.1.3.5. Difração de Raios X

A difração de Raios X (DRX) é a técnica que revela informações estruturais, como composição química, estrutura do cristal, tamanho do cristalito, orientação preferida e espessura da camada (GOMES, 2015). Trata-se do método mais abrangente para determinar a mineralogia dos materiais, devido não só a possibilidade da identificação das espécies minerais presentes, mas também por permitir estudar as características cristalográficas dos minerais. Dentre as principais vantagens da técnica, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados e a possibilidade de análise quantitativa das fases cristalinas (SILVA *et al.*, 2015).

A fibra de coco natural e as cinzas CFC-LAB e CFC-LIV foram encaminhadas para análise, visando observação dos componentes residuais das cinzas e estrutura apresentada pelos elementos para conhecer a formação cristalográfica dos materiais, a fim de verificar o tempo adequado de degradação térmica na Mufla e as diferenças químicas entre as cinzas geradas.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Difração e Fluorescência de Raios X, no Departamento de Engenharia de Materiais da UFRN, através do aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de Cu-K α e ângulo de varredura (2θ) de 0° a 80°, para identificação das fases mineralógicas presentes.

3.1.3.6. Microscopia Eletrônica de Varredura

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) consiste em instrumento imprescindível para as áreas de eletrônica, geologia, ciência e engenharia dos materiais, entre outros. Em particular, o desenvolvimento de novos materiais tem exigido um número de informações detalhadas das características microestruturais. O princípio do MEV consiste em utilizar feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a tela catódica, cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Através desse procedimento, foi possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra, viabilizando a identificação de precipitados e de variações de composição química dentro do grão (DEDAVID *et al.*, 2007).

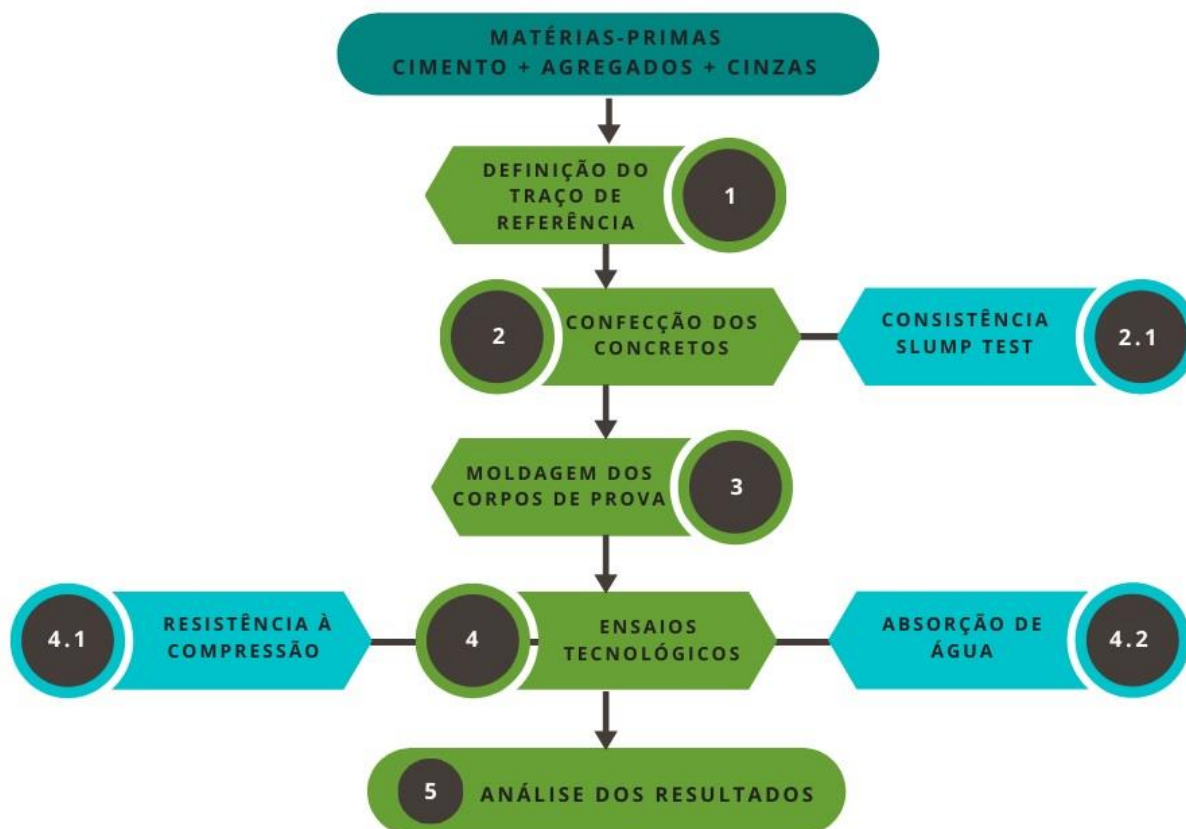
A fibra natural, as cinzas CFC-LAB e CFC-LIV também foram analisadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no Laboratório de Química do Ifal, Campus Maceió, onde foram registradas imagens de alta resolução com magnificação de 100x, 500x,

1000x, 2000x e 5000x do tamanho real do material, para observação das características microestruturais. O procedimento de preparação da amostra consistiu no processo de metalização das amostras por 4 min por fina camada de ouro, que posteriormente foram levadas para o MEV.

3.2. Confeção dos concretos e moldagem dos Corpos de Prova (CPs)

A determinação do traço de referência do concreto foi realizada seguindo os critérios estabelecidos na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O traço de referência teve como objetivo comparar os resultados obtidos do concreto com uso das cinzas. A Figura 14, a seguir, apresenta o fluxograma da segunda etapa do procedimento experimental.

Figura 14 - Fluxograma da segunda etapa do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 14 demonstra as etapas realizadas na segunda etapa do procedimento experimental, sendo elas: definição dos materiais utilizados no traço de concreto (cimento, agregados miúdo e graúdo); definição do traço de referência; confecção dos concretos para

moldagem dos CPs, contudo antes de serem moldados o CPs, o concreto no estado fresco foi submetido ao ensaio de consistência (*Slump Test*). Após realização do ensaio de consistência, foram moldados os CPs. Os ensaios realizados no CPs foram de absorção de água por imersão aos 14 dias, e de resistência à compressão aos 28 dias de moldados.

3.2.1. Definição dos materiais e cálculo do traço de referência

A escolha dos materiais usados adotou os seguintes critérios: 1. facilidade de aquisição na região do estudo; 2. aspectos geográficos e climáticos da região. Apesar de ser comum o uso de adições e aditivos no traço do concreto, a pesquisa utilizou apenas a composição básica do concreto, à semelhança de Bonato (2014): aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água, possibilitando melhor verificação do comportamento dos concretos com substituição.

O cimento escolhido para compor o traço foi o Cimento Portland Composto CP II Z 32 RS, por ser o cimento encontrado com facilidade no mercado da região, com a característica de resistência a sulfatos, devido ao grande número de cidades litorâneas da região que sofrem com a agressividade da maresia, solo salino e presença de esgotos.

O agregado miúdo escolhido foi a areia grossa, mais adequada para uso em concretos, que é vendido na região normalmente por metro cúbico ou sacos de 25 kg. O agregado graúdo escolhido foi a rocha britada de dimensão máxima ($D_{m\acute{a}x}$) = 9,5 mm, popularmente conhecida como brita 0. A escolha desse tamanho de brita tem relação com as possíveis aplicações pretendidas para o concreto. A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Maceió-AL.

3.2.1.1. Traço de referência em massa e consumo dos materiais

Os parâmetros adotados e calculados para determinação do traço de referência estão descritos de forma resumida na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo dos parâmetros adotados e calculados

Parâmetros adotados e calculados		
Dmax agregado	Mm	9,50
Módulo de finura da areia	--	2,20
Massa espec. areia (pm)	kg/m ³	2673,00
Massa espec. brita (pb)	kg/m ³	2683,00
Massa espec. cimento (pc)	kg/m ³	3100,00
Massa unitária brita (Mu)	kg/m ³	1450,00
Massa específica água (pa)	kg/m ³	1000,00
Slump pretendido	mm	60-80
Resistência característica (Fck)	Mpa	20,00
Resistência média (Fcj)	Mpa	26,60
Resistência do Cimento	Mpa	32,00
Relação água cimento (a/c)	--	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelos cálculos apresentados no Apêndice A, obtiveram-se os valores de consumo de materiais para 1 m³ de concreto, e o traço em massa na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo de materiais e traço de referência em massa

	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)
Consumo dos materiais (Para 1m ³ de concreto)	394,74	857,23	877,25	225
Traço referência em massa	1	2,17	2,22	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios para determinação da massa específica da areia foram realizados conforme o método de Chapman, e, os da massa específica da brita, conforme NBR 16917 (ABNT, 2021). A Figura 15 apresenta de forma resumida, os procedimentos para determinação da massa específica da areia, dividido em: (a) pesagem do material seco; (b) materiais utilizados; (c) leitura no frasco de Chapman.

Figura 15 - Ensaio de massa específica da areia

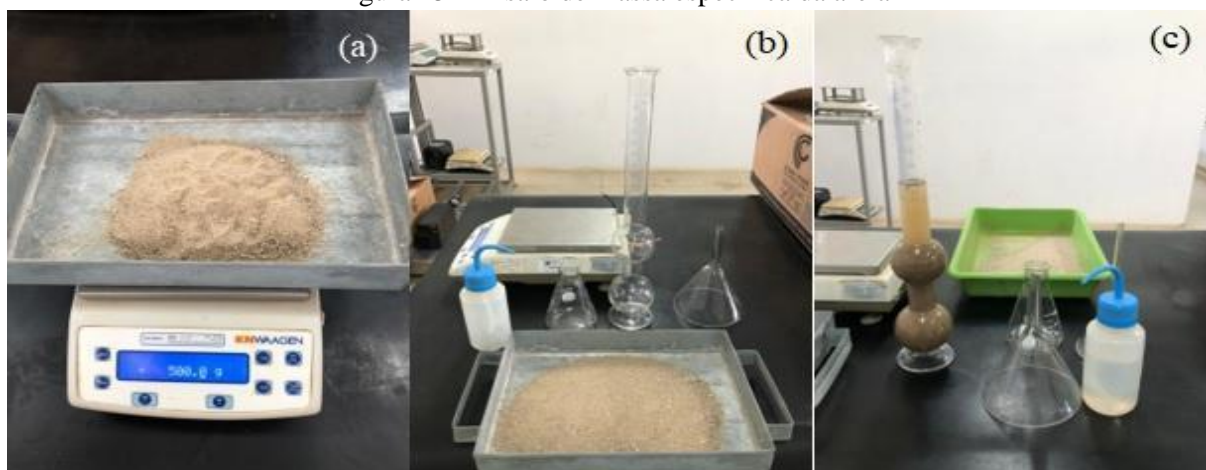


Figura 15(a) - Pesagem do material seco

Figura 15(b) - Materiais utilizados

Figura 15(c) - Leitura no frasco de Chapman

Fonte: Elaborado pelo autor.

No procedimento de determinação da massa específica da areia pelo método de Chapman foram pesados 500 g do agregado miúdo, passante pela peneira 4,75 mm. Posteriormente, foi colocada a areia com auxílio de funil dentro do frasco de Chapman, com 200 mL de água. Após a colocação da areia, foram realizados movimentos circulares na base do frasco, até que não existissem bolhas dentro do recipiente. Concluída essa etapa, foi realizada a leitura da altura de água no frasco. De posse dos valores, substituiu-se o valor na seguinte equação:

$$p_m = m_s / (L - m_a) \quad (1)$$

Na equação (1), temos que: p_m é a massa específica da areia; m_s é a massa seca de areia; L é a leitura feita no frasco de Chapman; m_a é a massa de água colocada no frasco.

O ensaio de massa específica da areia (cf. Figura 15) foi executado no Laboratório de Materiais de Construção do Ifal, Campus Palmeira dos Índios. Para o procedimento foram pesadas 2 amostras de 500 g para repetição do procedimento, conforme descrição da NBR NM 52 (ABNT, 2009). Já o ensaio de massa específica da brita, Figura 16, foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do Ifal, Campus Maceió.

Figura 16 - Ensaio de massa específica da brita



Figura 16(a) - Material submerso por 24h
 Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16(b) - Pesagem do material submerso

Na Figura 16, são apresentadas as etapas descritas: (a) material submerso por 24h; (b) pesagem do material submerso. O procedimento consistiu nas etapas de pesagem do material, em torno de 3 kg. A brita foi lavada em água corrente e, posteriormente, levada para estufa a temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 24h, sendo verificada a massa. Em seguida, o material ficou submerso na água por 24h para saturação; na sequência, procedeu-se à pesagem. De posse dos valores da massa do material seco e da massa do material saturado submerso, a massa específica foi calculada pela seguinte equação:

$$d = m/(m-m_a) \quad (2)$$

Na equação (2), tem-se que: d é a massa específica do agregado (g); m é a massa do agregado seco na estufa (g); e m_a é a massa da amostra submersa (g).

O ensaio de massa específica das cinzas foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais - LEMA, da Universidade Federal de Alagoas - UFAL. O procedimento previsto na NBR 16605 (ABNT, 2017) consiste em: ser pesada a massa do material, ser preenchido o frasco com líquido não reagente até a marcação indicada, após isso ser colocado o frasco parcialmente submerso em água por pelo menos 30 min para termorregulação da temperatura, em seguida

ser verificado o nível do líquido no frasco e colocar o material com auxílio de um funil, depois são feitos movimentos circulares no frasco para retirada de todas as bolhas, novamente o frasco foi colocado parcialmente submerso em água por 30 min, e feita a leitura da altura do líquido no frasco. De posse dos dados, usou-se a equação:

$$pcz = M_{cinza} / (L_f - L_i) \quad (3)$$

Na equação (3), tem-se que: pcz é a massa específica da cinza; M_{cinza} é a massa de cinza; L_f é a leitura final no frasco Le Chatelier; L_i é a leitura inicial do frasco Le Chatelier. Foram ensaiados os 2 tipos de cinzas produzidas no estudo. A Figura 17 ilustra algumas das etapas do procedimento descrito, sendo: Figura 17(a) a Pesagem do Material; Figura 17(b) o Preenchimento do frasco de Le Chatelier com querosene; Figura 17(c) a leitura do resultado.

Figura 17 – Ensaio de massa específica das cinzas

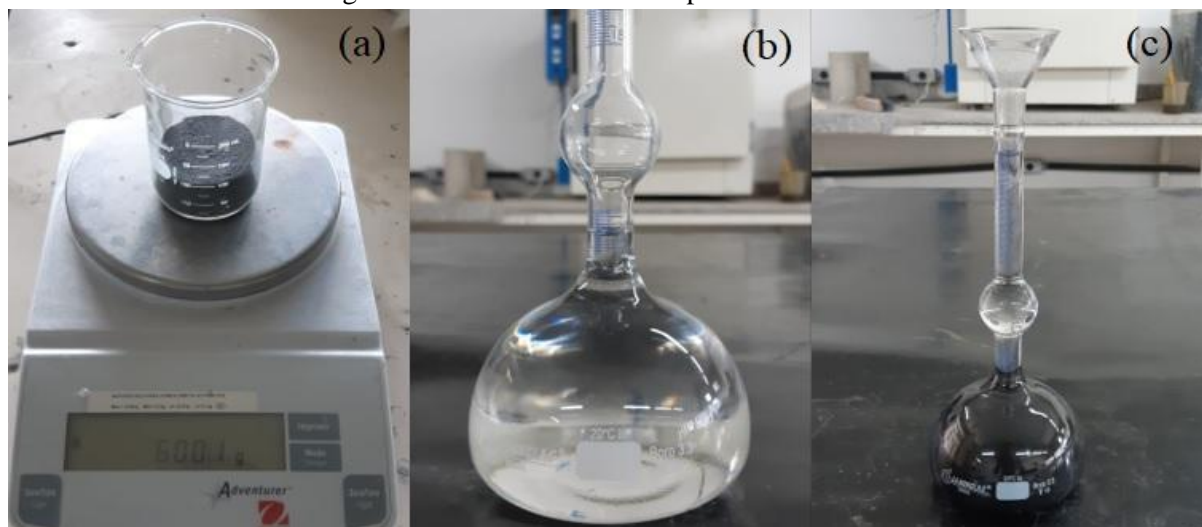


Figura 17(a) - Pesagem do Material

Figura 17(b) - Preenchimento do frasco de Le Chatelier com querosene

Figura 17(c) - Frasco com a cinza produzida para leitura do resultado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a realização dos ensaios descritos na caracterização dos materiais que foram utilizados na composição do concreto, na subseção seguinte serão apresentados os ensaios tecnológicos executados na pesquisa.

3.3. Ensaio tecnológicos no concreto

3.3.1. Confeção dos concretos, tratamentos e quantidades de CPs

Antes de serem demonstrados os ensaios tecnológicos propostos, serão apresentados dados referentes à confecção dos concretos, tratamentos e quantidades de CPs produzidos. A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi executada manualmente, por serem apenas 4 CPs produzidos para cada tratamento proposto. Os ensaios de absorção de água por imersão e de resistência à compressão foram executados em corpos de prova de concreto de formato cilíndricos de 10 cm x 20 cm, e moldados conforme critérios estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015).

A quantidade de CPs produzidos e tratamentos propostos são apresentados na Tabela 4. Devido às limitações de acesso aos laboratórios causadas pela pandemia da COVID-19, os CPs produzidos foram aplicados no ensaio de absorção de água aos 14 dias; e, na sequência, foram rompidos para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova e tratamentos propostos

TOTAL (parcelas) = 28 CPs	Variáveis		
Tratamentos	Resistência à compressão	Absorção de água	Trabalhabilidade (<i>Slump test</i>)
Tratamento 1 (0% de cinzas)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 2 (3% de CFC-LAB)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 3 (5% de CFC-LAB)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 4 (7% de CFC-LAB)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 5 (3% de CFC-LIV)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 6 (5% de CFC-LIV)	4		Concreto em estado fresco
Tratamento 7 (7% de CFC-LIV)	4		Concreto em estado fresco
Total	28		-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram 7 tratamentos ao todo, considerando o traço de referência, substituições de 3%, 5% e 7% em massa de cimento por CFC-LAB, e substituição de 3%, 5% e 7%, em massa de cimento por CFC-LIV, conforme parâmetros adotados no estudo desenvolvido por Bonato (2014).

Apesar das duas cinzas produzidas terem valores de massa específica diferentes, aparentemente não seria favorável a substituição em massa para a cinza de menor densidade; todavia, para padronizar os critérios adotados para as duas cinzas, e comparação entre resultados, foi adotada a substituição em massa. Em cada tratamento, foram confeccionadas 4 amostras, para a realização dos ensaios de consistência do concreto (*Slump Test*), absorção de água e resistência à compressão.

3.3.1. Consistência do concreto no estado fresco por abatimento de tronco de cone (*Slump Test*)

O ensaio do abatimento do concreto, também conhecido como *Slump Test*, foi realizado para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, buscando medir sua consistência. A trabalhabilidade é considerada a propriedade mais importante do concreto no estado fresco, e o abatimento pretendido no ensaio depende das características da obra e dos métodos adotados para o transporte, lançamento e adensamento do concreto (SOBRAL, 2000).

O ensaio de consistência foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do Ifal, Campus Maceió, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado em todos os tratamentos propostos na pesquisa, visando observar a influência da substituição parcial do cimento por cinzas nos percentuais definidos.

3.3.2. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão, consiste em verificar o percentual retido de água após imersão do CP por determinado tempo. A absorção de água é uma das principais variáveis que controlam os processos de degradação no concreto, sendo considerado aspecto importante que pode influenciar outras propriedades, incluindo a resistência à compressão (MEDEIROS JÚNIOR *et al.*, 2019).

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do Ifal, Campus Maceió, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 9778

(ABNT, 2005), no intuito de verificar se a incorporação das cinzas no traço do concreto teve influência na absorção de água.

O ensaio foi realizado em 4 corpos de prova por traço proposto. Após 14 dias submersos, os corpos de prova foram retirados da água e pesados. Depois foram colocados na estufa por 24h e posteriormente pesados. Retornaram para a estufa por mais 24h e novamente pesados. Como a variação de massa foi inferior aos limites previstos na norma, não foi necessário ficarem por mais 24h na estufa, sendo colocados novamente no tanque da cura, após o ensaio de absorção, até completarem 28 dias para ensaio de resistência à compressão.

3.3.3. Resistência à compressão

A resistência à compressão é o esforço resistido pelo concreto, estimado pela ruptura de CPs em prensas especiais. O ensaio de resistência à compressão foi realizado no laboratório de Materiais de Construção do Ifal, Campus Maceió, na prensa elétrica da marca Forttest, modelo FT 01, N/S 0173, com capacidade de 200 tf, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2018). A Figura 18, a seguir, apresenta parte dos CPs moldados e, posteriormente, colocados no tanque de cura, após 24h de moldagem.

Figura 18 – CPs moldados e submersos no tanque de cura

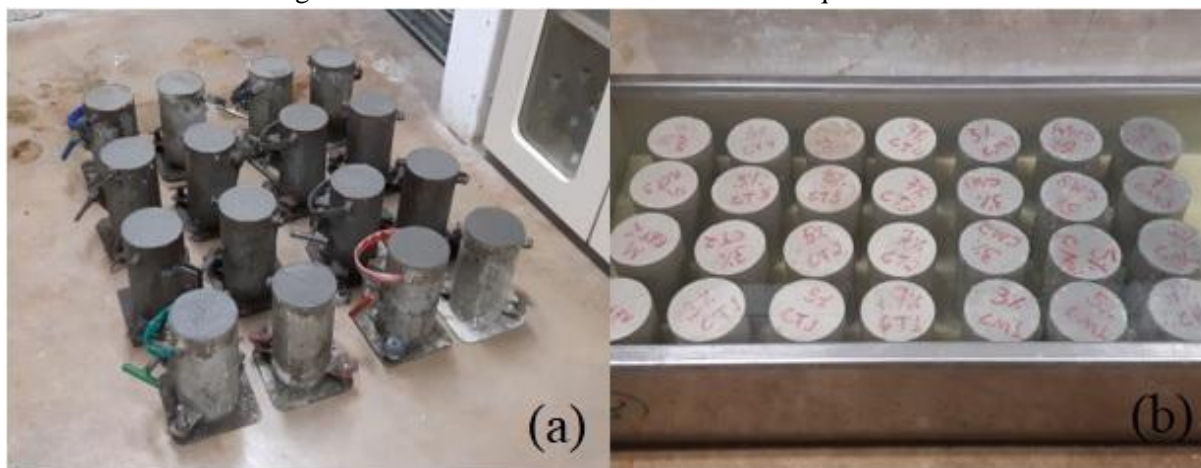


Figura 18(a) - Parte dos CPs moldados

Figura 18(b) - CPs submersos no tanque de cura

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio foi realizado em 4 CPs por tratamento e com idade de rompimento de 28 dias. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submetidos à cura úmida no tanque de cura por 27 dias, até o dia do ensaio de resistência à compressão. A técnica utilizada para nivelamento das faces dos CPs foi o neoprene.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios serão apresentados por meio de tabelas e gráficos, juntamente com as discussões e análises correspondentes a cada ensaio. Antes de iniciar-se a apresentação dos resultados dos ensaios físicos e químicos para discussão, será apresentado na Figura 19, o aspecto visual das cinzas produzidas, contextualizando a razão das diferenças de coloração e massa específica.

Figura 19 - Cinzas produzidas com e sem controle de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Figura 19, verifica-se do lado esquerdo a CFC-LAB a 400°C por 1 hora, que apresenta coloração mais escura, tendendo ao preto. Do lado direito da Figura 19, tem-se a CFC-LIV produzida por fogo, sem controle de tempo e temperatura, que apresenta coloração acinzentada. Outro aspecto perceptível foi a diferença de volume dos materiais nos recipientes, apesar de ter a mesma massa de material armazenado.

As CFC-LAB passam pelo processo químico chamado pirólise, onde as cascas do coco foram submetidas a reação endotérmica, que promoveu degradação térmica pela elevação da temperatura. Como a câmara do forno constitui-se ambiente fechado, e as fibras são acondicionadas em recipientes metálicos com tampa, não existe abundância de oxigênio no processo. As fibras sofreram reorganização a nível molecular e de reações químicas complexas; contudo, pela temperatura adotada, pode-se afirmar que a cinza resultante do processo consiste

em material rico em Carbono (C), conforme apresentação dos resultados, pois não houve degradação completa do material, o que explica a coloração escura da cinza (SCHENA, 2015).

O material resultante ainda tem característica combustível, visto que em uma das amostras, quando retirada da Mufla, não sendo esperado o resfriamento completo para retirada da tampa do recipiente, permitiu-se a entrada de oxigênio, fazendo o material entrar em combustão espontânea, pelo fechamento do triângulo do fogo, formado por material combustível, oxigênio e calor (FLORES, 2016).

Outro aspecto percebido foi a menor densidade da CFC-LAB em relação à CFC-LIV. Isso acontece porque o C, que foi o elemento químico mais relevante identificado pelo DRX nas cinzas produzidas no forno Mufla, é um elemento químico mais leve, se comparado com os elementos resultantes do processo ao qual foi submetida a outra cinza, formada, predominantemente, por KCl e SiO₂ (ROCHA; CHAGAS, 2011).

As CFC-LIV passam pelo processo químico chamado combustão, em que as cascas do coco foram submetidas à reação exotérmica, que promoveu praticamente a degradação total do material. Nesse tipo de reação química, pela presença ilimitada de oxigênio, o fogo promoveu a queima até o material resultante não ser mais combustível. Com a existência de intenso calor, ocorre a liberação de CO₂ e água na atmosfera, sendo o material residual formado basicamente de óxidos e minerais.

4.1. Caracterização físico-química das cinzas produzidas

4.1.1. Análise Granulométrica

As distribuições granulométricas médias das cinzas produzidas por combustão e por degradação térmica na Mufla são apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6, a seguir.

Tabela 5 - Distribuição granulométrica da CFC-LIV

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa ret. acum. (g)	% Retida	% Ret. acumulada	% P passa
0,600	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,300	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,150	98,2	98,2	32,76%	32,76%	67,24%
0,075	96,6	194,7	32,23%	64,99%	35,01%
fundo	104,9	299,6	35,01%	100,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando-se a Tabela 5, verifica-se que as partículas das cinzas ficam retidas a apenas a partir da peneira 0,15 mm, ficando retido 32,76% das cinzas na peneira 0,15 mm; na peneira 0,075 mm, ficaram retidas 32,23%; e, passando para o fundo do conjunto de peneiras o percentual de 35,01%. Na Tabela 6, observa-se que 100% do material passa pela peneira 0,3 mm, sendo retido 32,98% na peneira 0,15 mm; na peneira 0,075 mm, ficaram retidas 25,96% das cinzas; e, passaram para o fundo do conjunto de peneiras o montante de 41,05%.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica da CFC-LAB

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa ret. Acum. (g)	% Retida	% Ret. acumulada	% P passa
0,600	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,300	0	0	0,00%	0,00%	100,00%
0,150	98,7	98,7	32,98%	32,98%	67,02%
0,075	77,7	176,4	25,96%	58,95%	41,05%
fundo	122,9	299,3	41,05%	100,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Matos e Guimarães (2017) e NBR 12653 (ABNT, 2014), o efeito fíler está diretamente relacionado à finura do material, e, definiram como parâmetro quantitativo para verificação da finura, que o material deve passar mais de 65% pela peneira de 0,045 mm. Nas análises granulométricas apresentadas na Tabela 5 e Tabela 6, observou-se que apenas 35,01% e 41,05% passaram pela peneira 0,075 mm; logo, pelos critérios descritos acima, as cinzas não irão promover efeito fíler na mistura.

Observando os percentuais retidos acumulados das peneiras da série normal, excluindo a peneira 0,075 mm, constatou-se que o módulo de finura das duas cinzas produzidas mostra-se semelhante; e, considerando 2 casas decimais no arredondamento, o módulo de finura para os dois tipos de cinzas fica igual, sendo de 0,33.

4.1.2. Massa específica das cinzas

Quanto aos resultados das massas específicas das cinzas, obteve-se que:

- Para a CFC-LAB, a massa adotada foi de 25 g, e a leitura feita no frasco de Le Chatelier foi de 20,8, chegando ao resultado de massa específica de 1,2 g/cm³;
- Para a CFC-LIV a massa adotada foi de 50 g, e a leitura no frasco de Le Chatelier foi de 23,8, chegando ao resultado de massa específica de 2,1 g/cm³.

O valor de massa específica da CFC-LIV foi semelhante aos valores encontrados nas cinzas produzidas no estudo de Bonato (2014): massa específica de 2,27 g/cm³; e na pesquisa de Matos e Guimarães (2017): massa específica de 2,22 g/cm³. A massa específica da CFC-LAB foi muito abaixo dos valores das cinzas utilizadas nos estudos acima citados, sendo semelhante a massa específica da própria fibra em estado natural, estimada por Bonato (2014) em 1,27 g/cm³.

4.1.3. Fluorescência de Raios X

Os dados referentes à composição química das cinzas geradas a partir da queima das cascas do coco no terreno, sem controle de temperatura estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química da CFC-LIV

Fórmula Composta	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	ZnO	CuO
Concentração (%)	37,77	34,04	11,67	4,58	3,71	2,95	1,99	1,44	0,67	0,57

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 demonstra a predominância nas cinzas geradas por queima induzida no terreno sem controle de temperatura dos componentes químicos: Óxido de cálcio, com 37,77%; Óxido de ferro, com 34,04% e Dióxido de silício, com 11,67%. Outros componentes químicos que se destacam são: Óxido sulfúrico, com 4,58%; Óxido de magnésio, com 3,71% e o Óxido de potássio, com 2,95%. Segundo estudos desenvolvidos por Mehta e Monteiro (2014), os óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃ estão entre os principais componentes químicos da composição do cimento, sendo o elemento de maior concentração, o CaO, o que aponta fator positivo nas reações entre as cinzas e o cimento no concreto.

Quando comparado com o resultado encontrado por Bonato (2014), a cinza produzida apresentou no ensaio de FRX composição química bastante diferente do resultado encontrado nessa pesquisa, pois os componentes químicos mais abundantes identificados na pesquisa de Bonato (2014) foram: Óxido de potássio (29,3%), Cloro (16%), Óxido de sódio (6,1%), Dióxido de silício (5,2%) e Óxido de Cálcio (4,4%).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), dentre as exigências para o material ser considerado pozolânico é que a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser de, no mínimo, 50%. Nessa pesquisa, o valor obtido foi de 47,7%, o que fez a cinza chegar próximo

ao teor de material pozolânico, referente a este requisito. Outro requisito previsto na norma é que a quantidade máxima de SO_3 , o qual pode provocar expansão nas primeiras horas de hidratação do Cimento Portland pela formação de etringita, deve ficar abaixo dos 5%, e na pesquisa em tela ficou em 4,58%.

Quanto às CFC-LAB, na Tabela 8, são apresentados os elementos químicos observados e seus respectivos percentuais, para os tempos de 1h, 2h e 4h na Mufla a 400°C.

Tabela 8 - Elementos químicos presentes na CFC-LAB

Elementos Químicos	Tempo de degradação térmica em Mufla		
	1 hora	2 horas	4 horas
	Quantidade do elemento (%)		
K	45,05%	44,87%	40,16%
Cl	32,88%	27,77%	30,58%
Ca	6,59%	11,47%	8,33%
Si	5,40%	4,40%	9,07%
Na	3,18%	3,87%	4,06%
Fe	2,19%	2,68%	2,42%
S	1,05%	0,66%	0,79%
Al	0,99%	1,17%	1,75%
Ti	0,92%	0,93%	0,99%
Mg	0,73%	0,78%	1,04%
P	0,56%	0,55%	0,71%
Zr	0,24%	0,00%	0,00%
Br	0,22%	0,23%	0,12%
Sr	0,00%	0,24%	0,00%
Cr	0,00%	0,16%	0,00%
Y	0,00%	0,14%	0,00%
Zn	0,00%	0,08%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 8, percebe-se que os principais elementos químicos das cinzas são praticamente os mesmos, independentemente do tempo de degradação. Alguns elementos apresentaram tendência de diminuição do percentual quanto maior o tempo de permanência no forno Mufla, como foi o caso do Potássio (K), elemento químico mais abundante nas 3 cinzas, tendo na cinza produzida com 1h, 45,08% de K; para o tempo de 2h, apresentou 44,87%; e, para o tempo de 4h de degradação apresentou 40,16% de K.

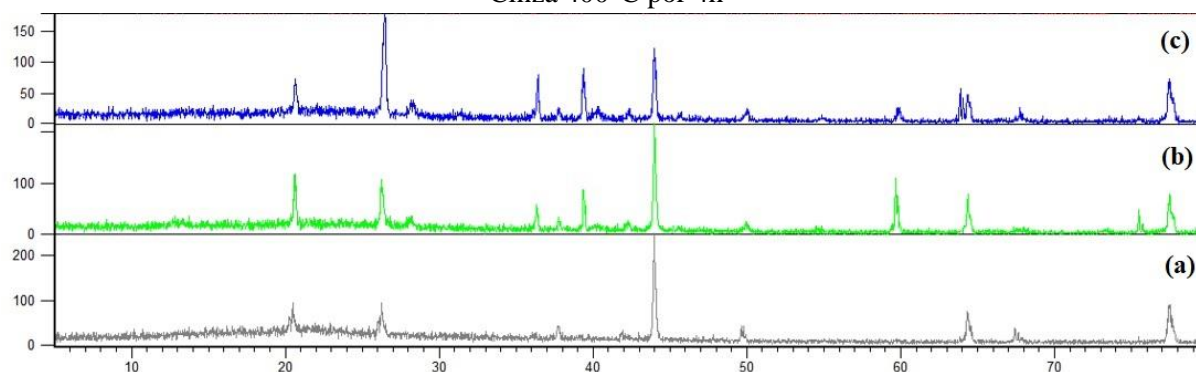
Outros elementos não adotaram padrão de aumento ou diminuição com a variação do tempo de degradação, por exemplo, o Cloro (Cl), Cálcio (Ca), Silício (Si) e Ferro (Fe). Outros elementos apresentam tendência de maior percentual com o aumento do tempo de degradação,

como foi o caso do Sódio (Na), Alumínio (Al), Titânio (Ti). A amostra de cinza produzida com 2h de degradação apresentou elementos químicos com baixos percentuais, não identificados nas outras cinzas produzidas, como exemplo: o Estrôncio (Sr), Crômio (Cr), Ítrio (Y) e Zinco (Zn).

4.1.4. Difração de Raios X

Apresenta-se a análise de difração de raios X de forma fracionada pelos tipos de cinzas produzidas, e posteriormente a análise conjunta. A Figura 20, demonstra os gráficos gerados no ensaio, para as CFC-LAB, nos tempos de permanência definidos. A parte (a) da figura apresenta o gráfico da cinza gerada com 1h, a parte (b) da figura a cinza produzida com 2h, e a parte (c) da figura a cinza produzida com 4h de permanência do forno Mufla.

Figura 20 - Gráfico de DRX das CFC-LAB. (a) – Cinza 400°C por 1h; (b) – Cinza 400°C por 2h; (c) – Cinza 400°C por 4h



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 20, que os gráficos das cinzas produzidas apresentam algumas semelhanças relacionadas ao posicionamento dos picos identificados, contudo, percebe-se uma variação de intensidade dos picos, associado a variação do tempo de permanência da amostra no forno Mufla. A Tabela 9 demonstra os compostos químicos identificados nas cinzas produzidas.

Tabela 9 - Compostos químicos e concentração identificados nas CFC-LAB

Nome do composto	Fórmula química	Cinza - 1h (%)	Cinza - 2h (%)	Cinza - 4h (%)
Nitrato de potássio	KNO ₃	14	51	16
Cloreto de potássio	KClO ₃	6	7	5
Fosfato de Alumínio	AlPO ₄	15	6	31
Tridimita baixa	SiO ₂	14	12	4
Grafite	C	10	2	0
Quartzo - α	SiO ₂	42	22	44
Associados a fertilizantes		35	64	52

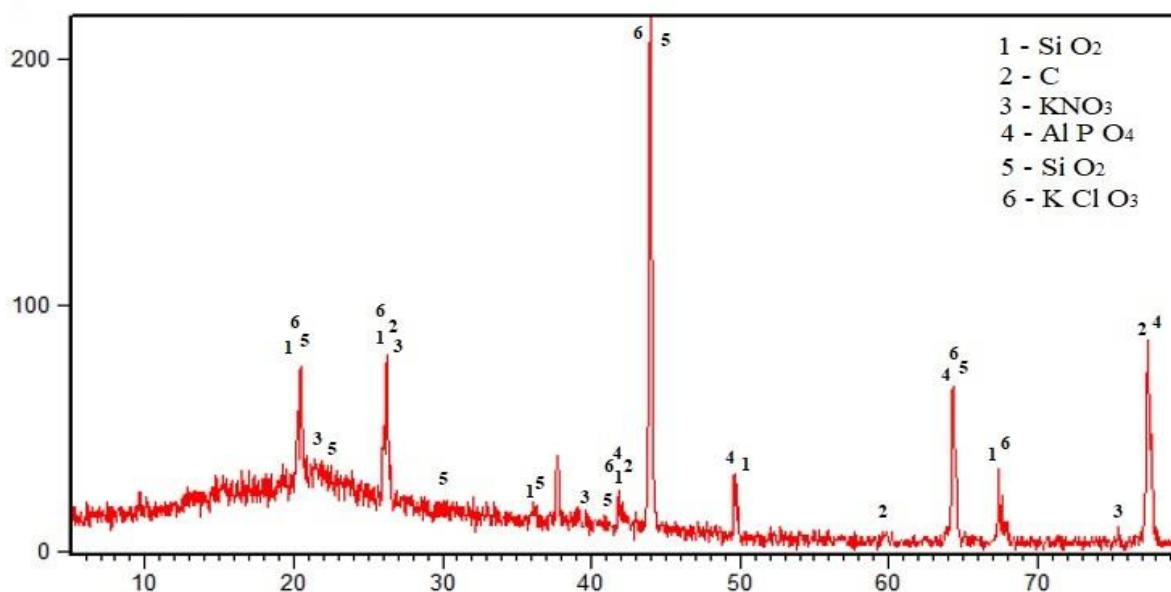
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 9, percebe-se a presença dos mesmos compostos químicos nas cinzas, com uma variação na concentração do composto dependendo do tempo de permanência no forno Mufla, contudo, no caso do mineral grafite, percebe-se que o maior tempo de permanência no forno proporcionou redução desse composto químico, sendo totalmente volatilizado no tempo de 4h na Mufla. No tempo de 1h no forno, a concentração de grafite foi de 10%.

Uma das razões que podem explicar o padrão inconstante de alguns elementos químicos ao longo da variação de tempo no forno Mufla, verificado no ensaio de FRX, foi melhor compreendido pela análise de DRX. Uma das técnicas de análise semiquantitativa por DRX é a observação dos compostos associados a fertilizantes. Na Tabela 9 observa-se que existe variação de concentração de produtos associados a fertilizantes (KNO₃, KClO₃, AlPO₄), onde, para tempo de permanência no forno por 1 h atinge o percentual de 35%, para tempo de permanência de 2 h o percentual de 65%, e quando o tempo de permanência no forno foi de 4h o percentual diminui chegando a 52%. Pode-se inferir que ocorre a volatilização desses compostos com o aumento da concentração de SiO₂.

Uma das formas de análise das concentrações por DRX é a verificação da concentração de produtos associados a fertilizantes, logo, devido a essa volatilização dos produtos associados a fertilizantes ao longo do tempo da cinza na Mufla, modificou-se a concentração de outros elementos químicos na amostra. A Figura 21 destaca os picos os compostos químicos identificados na cinza produzida a 400°C, com tempo de permanência no forno de 1h, que foi o tempo de produção das cinzas definido para substituição nos traços de concreto.

Figura 21 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 1h



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 21, que seis compostos químicos foram identificados. Em alguns picos verifica-se a presença de mais de um composto químico, sendo o pico de maior intensidade observado a presença de Cloreto de Potássio (KClO_3) e Tridimita baixa (SiO_2). Os compostos químicos denominados 1 e 5, descritos na Figura 21, são referentes ao quartzo em duas fases distintas: quartzo alfa obtido em temperaturas de até 570°C , e Tridimita, fase do quartzo que ocorre na temperatura de 870°C .

Quanto ao mineral Grafite (C), composto base para formação do grafeno, existem estudos que buscaram utilizar o grafite para reforçar outros materiais, como a pesquisa desenvolvida por Zhou *et al.* (2019), em que foi utilizado o grafite para reforçar materiais a base de celulose, formando o compósito grafite-nanocelulose, onde se obteve como resultado material mais resistente que o aço e o titânio.

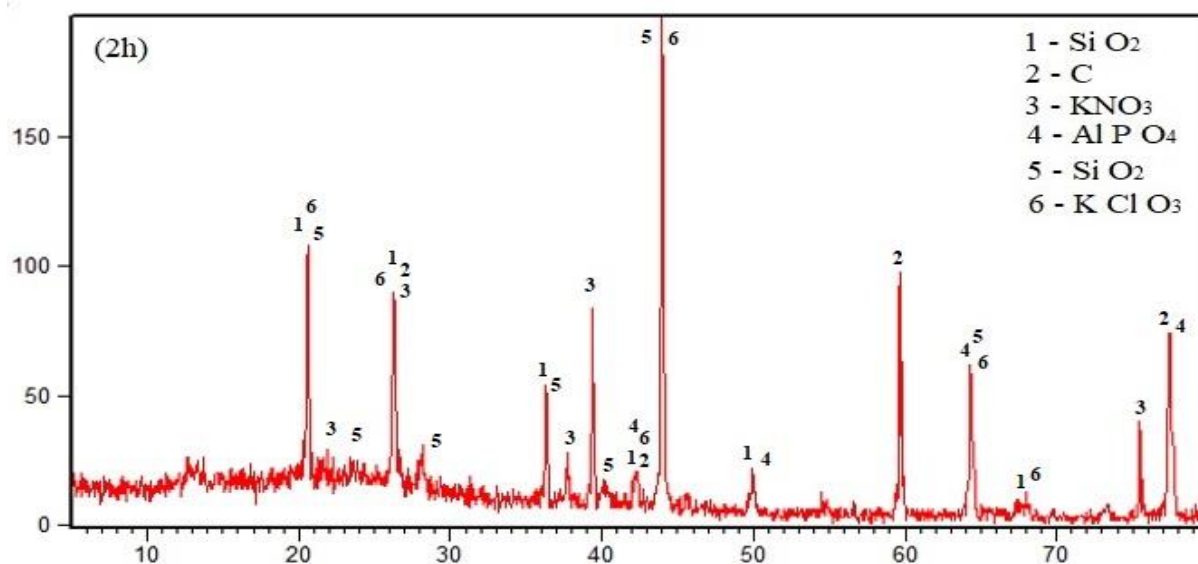
Na pesquisa desenvolvida por Severo (2020), buscou-se produzir e caracterizar a cinza obtida a partir de serragem de madeira. Foram testadas a produção de cinza no forno Mufla nas temperaturas de 300°C , 400°C e 500°C , por 4 tempos distintos de permanência no forno, chegando-se à conclusão de que a combinação de temperatura a 400°C , com tempo de permanência de 1h, foi onde se obteve o maior percentual de grafite na cinza residual.

Apesar da motivação inicial da pesquisa em tela, não ter a intenção de produzir cinza com presença de grafite, a análise por DRX revelou a existência desse composto químico, possibilitando a análise mais abrangente das possibilidades de aplicação da cinza produzida. Com a adoção da temperatura em 400°C , e tempo de permanência no forno definido em 1h para

produção da CFC-LAB, pode-se afirmar que os concretos produzidos tiveram adição de grafite alternativo em sua composição.

Quanto à CFC-LAB, com tempo de permanência no forno de 2h, a Figura 22 apresenta o gráfico com os picos e compostos químicos identificados.

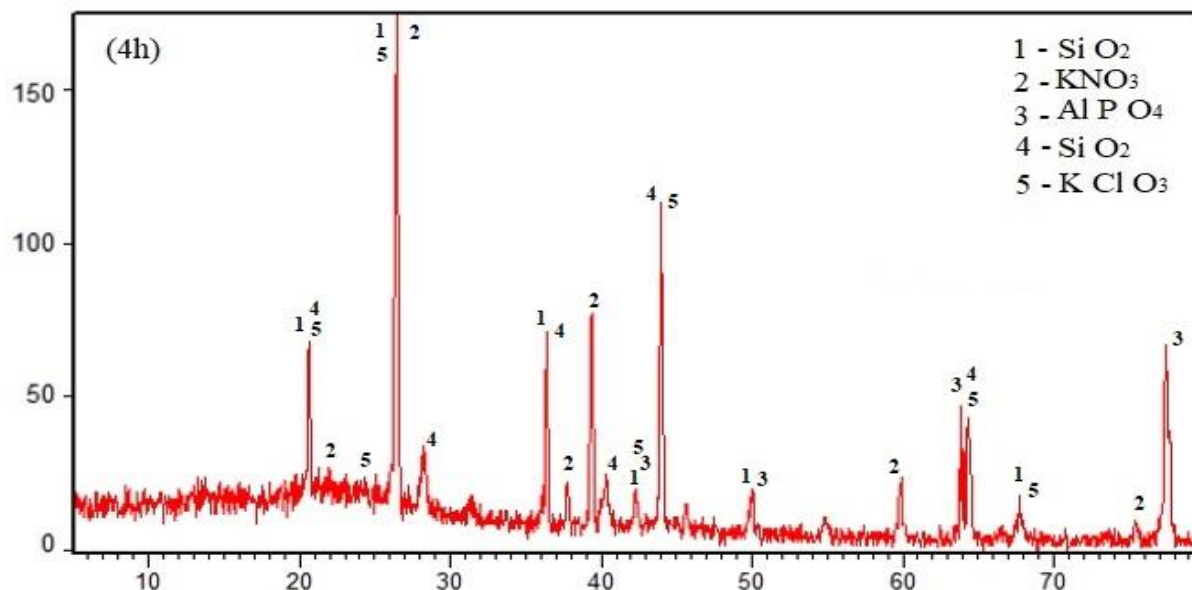
Figura 22 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 2h



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 22 percebe-se a identificação de seis compostos químicos, os mesmos presentes na CFC-LAB com 1h de permanência na Mufla, contudo, pode-se verificar a modificação dos picos, sendo verificado a maior somatório de compostos associados a fertilizantes, sendo eles: Nitrato de potássio (KNO₃), Cloreto de potássio (KClO₃) e Fosfato de Alumínio (AlPO₄). Na Figura 23, será apresentado o gráfico gerado para a CFC-LAB com 4h de permanência no forno.

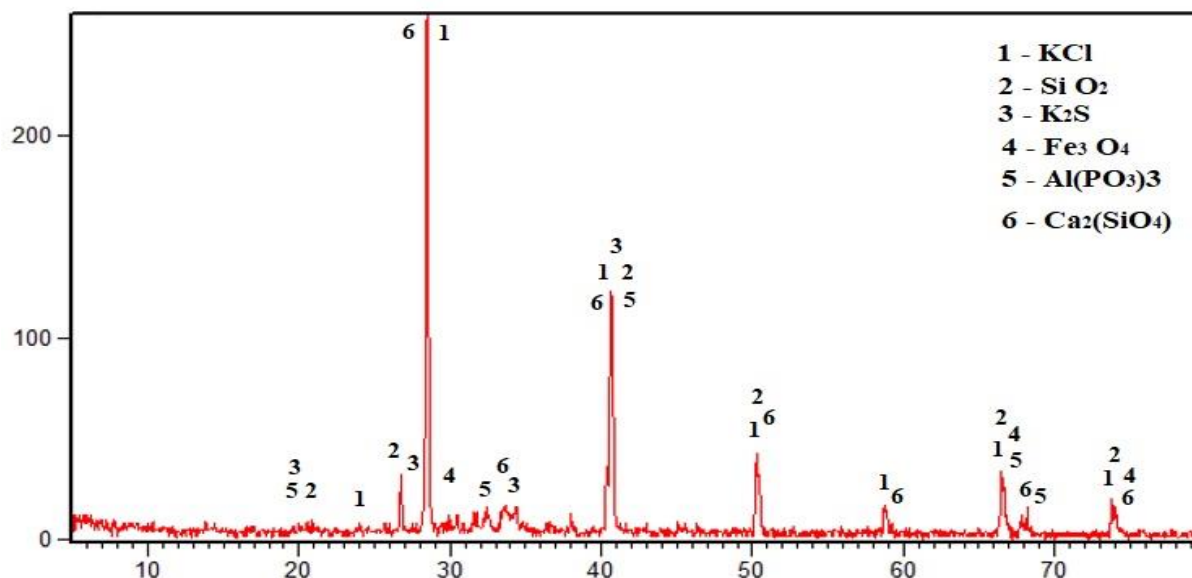
Figura 23 - Gráfico DRX da CFC-LAB – 4h



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 23 é apresentado os cinco compostos químicos identificados na cinza. Ressalta-se a diferença relevante da CFC-LAB com tempo de 4h, para as CFC-LAB com tempo de permanência de 1h e 2h na Mufla, a total ausência do mineral grafite. Houve também diminuição do somatório de compostos associados a fertilizantes, quando comparado com a CFC-LAB com permanência de 2h no forno Mufla. Em relação à cinza produzida pelo processo de queima por combustão ao ar livre, sem controle de tempo e temperatura de queima, o ensaio de DRX apresentou a gráfico da Figura 24.

Figura 24 - DRX da CFC-LIV



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se a partir da Figura 24, a presença de seis compostos químicos identificados na cinza. Em alguns picos verifica-se a presença de mais de um composto. No pico de maior intensidade foi verificado a presença de Cloreto de Potássio (KCl), de Belita e Silicato de Cálcio ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$). Segundo Centurione (1999), o início da formação da Belita ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$) ocorre em temperaturas entre 700°C e 900°C . Apesar da queima dessa cinza ter ocorrido sem controle de temperatura, pela formação do composto químico Belita, parte do SiO_2 reage com o CaO disponível para sintetizar esse silicato de cálcio de baixa temperatura, e, pela análise curva termogravimétrica (TG) da cinza, verifica-se que a temperatura aproximada da produção da cinza foi acima de 800°C .

A formação da fase belita (de abreviação C₂S), quando hidratado, forma C-S-H, resultou em ajuda na elevação da resistência mecânica dos concretos produzidos com a CFC-LIV. A Tabela 10, apresenta análise semiquantitativa dos compostos químicos presentes na CFC-LIV, sem controle de temperatura de queima.

Tabela 10 - Compostos químicos identificados por DRX na CFC-LIV

Nome do composto	Fórmula química	Semi quant. (%)
Cloreto de Potássio	KCl	28
Quartzo	SiO_2	26
Silicato de cálcio	$\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$	21
Fosfato de Alumínio	$\text{Al}(\text{PO}_3)_3$	11
Sulfeto de potássio	K_2S	7
Magnetita	Fe_3O_4	7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 10, observa-se que como compostos químicos mais abundantes na cinza o KCl com 28%, em seguida temos o SiO_2 com 26%, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ com 21%, e os compostos menos abundantes, temos: Fosfato de Alumínio $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ com 11%, Sulfeto de potássio (K_2S) com 7% e Magnetita (Fe_3O_4).

Os compostos químicos das cinzas produzidas por Bonato (2014) apresentam picos de difração do sal de cloreto de potássio com maior intensidade, da mesma forma que as cinzas produzidas por combustão dessa pesquisa e, em menor escala, picos de outras fases químicas minerais de óxidos de silício (SiO_2) e o óxido de manganês (MgO), sendo esse último não observado nesta pesquisa. Bonato (2014) também registrou que esses picos não apresentam halo amorfo e que são característicos de amostra cristalina; portanto, de baixa reatividade pozolânica.

Por fim, pelos gráficos e tabelas apresentados nas análises de DRX, percebe-se diferença significativa entre as cinzas produzidas pelo processo de degradação térmica no forno Mufla a 400°C, e a cinza produzida por combustão ao ar livre. Ainda que as cinzas tenham sido produzidas a partir da mesma fibra vegetal (casca do coco), verificou-se que a diferença do processo térmico a que foram submetidas, fizeram os compostos químicos resultantes nas cinzas serem completamente distintos.

4.1.5. Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

No estudo, foram geradas 30 micrografias, 5 imagens de cada situação descrita na metodologia. A Figura 25 apresenta o resumo dessas imagens geradas, sendo a parte (a) da Figura 25 a fibra natural com magnificação de 500x; a parte (b) da Figura 225 a cinza gerada por queima convencional com magnificação de 500x; e, a parte (c) da Figura 225 a cinza gerada por degradação térmica em forno mufla a 400°C por 4h com magnificação de 500x.

Figura 25 – Micrografias com aumento de 500x

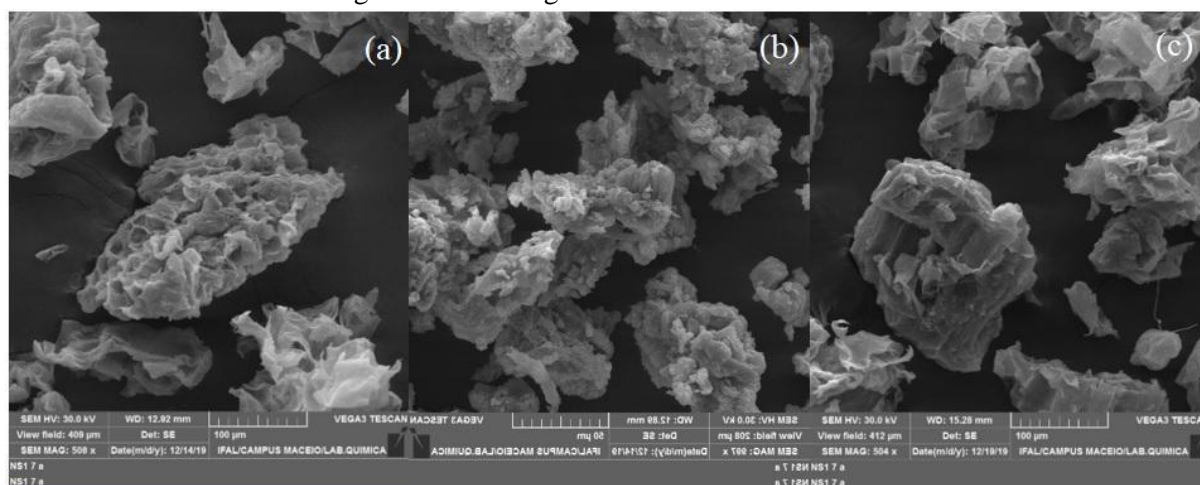


Figura 25(a) - Fibra natural

Figura 25 (b) – CFC-LIV

Figura 25 (c) – CFC-LAB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando as imagens da Figura 25, foi possível perceber as características da superfície dos grãos, que apresenta morfologia porosa, reforçando o motivo da menor densidade das cinzas, quando comparado com os agregados e cimento, constatando que a estrutura da superfície do material mantém-se bastante semelhante tanto nas fibras em estado natural, como nas cinzas produzidas pela queima por combustão e degradação térmica controlada. No estudo realizado por Moura (2014), também foi observada a porosidade e a rugosidade da superfície

do material, sendo destacado que a morfologia superficial do material está diretamente relacionada às capacidades de adesão e homogeneização com a matriz polimérica.

4.2. Ensaios Tecnológicos do Concreto

4.2.1. Ensaio de Consistência - *Slump Test*

Considerando os traços previstos no estudo, foi realizado ensaio de consistência do concreto, antes de serem moldados os CPs. O traço de referência alcançou o *Slump* pretendido no cálculo, ficando entre 60 mm e 80 mm de abatimento de tronco de cone. Foi observado que, quanto maior o percentual de substituição do cimento por cinza, menor o abatimento do concreto, principalmente com a substituição da CFC-LAB. A Figura 26 demonstra a diferença de abatimento do tronco de cone entre o concreto de referência e o concreto com 7% de substituição de cimento por CFC-LAB.

Figura 26 – Abatimento do tronco de cone do traço de referência e traço com adição de cinzas



Figura 26(a) - Abatimento tronco de cone traço de referência

Figura 26(b) - Abatimento do tronco de cone traço com substituição de 7% de cimento por cinza

Fonte: Elaborado pelo autor.

Um dos motivos que provocam a diminuição da trabalhabilidade está associado à diferença de massa específica entre os materiais. Como a substituição feita foi em massa, e a massa específica da CFC-LAB é cerca de 38% da massa específica do cimento, a quantidade de material incorporado nessa substituição têm maior volume, o que gera maior demanda por água. Como a quantidade de água não foi modificada, provocou o menor abatimento do concreto.

No estudo desenvolvido por Matos e Guimarães (2017), foi utilizado aditivo superplastificante de forma diretamente proporcional ao aumento da substituição do cimento por cinzas, para compensar a perda de trabalhabilidade da mistura, sem alterar na relação água/cimento. No estudo em tela a intenção era produzir os concretos sem utilizar nenhum aditivo, visando favorecer a comparação entre os dois tipos de cinzas produzidas e o traço de referência. A Figura 27, a seguir, demonstra a diferença volumétrica entre a mesma massa de cimento e cinzas, que foram utilizados no traço com substituição de 7%.

Figura 27 – Pesagem comparativa do cimento e da cinza produzida no forno Mufla



Figura 27(a) - Volume de 179g de cimento

Figura 27(b) - Volume de 179g de cinza produzida na Mufla

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso dos concretos com utilização das CFC-LIV, a perda de trabalhabilidade do concreto foi menor, quando comparada com a CFC-LAB, conforme apresentado na Tabela 11. A diferença entre a massa específica do cimento e a CFC-LIV é menor, o que favoreceu a substituição em massa dos materiais.

Tabela 11 - Abatimento do tronco de cone - *Slump Test*

<i>Slump test</i>	
Traço	Abatimento de tronco de cone (mm)
Traço de referência	60
CFC-LIV (3%)	60
CFC-LIV (5%)	55
CFC-LIV (7%)	45
CFC-LAB (3%)	10
CFC-LAB (5%)	5
CFC-LAB (7%)	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar, a partir da Tabela 11, que as CFC-LIV interferem menos na consistência do concreto, tendo diferença de 25% no abatimento do tronco de cone quando a substituição foi de 7% em relação ao traço de referência. Bonato (2014) teve como referência *Slump* de 30 mm e não constatou variações relevantes na consistência com a incorporação das cinzas.

4.2.2. Absorção de água por imersão

A partir dos registros de massa dos CPs foram gerados os dados apresentados na Tabela 12, onde são apresentados valores de massa antes e após secagem e absorção de água.

A Tabela 12 demonstra que existiu um aumento na absorção de água dos CPs diretamente associado ao aumento da substituição do cimento por cinzas no concreto. A variação de absorção nos traços que utilizaram as CFC-LIV foi de 5,85% a 7,56%, sendo os valores similares aos encontrados no estudo feito por Bonato (2014).

Tabela 12 - Absorção de água por imersão dos tratamentos propostos

Traço	Massa CPs após 14 dias submerso (g)	Massa CPs após secagem estufa (g)	Absorção de água (%)	Média absorção por traço (%)
Traço de referência - CP 01	3561	3309	7,62%	7,78%
Traço de referência - CP 02	3545	3283	7,98%	
Traço de referência - CP 03	3599	3333	7,98%	
Traço de referência - CP 04	3529	3282	7,53%	
CFC-LIV - 3% - CP 01	3562	3369	5,73%	5,85%
CFC-LIV - 3% - CP 02	3548	3351	5,88%	
CFC-LIV - 3% - CP 03	3543	3345	5,92%	
CFC-LIV - 3% - CP 04	3532	3336	5,88%	
CFC-LIV - 5% - CP 01	3498	3284	6,52%	6,31%

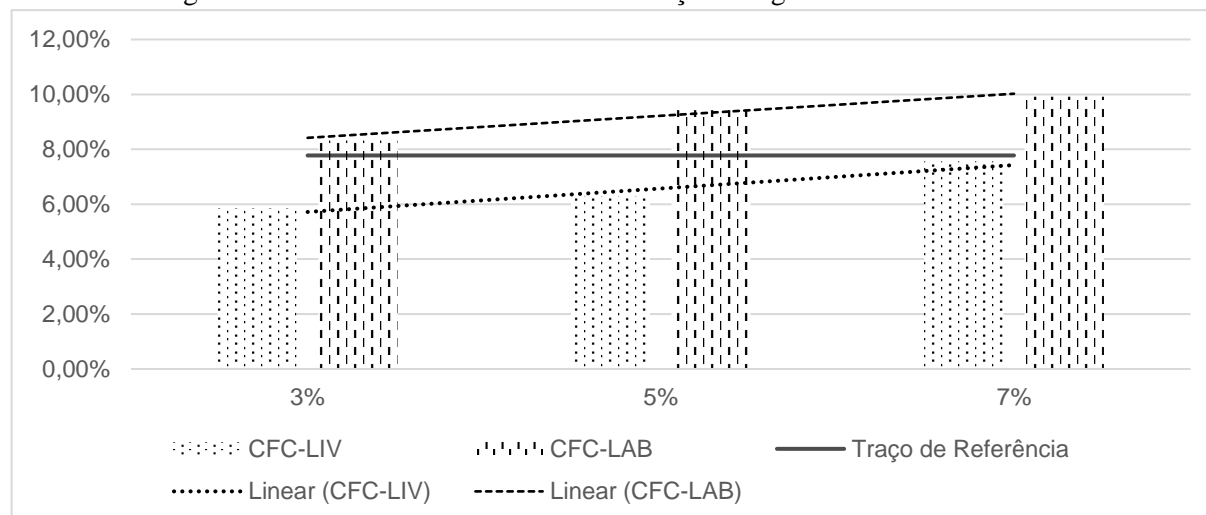
CFC-LIV - 5% - CP 02	3500	3290	6,38%	
CFC-LIV - 5% - CP 03	3540	3331	6,27%	
CFC-LIV - 5% - CP 04	3471	3273	6,05%	
CFC-LIV - 7% - CP 01	3487	3237	7,72%	
CFC-LIV - 7% - CP 02	3445	3204	7,52%	7,56%
CFC-LIV - 7% - CP 03	3510	3266	7,47%	
CFC-LIV - 7% - CP 04	3533	3286	7,52%	
CFC-LAB - 3% - CP 01	3346	3084	8,50%	
CFC-LAB - 3% - CP 02	3495	3230	8,20%	8,31%
CFC-LAB - 3% - CP 03	3526	3261	8,13%	
CFC-LAB - 3% - CP 04	3487	3216	8,43%	
CFC-LAB - 5% - CP 01	3460	3157	9,60%	
CFC-LAB - 5% - CP 02	3448	3153	9,36%	9,43%
CFC-LAB - 5% - CP 03	3456	3158	9,44%	
CFC-LAB - 5% - CP 04	3423	3131	9,33%	
CFC-LAB - 7% - CP 01	3372	3068	9,91%	
CFC-LAB - 7% - CP 02	3374	3071	9,87%	9,92%
CFC-LAB - 7% - CP 03	3301	3002	9,96%	
CFC-LAB - 7% - CP 04	3262	2967	9,94%	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a Tabela 12, as CFC-LIV com substituição de 3%, 5% e 7% obtiveram percentual de absorção abaixo do valor de absorção do traço de referência, que foi de 7,78%. A absorção de água dos CPs em que foram utilizadas as CFC-LAB variaram entre 8,31% e 9,92%, ficando significativamente acima dos valores encontrados no traço de referência.

A Figura 28 apresenta o resumo dos resultados relacionados à absorção de água dos CPs para os 2 tipos de cinzas. As barras pontilhadas representam os valores de absorção dos CPs com uso de CFC-LIV, e as barras tracejadas apresentam valores de absorção dos CPs com uso das CFC-LAB.

Figura 28 - Resumo dos resultados de absorção de água e curvas de tendência



Fonte: Elaborado pelo autor.

As linhas tracejadas em laranja e azul representam curvas de tendência, que apresentam inclinação muito semelhante para os traços desenvolvidos com utilização das CFC-LIV e CFC-LAB, sugerindo tendência de aumento da absorção de água com o aumento da substituição de cimento por cinza no traço.

4.2.3. Resistência à compressão

Após os 28 dias de moldados, os CPs foram retirados do tanque de cura, removido o excesso de água com uma flanela, e posteriormente levados para rompimento na prensa elétrica. A Tabela 13 apresenta os valores das resistências à compressão e respectivas médias para cada traço proposto.

Tabela 13 - Resistência à compressão dos CPs produzidos com os traços propostos

Tratamentos	Corpo de Prova (CP)	Resistência à compressão (Mpa)	Resistência Média (MPa)
Traço de Referência	1	20,13	20,75
	2	21,70	
	3	21,15	
	4	20,03	
3% (CFC-LIV)	1	23,06	23,28
	2	23,18	
	3	23,79	
	4	23,10	
5% (CFC-LIV)	1	19,03	19,47
	2	20,50	
	3	18,81	
	4	19,54	
7% (CFC-LIV)	1	13,29	13,44
	2	14,04	
	3	12,74	
	4	13,71	
3% (CFC-LAB)	1	13,34	14,30
	2	13,66	
	3	15,94	
	4	14,28	
5% (CFC-LAB)	1	12,93	12,15
	2	11,66	
	3	11,31	
	4	12,69	
7% (CFC-LAB)	1	8,49	8,41
	2	9,23	
	3	7,89	
	4	8,05	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 13, pode-se verificar que a resistência característica (F_{ck}) para o traço de referência proposto foi atendida, alcançando o valor médio de 20,75 MPa, e o valor de F_{ck} proposto foi de 20 MPa. A CFC-LIV com substituição de 3% obteve resistência média superior ao valor de referência em 12,19%, ficando a resistência em 23,28 MPa. Já no percentual de substituição de 5%, obteve-se perda de resistência de 6,67% em relação ao traço de referência. Na substituição de 7% de cimento por cinzas, obteve-se resistência média de 13,44 MPa, o que representa perda de 35,3% em relação ao valor de referência.

No estudo desenvolvido por Bonato (2014), a resistência do concreto aos 91 dias no traço com 3% de cinzas em substituição ao cimento foi 4,91% superior ao traço de referência; e, na substituição de 5% de cinzas, o resultado obtido foi de perda de 16,3% em relação ao valor de referência. No estudo em tela, percebe-se aumento de resistência aos 28 dias de idade, apesar da relação a/c com a substituição de 3% aumentar de 0,57 para 0,59.

Para os valores de substituição de 3% e 5%, percebe-se semelhança aos resultados obtidos por Bonato (2014), já que houve melhoria de resistência na substituição de 3% de cimento por cinzas, apesar do f_{ck} e idade dos concretos serem diferentes nos estudos; e, redução da resistência na substituição de 5% de cimento pelas cinzas. Segundo Bonato (2014), os concretos produzidos com 3% de cinzas, em substituição ao cimento, propiciaram um menor consumo de cimento, que representa uma redução na emissão de 11,2 kg de CO_2/m^3 de concreto produzido.

A Figura 29 apresenta a aparência dos CPs com uso da CFC-LIV. Quanto aos traços com substituição do cimento por CFC-LAB, obteve-se resultados de resistência muito abaixo dos valores de referência para os três percentuais de substituições: 3%, 5% e 7%.

A substituição de 3% obteve resistência média de 14,30 MPa, representando perda de 31,08% em relação ao traço de referência; a substituição de 5% obteve resistência média de 12,15 MPa, o que representa perda de 41,45%; e, a substituição de 7% obteve resultado de resistência de 8,41 MPa, o que corresponde à perda de 59,47% referente ao valor de referência.

Figura 29 - CPs após ensaio de resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se verificar possíveis causas para perdas de resistência tão significativas dos CPs com substituição de cimento por CFC-LAB, como: problemas na moldagem dos CPs e presença e vazios, por conta de o concreto apresentar baixa trabalhabilidade, fato já observado no ensaio de abatimento de tronco de cone, onde foi verificado que os valores de abatimento tendem a 0. A Figura 30, demonstra a aparência dos CPs moldados com adição de CFC-LAB.

Figura 30 - CPs moldados com CFC-LAB



Fonte: Elaborado pelo autor.

A obtenção de concretos com menor trabalhabilidade pode estar associado à diferença de massa específica dos materiais e a substituição em massa do cimento pelas cinzas, pois o cimento tem massa específica em torno de 3100 kg/m^3 , e a CFC-LAB tem apenas 1200 kg/m^3 de massa específica, resultando em aumento de finos na mistura.

A moldagem dos CP's dos concretos de menor trabalhabilidade deveria ter ocorrido com uso de vibrador, visando evitar presença de vazios nos CP's. A falta de equipamento adequado para a moldagem fragiliza os resultados de resistência obtidos no concreto com uso de CFC-LAB. Observa-se também pelos resultados apresentados, o aumento no percentual de absorção de água do concreto. A Figura 31 demonstra a aparência dos CPs produzidos com adição de CFC-LAB, após serem submetidos a ensaio de resistência à compressão.

Figura 31 - CPs após ensaio de resistência à compressão



Figura 31(a) - CP com substituição de 3% de cimento por CFC-LAB

Figura 31(b) - CP com substituição de 5% de cimento por CFC-LAB

Figura 31(c) - CP com substituição de 7% de cimento por CFC-LAB

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro aspecto, verificado na Figura 31, é a aparência dos CPs após o rompimento. Para os traços com maior teor de substituição de cinzas, nota-se que os CPs apresentam tendência de esfarelamento, o que demonstra deficiência na integridade entre os materiais que compõem o traço de concreto.

Optou-se por manter a substituição em massa, mesmo sendo verificado que as cinzas apresentavam valores distintos de massas específicas, para uniformizar o procedimento; e, por não terem sido encontrados estudos de referência que tivessem feito uso da substituição em volume, ao invés de massa, para cinzas. Observando os resultados de resistência à compressão

dos CPs, a Tabela 14, a seguir, apresenta dados estatísticos referentes a mediana, variância e desvio padrão.

A Tabela 14 demonstra que os valores de mediana para todos os tratamentos propostos apresentam valores similares aos valores de média aritmética apresentados na Tabela 14. Associando isso aos baixos valores de variância e desvio padrão, pode-se verificar que os CPs apresentaram similaridade de moldagem, não sendo observado discrepâncias significativas nos dados de resistência à compressão em nenhum CP. O tratamento que apresentou maiores valores de variância e desvio padrão foi a substituição 3% de CFC-LAB, decorrente do CP 3, que foi 11,47% acima do resultado médio desse traço.

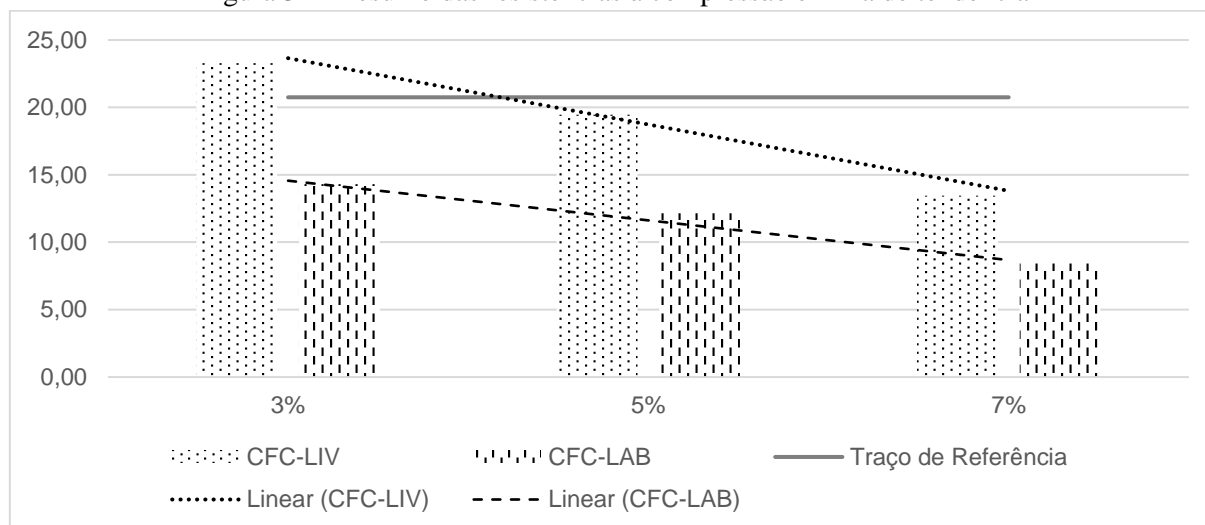
Tabela 14 - Mediana, variância e desvio padrão dos resultados de resistência à compressão dos CPs

Traço	Mediana	Variância	Desvio Padrão
Referência	20,64	0,49	0,70
3% (CFC-LIV)	23,14	0,09	0,30
5% (CFC-LIV)	19,28	0,42	0,65
7% (CFC-LIV)	13,50	0,24	0,49
3% (CFC-LAB)	13,97	1,00	1,00
5% (CFC-LAB)	12,18	0,46	0,68
7% (CFC-LAB)	8,27	0,27	0,52

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32 apresenta de forma resumida os resultados de resistência à compressão, onde a linha na cor cinza representa o valor de resistência média do traço de referência, as barras com hachuras tracejadas demonstram os valores de resistência da CFC-LIV, e as barras com hachuras pontilhadas representam os valores médios de resistência dos tratamentos com uso de CFC-LAB.

Figura 32 - Resumo das resistências à compressão e linha de tendência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 32, a linha tracejada demonstra a tendência de resultados, caso fossem aumentados os percentuais de substituição. Com isso verifica-se que a utilização de percentuais acima de 5% gera diminuição da resistência abaixo dos valores mínimos previstos na NBR 6118 (ABNT, 2014) para elementos estruturais de concreto.

5. CONCLUSÃO

Pelos resultados apresentados, pode-se concluir que as cinzas produzidas pelos processos de combustão por chamas sem controle de tempo e temperatura e as cinzas produzidas por degradação térmica em Mufla com controle de tempo e temperatura apresentaram características físico-químicas distintas, repercutindo no efeito que essas cinzas produziram, quando incorporadas aos traços de concreto em substituição parcial do cimento.

Quanto à consistência do concreto no estado fresco, verificou-se que a substituição do cimento por cinzas alterou a trabalhabilidade da mistura, deixando o concreto mais seco quanto maior fosse o percentual de substituição, o que gerou prejuízos na moldagem dos elementos de concreto, gerando excesso de vazios nos CPs, que se refletiu diretamente nos resultados encontrados nos ensaios feitos no concreto no estado endurecido.

Para as CFC-LAB, os resultados obtidos demonstram a inviabilidade da utilização das cinzas como adição mineral no concreto nos moldes adotados nesta pesquisa, não satisfazendo a hipótese secundária da pesquisa, que considerava a possibilidade da produção de cinzas a 400°C gerar cinzas com características físico-químicas com potencialidades de aplicação em concretos. A diferença entre a massa específica da cinza e do cimento e a substituição realizada em massa podem ter contribuído para os resultados de desempenho insatisfatórios.

Quanto às CFC-LIV sem controle de tempo e temperatura de queima, apresentaram resultados mais favoráveis, tanto nos aspectos relacionados à absorção de água, quanto à resistência à compressão em percentuais abaixo de 5% de substituição do cimento pela cinza. Sendo o cimento o insumo mais caro do concreto e o maior gerador de impactos ambientais relacionados a sua produção, verificar a viabilidade de substituição parcial do cimento por subproduto, que está sendo desperdiçado nos terrenos dos sítios produtores de coco, caracteriza-se em contribuição importante para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre a temática.

No ensaio de FRX, percebeu-se que as CFC-LAB a 400°C, nos tempos de 1h, 2h e 4h apresentaram os mesmos elementos químicos isolados, variando o percentual em função da mudança de temperatura, sendo os principais componentes químicos Potássio (K), Cloro (Cl), Cálcio (Ca), Silício (Si), Sódio (Na) e Ferro (Fe). No DRX, verificou-se que as CFC-LAB apresentam picos semelhantes dos compostos químicos, sendo o pico mais expressivo o do Carbono, seguido por picos menos expressivos de SiO_2 e Al_2O_3 . Quanto às CFC-LIV os compostos identificados foram: KCl com 28%, em seguida temos o SiO_2 com 26%, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$

com 21%, e os compostos menos abundantes, temos: Fosfato de Alumínio Al (PO₃)₃ com 11%, Sulfeto de potássio (K₂S) com 7% e Magnetita (Fe₃O₄).

Os ensaios tecnológicos no concreto das cinzas geradas por combustão e degradação em diferentes percentuais (0%, 3%, 5% e 7%), em substituição parcial do cimento, demonstram que o *Slump* diminui quanto mais cinza for incorporada no traço, passando de 60 mm para 0 mm na maior substituição. A absorção de água por imersão foi maior, quanto maior o percentual de cinzas incorporadas, variando de 5,85% a 7,56% de absorção para as substituições de CFC-LIV; e, 8,31% a 9,92% de absorção para as CFC-LAB. As CFC-LIV apresentaram melhores resultados de resistência, com aumento de 12,19% em relação à resistência do traço de referência, quando houve substituição de 3% de cimento por cinzas; e, perda de resistência de 6,67% para substituição de 5%.

Por todo o exposto, verifica-se que a hipótese secundária da pesquisa foi refutada, nas condições determinadas, já que as CFC-LAB, com temperatura e tempo controlados, não geraram cinzas com maior potencialidade de aplicação no concreto, em relação às CFC-LIV. Também não se obteve efeitos benéficos ao concreto proceder com a aplicação da cinza produzida por degradação térmica no forno Mufla a 400°C.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se que seja verificada a viabilidade de utilização das CFC-LAB em temperaturas diferentes das estudadas nessa pesquisa e com substituição de cimento por cinzas em volume e uso de vibrador na moldagem dos CP's, uma vez que a substituição em massa aparentemente e moldagem com adensamento manual contribuíram negativamente nos resultados no concreto, para os procedimentos adotados nessa pesquisa, pelas diferenças de massa específica entre os materiais.

Quanto a CFC-LIV, sugere-se aprofundar os estudos de substituição parcial do cimento pela cinza, para melhor entendimento das características das cinzas, que favoreceram e melhoraram a resistência à compressão em percentuais abaixo de 5%. Sugere-se, também, ser estudado o efeito da substituição parcial do agregado miúdo pelas cinzas, visando verificar os efeitos resultantes.

Com a observação da presença da Grafite (C) na CFC-LAB, produzida na temperatura de 400°C nos tempos de 1h e 2h de permanência no forno, sugere-se que seja testada novas possibilidades de aplicação da cinza, por existirem estudos que demonstraram viabilidade de aplicação de Grafite (C) no desenvolvimento de novos materiais compósitos.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. R. P; SILVA, M. A; CHAVES, A.D. C. G; Identificação e análise dos impactos ambientais gerados na indústria da construção civil. **INTESA**, v. 9, n. 1, p. 39-46, Jan.-Jun., 2015.

ARAÚJO, I. M. C. N.; ARAÚJO, E. C. N. **Análise de resistência mecânica em concreto convencional produzido com cinzas de coco babaçu**. ENEGEP, São Paulo, out., 2019.

CORRADINI, E. *et al.* Composição Química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Rev. Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 31, n. 3, p.837-846, setembro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739 - Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto**, Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7211 - Agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, versão corrigida em 2019.

_____. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11172 - Aglomerantes de origem mineral - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 11768 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16889 - Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ATAIE, F., RIDING, K.A., Impact of Pretreatments and Enzymatic Hydrolysis on Agricultural Residue Ash Suitability for concrete. **Construction & Building Materials**, Vol. 58, pp. 25-30, 2014.

AYRILMIS, N.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V. Coir Fiber Reinforced Polypropylene Composite Panel for Automotive Interior Applications. **Fibers and Polymers**, v. 12, n.7, pp. 919-916, 2011.

BONATO, M. M. **Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco – Soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**. Ano 5, Nº 127, agosto, 2020.

BRASILEIRO, G. A. M. **Produção, caracterização e avaliação da durabilidade de compósitos cimentícios com partículas de pó de coco.** Tese de doutorado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013.

CABRAL, M. M. S. *et. al.* Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **ENGEVISTA**, V. 19, n.1, p. 99-108, Janeiro 2017.

CALADO, C. F. A. *et al.* Experimental investigation of cementitious mixtures with lignocellulosic residue. **Conference on cementitious materials and alternative binders for sustainable concrete**, 2021, MONTREAL. ICCM2021, 2021.

CARDOSO, M. F. M. **Estudo do comportamento de argamassas com a utilização de cinzas de coco de babaçu (*Orbignya speciosa*).** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

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

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, n. 55, p.18-32, 2009.

CAVALCANTE, L. V. A modernização da produção brasileira de coco e a racionalidade do capital. **Ateliê Geográfico - Goiânia-GO**, v. 11, n. 3, dez./2017, p. 235-254.

CENTURIONE, S. L. **A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1999.

COSTA, W.F.S. *et al.* **Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro carajás para aplicação industrial.** XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belo Horizonte, 2019.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** v.1. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345 – 379.

DANTAS, B. F. C. *et al.* Estudo para uso do resíduo do bioetanol celulósico adicionado ao cimento em argamassas de concreto. **III Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento**, 2018, COIMBRA, 2018.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Recurso eletrônico – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DENARI, Gabriela B. **Contribuições ao Ensino de Análise Térmica.** Dissertação de Mestrado, Mestrado em Química Analítica e Inorgânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DE PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.3, p.353–357, 2009.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à Economia Circular: O racional de negócio para acelerar a transição**, 2015. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: agosto de 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial.** 2017. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: agosto de 2021.

EMBRAPA. **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014.** Documentos 184. Embrapa Tabuleiros Costeiros Aracaju, SE 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

FLORES, B. C. *et al.* **Fundamentos de Combate a Incêndio – Manual de Bombeiros.** Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás. Goiânia-GO, 1^aed: 2016, 150p.

GOMES, Pedro B. **Caracterização de materiais: uma abordagem das possibilidades de algumas técnicas instrumentais.** Universidade Federal de São João Del Rei, 2015.

IBGE. **Produção agrícola municipal - lavoura permanente - 2017** Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/1JIN2>. Acesso em: 2 fev. 2019.

IBGE. **Produção agrícola municipal – 2019.** Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>. Acesso em: ago. 2021.

JESUS JR, L. A. *et al.*. **Análise da produção da cultura do coco no Brasil, Nordeste e Sergipe**. 6th International Symposium On Technological Innovation, Anual. Universidade Federal de Sergipe. Aracaju, v. 3, n. 1, p.317-324, 25 set. 2015.

KANNING, R. C. **Avaliação do potencial pozolânico da cinza de folha de bananeira**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

LEÃO, R. M. **Tratamento Superficial de Fibra de Coco e Aplicação em Materiais Compósitos como Reforço do Polipropileno**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2012.

LUZ, B. **Economia circular Holanda Brasil: da teoria à prática**. 1ª edição. Rio de Janeiro, 2017.

MARCELINO, M.M; MELO, S. A. V; TORRES, E. A. **Caracterização da biomassa da casca de coco para obtenção de energia**. BAED, Salvador, v. 27, n. 1, p.336-355, jan-jun. 2017.

MATTOS, A.L.A. *et al.* **Beneficiamento da casca de coco verde**. Ed. 37 p.il. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento portland em argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Vol 13 - nº 1, pág 251 – 269, 2017.

MEDEIROS JÚNIOR, R. A. *et al.* Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. **Revista ALCONPAT**, Volume 9, págs 152 – 166, agosto, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais** - 2ª Ed. Editora Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2014.

MIOLA, B. *et al.* Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. **Eng Sanit Ambient**. v.25 n.4, págs. 627-634, jul.- ago., 2020.

MOURA, A. S. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas e térmicas entre os compósitos de PHB reforçados com casca de arroz ou fibra de coco**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasil, 2014.

OLIVEIRA, W. L. *et al.* **Determinação do coeficiente de condutividade térmica de compósitos constituídos a partir da fibra de coco**. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Porto Alegre/RS, 2015.

PADILLA, E.R.D. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: Caracterização Físico – Química e produção de carvão para energia**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

- PADILLA, E. R. D. *et al.* Potencial Energético da Casca de Coco (*Cocos nucifera* L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise. **Rev. Virtual Química**, ed. 10 (2), p. 334-345, 2018.
- PEREIRA, A. M. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Revista Matéria**. Vol 20, N 01, p. 227-238, 2015.
- RAPÔSO, A.; CÉSAR, S. F.; KIPERSTOK, A. **Design do Ciclo de Vida do Produto e Produção mais Limpa: uma reflexão aplicada à produção de estofados**. Estudos em Design, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, 2013, p. 1-25.
- ROCHA, R.C.; CHAGAS, A. P. Os Pesos Atômicos deixam de ser constantes: Dez elementos passam a ter intervalos de pesos Atômicos. **Química Nova na Escola**. Vol. 33, Nº 4, nov., 2011.
- RODRIGUES, P. P. M. Parâmetros de Dosagem do Concreto. **Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP**, ed. 3, São Paulo, 1998.
- ROYER, B.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; RODRIGUES, G. Efeito da Aplicação do Poliestireno Sulfonado (PSSNa) como Aditivo em Argamassas e Concretos de Cimento Portland CPV32. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 63-67, 2005.
- SCHENA, T. **Pirólise da fibra da casca de coco: caracterização do bio-óleo antes e após a aplicação de dois processos de melhoramento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- SCHWAAB, S. **Efeito da adição de aditivo plastificante retardador de pega nas propriedades de concretos usinados de cimento Portland usando planejamento fatorial**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- SEPLAG - Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio – **Alagoas em Mapas - Quantidade Produzida de Coco-da-Baía**. 2019. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/no/dataset/mapas-de-agropecuaria/resource/777661c9-3aaf-4605-a346-33c1eb31715d>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- SEVERO, L. S. **Síntese e caracterização de grafeno produzido a partir da serragem de madeira**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, 2020.
- SILVA, B. J. B. *et al.* Análise quantitativa das zeólitas ferrierita, ZSM-5 e mordenita presentes em amostras sintetizadas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, n. 357, jan./mar. 2015.
- SIQUEIRA, L. A., *et al.* **A introdução do coqueiro no Brasil: importância histórica e agrônômica**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2002.
- SOBRAL, H. S. **Propriedades do concreto fresco**. Estudo Técnico – 15. Associação Brasileira de Cimento Portland. Rev. 6, São Paulo, 2000.
- SOUZA, D.I *et al.* **Manual de orientações para projetos de pesquisa**. Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha. Novo Hamburgo, 2013.

SOUZA, E.S. *et al.* **Aplicação da fibra de coco no processo de isolamento termoacústico.** *Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, p.233-245, dezembro, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. C. **Concreto Autoadensável.** São Paulo: 2ª Edição. PINI, 2015.

ZHOU, Y. *et al.* Decoupling Ionic and Electronic Pathways in Low-Dimensional Hybrid Conductors. **Journal of the American Chemical Society.** Vol.: 141, 44, 17830-17837, 2019.

8. APÊNDICES

8.1. Apêndice A: Cálculo do traço de referência

O traço de referência foi calculado adotando as etapas previstas na publicação: Parâmetros de Dosagem do Concreto, da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, em sua 3ª revisão, publicada em outubro de 1998. As etapas para o cálculo do traço de concreto 5, a saber: fixação da relação água/cimento (a/c); determinação do consumo de água no concreto (Ca); determinação do consumo de cimento (C); determinação do consumo de agregado graúdo (Cb) e determinação do consumo de agregado miúdo (Cm).

Fixação da relação água/cimento (a/c)

A fixação da relação a/c depende de 2 parâmetros:

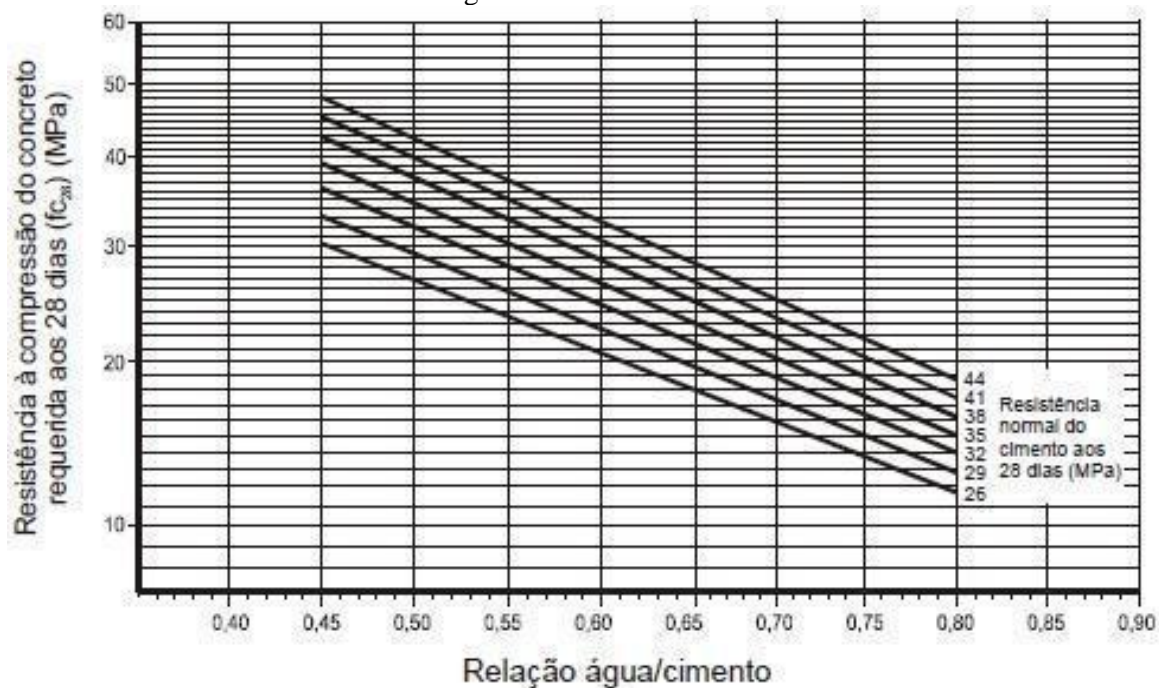
- Resistência do concreto;
- Resistência normal do cimento.

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), este valor é obtido pela resistência do concreto verificada no equipamento diminuindo 1,65 vezes o desvio padrão (Sd), o qual é atribuído às condições de preparo do concreto (para esta pesquisa, condição A, resultando em Sd de 4,0). A resistência do concreto Fck proposta para a pesquisa foi de 20 MPa, contudo, para efeito de cálculos a resistência é majorada pela seguinte equação:

- $F_{cj} = F_{ck} + 1,65 \cdot S_d$, logo, $F_{cj} = 20 + 1,65 \cdot 4 = 26,6$ Mpa.

A resistência normal do cimento está dita em sua embalagem. Como o cimento adotado foi o CP II Z 32 RS, sua resistência normal é 32 MPa. A Figura 33, a seguir, apresenta a relação a/c em função das resistências. Portanto, a relação a/c para as resistências apresentadas é 0,57.

Figura 33 - Curva de Abrams



Fonte: Parâmetros de Dosagem do Concreto – ABCP (RODRIGUES, 1998).

Determinação do consumo de água (C_a)

A determinação do consumo de água depende dos seguintes parâmetros:

- *Slump* pretendido;
- Diâmetro máximo do agregado graúdo ($D_{máx}$).

Pelas possíveis aplicações do concreto foi adotado o *Slump* pretendido de 60 mm a 80 mm, e o $D_{máx}$ é 9,5 mm. A Tabela 15 apresenta o consumo de água em função dos parâmetros definidos. Com isso, o consumo aproximado de água (C_a) foi de 225 L/m³ de concreto.

Tabela 15 - Consumo aproximado de água (L/m³)

Abatimento de tronco de cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Adaptado de Parâmetros de Dosagem do Concreto – ABCP (RODRIGUES, 1998).

Consumo de cimento (C)

Considerando os valores calculados da relação a/c e consumo aproximado de água (Ca), o consumo de concreto foi definido pela aplicação direta da seguinte fórmula:

- $C = Ca/(a/c) = 225/0,57 = 394,74 \text{ kg/m}^3$.

Determinação do consumo do agregado graúdo (Cb)

A determinação do consumo do agregado graúdo (Cb) depende dos seguintes parâmetros:

- Dimensão máxima do agregado graúdo (Dmax);
- Módulo de finura da areia (M.F.).

O Dmáx definido é 9,5 mm e o M.F. foi calculado a partir do ensaio de granulometria. A Tabela 16, apresenta o resumo das informações referentes à granulometria da areia.

Tabela 16 - Granulometria da areia

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	% R retida	% Ret. Acumulada	% P passa
4,8	0	0,00%	0,0%	100,00%
2,4	28,2	2,83%	2,83%	97,17%
1,2	123,2	12,35%	15,18%	84,82%
0,6	271,1	27,18%	42,35%	57,65%
0,3	254,9	25,55%	67,90%	32,10%
0,15	219,7	22,02%	89,93%	10,07%
fundo	100,5	10,07%	100,00%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo de finura (M.F.) foi determinado pelo somatório dos percentuais retidos acumulados, divididos por 100; com isso, tem-se:

- $MF = \sum \% \text{ Ret acumulado}/100 = (2,83+15,18+42,35+67,9+89,93) /100 = 2,19$, aproximadamente = 2,2.

Com os parâmetros estabelecidos, encontrou-se o valor do Volume compactado seco (Vc) da brita no concreto na Tabela 17.

Tabela 17 - Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m^3 de concreto

MF	D _{máx} (mm)				
	9,5	19	25	31,5	37,5
1,6	0,665	0,790	0,815	0,840	0,865
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado de Parâmetros de Dosagem do Concreto – ABCP.

De posse do V_c extraído da Tabela 17 (0,605), calculou-se o consumo de agregado graúdo C_b pela expressão: $C_b = V_c \times M_c$, onde, M_c é a massa unitária da brita, que foi calculada em 1450 kg/m^3 , logo: $C_b = 0,605 \times 1450 = 877,25 \text{ kg/m}^3$.

Determinação do consumo de areia (C_m)

Como já foram determinados o consumo dos outros materiais, a determinação do consumo de areia foi imediata; pois, pode-se admitir que o volume do concreto é formado pela soma do volume dos materiais (RODRIGUES, 1998). Logo, tem-se que:

$$V_m = 1 - ((C/p_c) + (C_b/p_b) + (C_a/p_a)),$$

onde, C , C_b e C_a representam os consumos determinados de cimento, brita e água; e p_c , p_b e p_a as massas específicas dos materiais.

Os valores de massa específica calculadas e adotadas para os materiais foram os seguintes: massa específica do cimento (p_c) adotado = 3100 kg/m^3 ; massa específica da brita (p_b), calculado de acordo com a NBR 16917:2021 Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água (ABNT, 2021) = 2683 kg/m^3 ; massa específica da água (p_a) adotado = 1000 kg/m^3 e massa específica da areia (p_m), calculado de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009) = 2673 kg/m^3 , portanto:

$$V_m = 1 - ((394,74/3100) + (877,25/2683) + (225/1000)) = 0,3207.$$

Substituindo os valores na expressão $C_m = V_m \times p_m$, tem-se que:

$$C_m = 0,3207 \times 2673 = 857,23 \text{ kg/m}^3.$$

Consumo dos materiais

Considerando a definição do traço de referência e tratamentos propostos, pôde-se calcular a massa de cada material na produção dos corpos de prova. Para cada tratamento foi estabelecido um volume de 5% a mais dos materiais, como margem de erro, prevenindo possíveis perdas do processo produtivo. A Tabela 18 apresenta o consumo dos materiais para cada traço e consumo total dos materiais.

Tabela 18 - Consumo em massa dos materiais para traço proposto e consumo total

Tratamento	Para 4 CPs +5%	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Cinzas (kg)
1	Traço de referência	2,51	5,451	5,578	1,431	0
2	3% (cinza mufla)	2,435	5,451	5,578	1,431	0,075
3	5% (cinza mufla)	2,385	5,451	5,578	1,431	0,126
4	7% (cinza mufla)	2,334	5,451	5,578	1,431	0,176
5	3% (cinza combustão)	2,435	5,451	5,578	1,431	0,075
6	5% (cinza combustão)	2,385	5,451	5,578	1,431	0,126
7	7% (cinza combustão)	2,334	5,451	5,578	1,431	0,176
TOTAL		16,817	38,157	39,046	10,017	0,753
Volume 1 CP (m ³)		0,00157	Volume 4 CPs + 5% (m ³)			0,0063585

Fonte: Elaborado pelo autor.

8.2. Apêndice B: Artigo para submissão à Revista Principia

Artigo 1, referente à avaliação da aplicação da cinza produzida por queima livre em concretos, para submissão à Revista Principia.

Estudo da aplicação de cinza proveniente da queima da casca do coco em concretos

Resumo

O Brasil destaca-se na produção mundial de coco. Contudo, aproximadamente 80% do peso bruto do coco é considerado resíduo; que, por sua difícil degradação, grande volume e descarte inadequado, gera problemas ao meio ambiente. O presente trabalho teve por objetivo analisar as características de cinza gerada pela queima da casca do coco, produzida no litoral sul de Alagoas, visando à aplicação como adição mineral em concretos. A cinza foi caracterizada através dos ensaios de Análise Granulométrica, Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise Termogravimétrica (TG) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Nos resultados obtidos, quanto à composição química por DRX, os principais compostos identificados foram: KCl, SiO₂ e Ca₂(SiO₄). Para os ensaios tecnológicos no concreto, os percentuais de substituição de cimento por cinza foram de 3%, 5% e 7%. A consistência do concreto tende a aumentar, quanto maior o percentual de cinza incorporada no concreto. A absorção de água foi maior, quanto maior o percentual de cinza incorporada, variando de 5,85% a 7,56%. Quanto à resistência a compressão, houve aumento de 12,19%, com substituição de 3% de cimento por cinzas. Pelos resultados, pode-se concluir que existe viabilidade de utilização da cinza produzida como adição mineral no concreto.

Palavras-chave: Adições minerais. Adição em concretos. Subproduto do coco. Cinzas do coco.

Abstract

Brazil stands out in world coconut production. However, approximately 80% of the gross coconut weight is considered residue; which, due to its difficult degradation, large volume and inadequate disposal, generates problems for the environment. This study aimed to analyze the characteristics of ash generated by burning coconut husk, produced on the southern coast of Alagoas, aiming at its application as a mineral addition in concrete. The ash was characterized through the tests of Granulometric Analysis, X-Ray Fluorescence (FRX), X-Ray Diffraction (XRD), Thermogravimetric Analysis (TG) and Scanning Electron Microscopy (SEM). In the results obtained, regarding the chemical composition by XRD, the main compounds identified were: KCl, SiO₂ and Ca₂(SiO₄). For technological tests on concrete, the percentages of replacement of cement by ash were 3%, 5% and 7%. The consistency of the concrete tends to increase, the higher the percentage of ash incorporated into the concrete. The water absorption was greater, the greater the percentage of incorporated ash, ranging from 5.85% to 7.56%. As for the compressive strength, there was an increase of 12.19%, with the replacement of 3% of cement by ash. From the results, it can be concluded that there is feasibility of using the ash produced as a mineral addition in concrete.

Keywords: Mineral additions; Addition in concrete; Coconut by-product; Coconut ash.

1 Introdução

O Brasil destaca-se na produção mundial de coco, ficando na quinta posição. Aproximadamente 85% em massa do fruto torna-se perda produtiva, sendo destinado aos lixões, aterros sanitários e locais públicos de forma inapropriada. Embora orgânico, o resíduo do coco mostra-se de difícil degradação e demora de 8 a 12 anos para se decompor completamente (CORRADINI *et al.*, 2009).

Segundo Padilla *et al.* (2018), a casca do coco tem poder calorífico superior (PCS) de cerca de 18,7 MJ/kg. Em virtude desse potencial calorífico, algumas empresas já utilizam a casca do coco como fonte de energia. A partir desse processo, um dos subprodutos sólidos gerados pela produção da energia é a cinza da casca do coco.

Em paralelo a isso, a indústria da Construção Civil vem incorporando subprodutos de diversas cadeias produtivas. Apesar de ser reconhecida como uma das mais importantes atividades produtivas e econômicas, a indústria da Construção Civil é responsável também por grandes impactos ao meio ambiente, tanto pelo grande consumo de matérias-primas, como pelos processos produtivos geradores de resíduos (ALMEIDA *et al.*, 2015).

A composição do concreto, material da Construção Civil mais consumido do mundo, consiste basicamente na mistura de cimento, areia, brita e água. Ao longo do tempo, as técnicas de dosagem, produção e utilização do concreto passaram por inúmeras inovações. Dessa forma, a evolução da tecnologia de produção de concretos foi incrementada com uso de adições e/ou aditivos (SCHWAAB, 2015).

A demanda por cimento está crescendo ao longo dos anos. Segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, o consumo total de cimento no Brasil, em 2019, foi de 54,8 milhões de toneladas. A produção do cimento é responsável pela emissão de cerca de 5% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO₂) do planeta, gerada pelo homem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A aplicação de adições minerais e orgânicas na produção de concreto, em substituição ao cimento, promove a minimização do impacto ambiental referente à sua fabricação, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera, além de minimizar o consumo de energia e preservar as jazidas de calcário e argila utilizadas na fabricação do cimento Portland (BONATO, 2014).

2 Referencial Teórico

2.1 Produção e principais usos industriais do coco

No Brasil, a previsão estimada em 2020 era de que a área colhida de coco-da-baía chegasse a 223 mil hectares com produção de 1,95 bilhão de frutos. Diferente do principal direcionamento dos maiores produtores mundiais, os cultivos brasileiros destinam-se à produção de coco seco in natura, coco ralado, leite de coco e água de coco. O Nordeste constitui-se na maior região produtora, com 81,3% da área e 71,2% da produção nacional. Posição que foi conquistada desde a introdução dos primeiros plantios em seu litoral e que ainda se mantém (BRAINER; XIMENES, 2020).

Em Alagoas, os produtos agrícolas de maior ênfase na região litorânea do estado são a cana-de-açúcar e o coco. O município de Coruripe, por exemplo, possui área de 4 mil hectares destinada à plantação de coqueiros, representando 2% de toda a área nacional destinada ao plantio desse fruto, com produção superior a 20 milhões de cocos ao ano, cerca de 4% de toda a produção nacional (IBGE, 2017).

A produção de coco em Alagoas e no Brasil tem como maior finalidade a produção de insumos da indústria alimentícia; contudo, como subproduto, são geradas milhões de toneladas de cascas deste fruto por ano. Para maior compreensão da produção alagoana de coco, na próxima subseção, apresenta-se o sistema produtivo do cultivo do coqueiro.

2.2 Sistema produtivo do coco

O sistema de produção do coco vem sendo, significativamente, modificado nas últimas décadas, sobretudo nas produções de coqueiros do tipo anão e híbrido, onde se percebe a passagem de modelo de produção, baseado no extrativismo, para o modelo produtivo, inserido em contexto representado pela modernização agrícola (CAVALCANTE, 2017).

Na região Nordeste, cerca de 60% da variedade plantada ainda é de coqueiro gigante, destinado à produção de coco seco. A renda do produtor, muitas vezes, não é suficiente para cobrir os custos com insumos e adoção de tecnologias, continuando o mesmo sistema de cultivo semi-extrativista, principalmente em áreas litorâneas (BRAINER; XIMENES, 2020).

O sistema de produção adotado baseia-se em modelo produtivo, vinculado à Economia Linear, que consiste em processo composto pelas etapas: (I) extração de insumos; (II) produção; (III) distribuição de produtos; (IV) consumo; e (V) descarte de resíduos e/ou produtos, que não estão sendo utilizados. Esse modelo mostra-se inviável, por causar o esgotamento dos recursos finitos do meio ambiente e provocar enorme geração de resíduos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Em contrapartida ao modelo linear de produção, surgiu novo modelo econômico, baseado na Economia Circular, que incentiva nova maneira de utilizar as matérias-primas e a energia. Este modelo constitui-se em três princípios básicos: respeito à preservação e ao aumento do capital natural, circulação constante dos materiais; e, eficácia do sistema, através da identificação e exclusão das externalidades negativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Portanto, a Economia Circular busca a otimização dos materiais, ampliando a vida útil dos produtos e ativos, durante e após o seu uso; reduzindo o consumo de insumos e recursos não-renováveis; optando pela utilização de recursos renováveis e insumos de base biológica; propondo a maior circulação dos subprodutos através do reuso, seja na mesma cadeia produtiva, seja para o reaproveitamento em outras indústrias (LUZ, 2017). Na sequência desta subseção, são apresentadas as características físicas e químicas das fibras da casca do coco.

2.3 Fibras da casca do coco

As fibras vegetais existentes na casca do coco são formadas por diversos componentes químicos, constituídos a base de Hidrogênio (H) e Carbono (C), sendo os principais: a celulose, a hemicelulose e a lignina (CABRAL *et al.*, 2017).

Royer *et al.* (2005) afirmaram que o primeiro aditivo redutor de água utilizado pela indústria da Construção Civil foi um polímero dispersante à base de lignina. De acordo com Moura (2014), as fibras da casca do coco (mesocarpo) são materiais lignocelulósicos compostos por mais de 40% de lignina, atribuindo dureza e durabilidade, quando comparadas com outras fibras naturais.

Estudos apontam para a utilização de cinzas de biomassa na produção de materiais de construção, a exemplo da casca de arroz (PEREIRA *et al.*, 2015), do bagaço de cana-de-açúcar (DE PAULA, 2009), da folha de bananeira

(KANNING, 2010), e da cinza da casca do coco (BONATO, 2014).

Considerando a abundância de subprodutos do coco disponíveis e a necessidade de desenvolvimento de novos produtos com reaproveitamento da casca do coco para a Construção Civil, a subseção 2.4 aborda os tipos de adições minerais, características e principais utilizações.

2.4 Adições minerais

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990, p.4), o termo *adição* deve ser empregado para designar “[...] produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características [...]”, sendo classificadas quanto à ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas.

As adições minerais inertes promovem, basicamente, três efeitos físicos principais sobre a hidratação do cimento Portland: redução do consumo do cimento; aumento no teor de finos e nucleação heterogênea. A redução do consumo do cimento é equivalente ao aumento da relação água/cimento. Quanto maior o teor de substituição, menor a quantidade de cimento, acarretando menor teor de hidratos produzidos ao longo do tempo (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Entre os efeitos físicos, está o efeito microfíler, que consiste na ocupação dos espaços vazios por micropartículas de adição. O efeito da redução do consumo do cimento consiste na menor concentração de cimento, reduzindo a quantidade de produtos da hidratação; e, o efeito de nucleação heterogênea proporcionado pela adição mineral funciona com a restrição do espaço para o crescimento dos cristais na superfície do cimento (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

As adições denominadas cimentantes dispõem de hidratação lenta e a quantidade de C-S-H produzida não é suficiente para que essas adições sejam utilizadas com finalidade estrutural. Esse tipo de adição não precisa de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) para formar os produtos cimentantes C-S-H; contudo, quando usada em substituição parcial ao cimento Portland ou como adição, a presença da gipsita e do Ca(OH)₂ aceleram a sua hidratação, proporcionando a formação de C-S-H (DAL MOLIN, 2005).

Adições pozolânicas são definidas pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como materiais silicosos ou sílico-aluminosos, que dispõem de

pouca ou nenhuma atividade aglomerante; no entanto, apresentam granulometria fina; e, na presença de água, fixam o $\text{Ca}(\text{HO})_2$ à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades hidráulicas.

Quanto ao uso de cinzas como adição mineral, a eficiência está relacionada ao tipo de biomassa utilizada e às condições de queima (variação de temperatura, tipo de caldeira, entre outros), pois esses fatores influenciam diretamente nas propriedades químicas e físicas da cinza e determinam seu efeito sobre os materiais à base de cimento, seja na aplicação como pastas, argamassas ou concretos (MATOS; GUIMARÃES, 2017).

3 Método da Pesquisa

O desenvolvimento da pesquisa foi dividido em 2 etapas, a saber: 1. Caracterização e ensaios físico-químicos da cinza produzida; 2. Utilização da cinza em traços de concretos, com realização de ensaios de consistência, absorção de água e resistência à compressão.

A produção e coleta da cinza ocorreu em sítio situado na cidade de Coruripe-AL. Trata-se de pequena produção, como outras existentes naquela região. Após a finalização da colheita, os cocos são descascados no próprio terreno e vendidos para empresário local, sendo que apenas o endocarpo é comercializado.

Após os cocos serem descascados, as cascas são amontoadas e, dias depois, queimadas no próprio terreno, por não terem nenhuma alternativa de reuso no próprio cultivo, sendo a alternativa mais barata para liberar espaço no terreno. A queima é realizada de maneira induzida, com uso de fósforo, já que as cascas secas entram em combustão com facilidade.

Para a pesquisa, foram queimadas, separadamente, em torno de 100 cascas em cima de base metálica para facilitar a coleta das cinzas. Foram coletadas para a caracterização e ensaios em torno de 1 quilograma (kg) de cinza.

3.1 Análises físico-químicas da cinza

3.1.1 Análise Granulométrica das cinzas

Para realização dessa análise, foram separadas 2 amostras de 300 g de cada tipo de cinza produzida, com vistas à repetição do procedimento; em seguida, foi realizado o processo de peneiramento, utilizando parte da série normal de Tyler, sendo as peneiras

utilizadas: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm e 0,075 mm.

Além do peneiramento no agitador por 2 min, foi adotado peneiramento manual e individual das peneiras, até que fosse percebido que a passagem de material foi inferior a 1% do material retido.

3.1.2 Massa específica da cinza

Considerando que não há norma técnica para determinação de massa específica das cinzas enquanto subproduto, para a pesquisa em tela, foi adotada a NBR 16605 (ABNT, 2017) adaptada. O líquido utilizado no ensaio foi o querosene e a massa adotada de cinza foi de 50 g.

3.1.3 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica permite obter informações das reações que ocorrem durante a degradação do material pelo calor. Parâmetros como composição química, razão de aquecimento e temperatura podem ser comparados nessa análise para determinar a correlação com o rendimento (PADILLA, 2018).

A análise foi realizada na faixa de temperatura de 20 °C a 1000 °C sob atmosfera de argônio, usando razão de aquecimento de 5 °C/min e vazão de 50 ml/min. A massa da amostra pesada em cadinho de alumina foi de aproximadamente 15 mg.

3.1.4 Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios X é a técnica não destrutiva, em que é possível realizar tanto análises quantitativas como qualitativas, assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra (GOMES, 2015). O ensaio foi realizado através do espectrômetro EDX-720 da Shimadzu em atmosfera a vácuo, empregando o método semiquantitativo para determinação dos elementos presentes nas amostras.

3.1.5 Difração de Raios X

A difração de Raios X (DRX) é a técnica que revela informações estruturais, como composição química, estrutura do cristal, tamanho do cristalito, orientação preferida e espessura da camada (GOMES, 2015). O ensaio foi realizado através do aparelho Shimadzu XRD-6000, com radiação de $\text{Cu-K}\alpha$ e ângulo de varredura (2θ) de

0° a 80°, para identificação das fases mineralógicas presentes.

3.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A fibra natural e a cinza foram analisadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram registradas imagens de alta resolução com magnificação de 100x, 500x, 1000x, 2000x e 5000x do tamanho real do material, para observação das características microestruturais. O procedimento de preparação da amostra consistiu no processo de metalização das amostras por 4 min por fina camada de ouro, que posteriormente foram levadas para o MEV.

3.2 Ensaios tecnológicos no concreto

A determinação do traço de referência do concreto foi realizada seguindo os critérios estabelecidos na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Após a definição dos materiais e cálculo dos parâmetros, obteve-se o traço de referência: 1 : 2,17 : 2,22 : 0,57. O resumo dos parâmetros adotados e calculados estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo dos parâmetros		
Parâmetros adotados e calculados		
Dmax agregado	Mm	9,50
Módulo de finura da areia	--	2,20
Massa espec. areia (pm)	kg/m ³	2673
Massa espec. brita (pb)	kg/m ³	2683
Massa espec. cimento (pc)	kg/m ³	3100
Massa unitária brita (Mu)	kg/m ³	1450
Massa espec. água (pa)	kg/m ³	1000
Slump pretendido	mm	60-80
Resist. característica (Fck)	Mpa	20,00
Resistência média (Fcj)	Mpa	26,60
Resistência do Cimento	Mpa	32,00
Relação (a/c)	--	0,57

Fonte: Elaboração própria.

A mistura dos materiais para confecção dos concretos foi executada manualmente. Os ensaios de absorção de água por imersão e de resistência à compressão foram executados em corpos de prova de concreto de formato cilíndricos de 10 cm x 20 cm, e moldados conforme critérios estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram 4 tratamentos ao todo, considerando o traço de referência, substituições em massa de 3%, 5% e 7% de cimento por cinzas. Em cada tratamento, foram confeccionadas 4

amostras, para a realização dos ensaios de consistência do concreto (*Slump Test*), absorção de água e resistência à compressão.

3.2.1 Consistência do concreto (*Slump Test*)

O ensaio do abatimento do concreto, também conhecido como *Slump Test*, foi realizado para verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, buscando medir sua consistência. O ensaio de consistência foi realizado conforme procedimentos estabelecidos na NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio foi realizado em todos os tratamentos propostos na pesquisa, visando observar a influência da substituição parcial do cimento por cinzas nos percentuais definidos.

3.2.2 Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme procedimentos estabelecidos na NBR 9778 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado em 4 corpos de prova por traço proposto. Após 14 dias submersos, os corpos de prova foram retirados da água e pesados. Depois foram colocados na estufa por 24h e, posteriormente, pesados. Retornaram para a estufa por mais 24h e, novamente, pesados. Como a variação de massa foi inferior aos limites previstos na norma, foram feitos os cálculos de absorção.

3.2.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado na prensa elétrica da marca Forttest, modelo FT 01, N/S 0173, com capacidade de 200 tf, conforme procedimentos estabelecidos na NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio foi realizado em 4 CPs por tratamento e com idade de rompimento de 28 dias. A técnica utilizada para nivelamento das faces dos CPs foi o neoprene.

4 Resultados da pesquisa

4.1 Resultado das análises físico-químicas

4.1.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica média da cinza produzida está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica da cinza			
Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Massa ret. Acum. (g)	% Retido acum.

0,600	0	0	0,00%
0,300	0	0	0,00%
0,150	98,2	98,2	32,76%
0,075	96,6	194,7	64,99%
fundo	104,9	299,6	100,00%

Fonte: Elaboração própria.

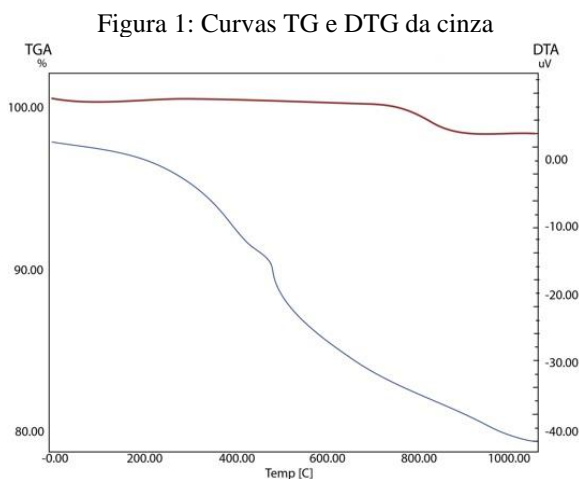
Observando-se a Tabela 2, verifica-se que as partículas das cinzas ficaram retidas apenas a partir da peneira 0,15 mm, correspondendo a 32,76% das cinzas; na peneira 0,075 mm, ficaram retidas 32,23%; e, passando para o fundo do conjunto de peneiras o percentual de 35,01%. O módulo de finura da cinza calculado é de 0,33.

4.1.2 Massa específica da cinza

Quanto ao resultado da massa específica da cinza, para uma amostra testada de 50 g, a leitura no frasco de Le Chatelier foi de 23,8, chegando ao resultado de massa específica de 2,1 g/cm³. Em relação a massa específica do cimento, a cinza representa 67,7%.

4.1.3 Análise Termogravimétrica

A Figura 1 apresenta as curvas termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG).



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se, na Figura 1, que o material não apresenta perda de massa até a temperatura de 800 °C. Apenas acima dessa temperatura, nota-se pequena variação da massa até a temperatura de 1000 °C, indicando que a temperatura de queima por combustão realizada nas cascas do coco foi em torno de 800 °C.

4.1.4 Fluorescência de Raios X

Os dados referentes à composição química da cinza gerada estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química da cinza

Fórmula composta	Concentração (%)
CaO	37,77
Fe ₂ O ₃	34,04
SiO ₂	11,67
SO ₃	4,58
MgO	3,71
K ₂ O	2,95
Al ₂ O ₃	1,99
P ₂ O ₅	1,44
ZnO	0,67
CuO	0,57

Fonte: Elaboração própria.

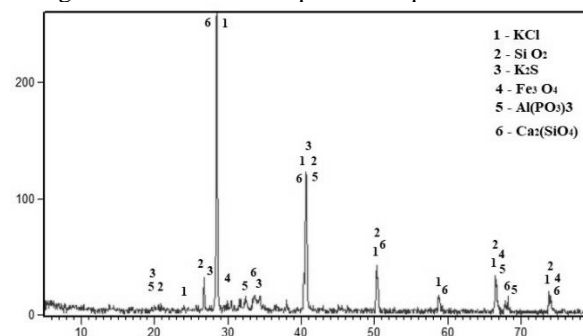
A Tabela 3 demonstra a predominância dos componentes químicos: Óxido de cálcio, com 37,77%; Óxido de ferro, com 34,04% e Dióxido de silício, com 11,67%. Outros componentes químicos que se destacam são: Óxido sulfúrico, com 4,58%; Óxido de magnésio, com 3,71% e o Óxido de potássio, com 2,95%.

Segundo estudos desenvolvidos por Mehta e Monteiro (2014), os óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃ estão entre os principais componentes químicos da composição do cimento, sendo o elemento de maior concentração, o CaO. O que aponta para fator positivo nas reações entre as cinzas e o cimento no concreto.

4.1.5 Difração de Raios X

Verifica-se, na Figura 2, que o composto químico mais abundante consiste no Cloreto de Potássio (KCl) com picos chegando à intensidade de 250 cps; e; com picos bem menos intensos, observa-se o Quartzo (Si O₂), Silicato de cálcio Ca₂ (SiO₄) e Magnetita (Fe₃ O₄).

Figura 2: DRX da cinza produzida por combustão



Fonte: Elaboração própria.

Percebe-se a partir da figura 2, a presença de seis compostos químicos identificados na cinza. Em alguns picos verifica-se a presença de mais de um composto. No pico de maior intensidade foi verificado a presença de Cloreto de Potássio (KCl), de Belita e Silicato de Cálcio ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$).

Segundo Centurione (1999), o início da formação da Belita ($2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$) ocorre em temperaturas entre 700°C e 900°C . Apesar da queima dessa cinza ter ocorrido sem controle de temperatura, pela formação do composto químico Belita, parte do SiO_2 reage com o CaO disponível para sintetizar esse silicato de cálcio de baixa temperatura, e, pela análise curva termogravimétrica (TG) da cinza, verifica-se que a temperatura aproximada da produção da cinza foi acima de 800°C .

A Tabela 4 apresenta análise semiquantitativa dos compostos químicos identificados por DRX.

Tabela 4: Compostos químicos por DRX

Nome do composto	Fórmula química	Semi quant. (%)
Cloreto de Potássio	K Cl	28
Quartzo	Si O ₂	26
Silicato de cálcio	Ca ₂ (SiO ₄)	21
Fosfato de Alumínio	Al (PO ₃) ₃	11
Sulfeto de potássio	K ₂ S	7
Magnetita	Fe ₃ O ₄	7

Fonte: Elaboração própria.

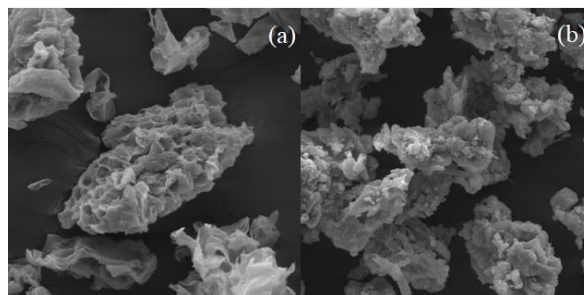
Na Tabela 4, observa-se que como compostos químicos mais abundantes na cinza o KCl com 28%, em seguida temos o SiO_2 com 26%, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ com 21%, e os compostos menos abundantes, temos: Fosfato de Alumínio Al (PO₃)₃ com 11%, Sulfeto de potássio (K₂ S) com 7% e Magnetita (Fe₃ O₄).

A Formação da fase belita (de abreviação C2S), quando hidratado forma C-S-H, resultou em ajuda na elevação da resistência mecânica dos concretos produzidos com a cinza.

4.1.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 3 apresenta o resumo dessas imagens geradas, sendo a parte (a) da Figura 3 a fibra natural com magnificação de 500x; a parte (b) da Figura 3 a cinza gerada por queima por combustão com magnificação de 500x.

Figura 3: Micrografias com aumento de 500x. (a) - Fibra natural; (b) - cinza



Fonte: Elaboração própria.

Observando as imagens da Figura 3, foi possível perceber as características da superfície dos grãos, que apresenta morfologia porosa, reforçando o motivo da menor densidade da cinza, quando comparado com os agregados e cimento, constatando que a estrutura da superfície do material mantém-se bastante semelhante tanto nas fibras em estado natural como na cinza.

No estudo realizado por Moura (2014), também foi observada a porosidade e a rugosidade da superfície do material, sendo destacado que a morfologia superficial do material está diretamente relacionada às capacidades de adesão e homogeneização com a matriz polimérica.

4.2 Ensaios tecnológicos do concreto

4.2.1 Consistência do concreto (*Slump test*)

Considerando os traços previstos no estudo, foi realizado ensaio de consistência do concreto, antes de serem moldados os CPs. O traço de referência alcançou o *Slump* pretendido no cálculo, ficando entre 60 mm e 80 mm de abatimento de tronco de cone. A Tabela 5 apresenta o abatimento medido no ensaio.

Tabela 5: Consistência do concreto (*Slump test*)

Traço	Abatimento de tronco de cone (mm)
Traço de referência	60
Substituição cinza (3%)	60
Substituição cinza (5%)	55
Substituição cinza (7%)	45

Fonte: Elaboração própria.

Pode-se verificar, a partir da Tabela 5, que a incorporação de cinza interferiu na consistência do concreto. Observa-se tendência de aumento da consistência do concreto com o aumento da cinza incorporada, obtendo diferença de 25% no abatimento do tronco de cone quando a substituição foi de 7% em relação ao traço de referência.

4.2.2 Absorção de água por imersão

A partir dos registros de massa dos CPs, após 14 dias submersos e secagem na estufa, foram gerados os dados apresentados na Tabela 6, referentes aos valores de absorção de água.

Tabela 6: Absorção de água dos CPs

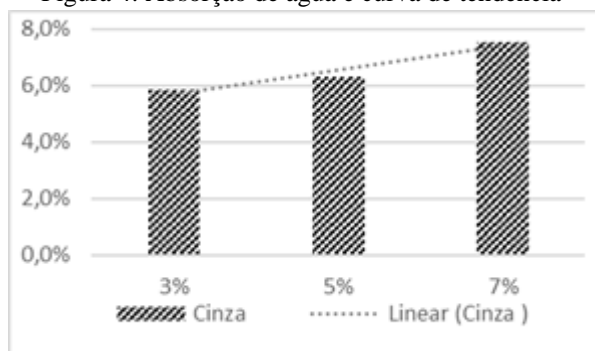
Traço	Absorção de água (%)	Média absorção (%)
Referência - CP 01	7,62%	7,78%
Referência - CP 02	7,98%	
Referência - CP 03	7,98%	
Referência - CP 04	7,53%	
Cinza - 3% - CP 01	5,73%	5,85%
Cinza - 3% - CP 02	5,88%	
Cinza - 3% - CP 03	5,92%	
Cinza - 3% - CP 04	5,88%	
Cinza - 5% - CP 01	6,52%	6,31%
Cinza - 5% - CP 02	6,38%	
Cinza - 5% - CP 03	6,27%	
Cinza - 5% - CP 04	6,05%	
Cinza - 7% - CP 01	7,72%	7,56%
Cinza - 7% - CP 02	7,52%	
Cinza - 7% - CP 03	7,47%	
Cinza - 7% - CP 04	7,52%	

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 demonstra a variação de absorção nos traços que utilizaram as cinzas produzidas por combustão de 5,85% para substituição de 3%, 6,31% para substituição de 5%, e 7,56% para substituição de 7%, ficando abaixo do valor do traço de referência que foi de 7,78%.

A Figura 4 apresenta as informações de absorção de água de forma resumida, onde se verifica tendência de aumento na absorção de água dos CPs, diretamente associada ao aumento da substituição do cimento por cinzas no concreto.

Figura 4: Absorção de água e curva de tendência



Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Resistência à compressão

Após os 28 dias de moldados, os CPs foram rompidos na prensa elétrica. A Tabela 7 apresenta os valores das resistências à compressão e respectivas médias em MPa para cada traço proposto.

Tabela 7: Resistência à compressão do CPs

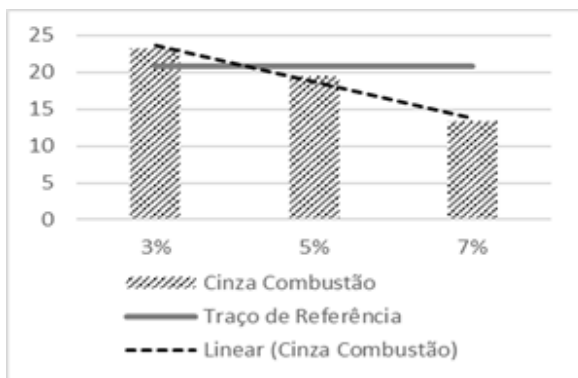
Tratamentos	Resistência à compressão	Resistência Média (Mpa)
Traço de Referência	20,13	20,75
	21,70	
	21,15	
	20,03	
3% cinza	23,06	23,28
	23,18	
	23,79	
	23,10	
5% cinza	19,03	19,47
	20,50	
	18,81	
	19,54	
7% cinza	13,29	13,44
	14,04	
	12,74	
	13,71	

Fonte: Elaboração própria.

A partir da Tabela 7, pode-se verificar que a resistência característica (F_{ck}) para o traço de referência proposto foi atendida, alcançando o valor médio de 20,75 MPa.

A cinza produzida com substituição de 3% obteve resistência média superior ao valor de referência em 12,19%, ficando a resistência em 23,28 MPa. Já, no percentual de substituição de 5%, obteve-se perda de resistência de 6,67% em relação ao traço de referência. Na substituição de 7% de cimento por cinzas, obteve-se resistência média de 13,44 MPa, o que representa perda de 35,3% em relação ao valor de referência.

Figura 5: Resistência à compressão dos CPS e curva de tendência



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5 apresenta as informações de resistência a compressão de forma resumida, onde se verifica tendência de diminuição da resistência dos CPs, associada ao aumento da substituição do cimento por cinzas no concreto.

5 Conclusões/Considerações

Quanto à consistência do concreto no estado fresco, verificou-se que a substituição do cimento por cinzas alterou a trabalhabilidade da mistura, deixando o concreto mais seco quanto maior fosse o percentual de substituição.

Referente à composição das cinzas, os compostos identificados em maior abundância foram: KCl, SiO₂, Ca₂ (SiO₄), e os compostos menos abundantes, temos: Fosfato de Alumínio Al (PO₃)₃, Sulfeto de potássio (K₂ S) e Magnetita (Fe₃ O₄).

A absorção de água por imersão foi maior, quanto maior o percentual de cinzas incorporadas, variando de 5,85% a 7,56% de absorção para as substituições de cinzas feitas.

Quanto a resistência à compressão, os melhores resultados de resistência foram obtidos quando houve substituição de 3% de cimento por cinzas, com aumento de 12,19% em relação à resistência do traço de referência.

Portanto, referente à aplicação das cinzas da casca do coco como adição mineral, verificou-se potencialidades, tanto nos aspectos relacionados à absorção de água, quanto à resistência à compressão em percentuais abaixo de 5% de substituição do cimento pela cinza.

Sendo o cimento o insumo mais caro do concreto e o maior gerador de impactos ambientais relacionados à produção, verificar a viabilidade de substituição parcial do cimento por subproduto, que está sendo desperdiçado nos terrenos dos sítios produtores de coco no litoral Sul alagoano, caracteriza-se em importante

contribuição para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre a temática.

Sugere-se aprofundar os estudos de substituição parcial do cimento pela cinza, para melhor entendimento das características e efeitos dessa aplicação, que favoreceram e melhoraram a resistência à compressão em percentuais abaixo de 5%. Sugere-se, também, ser estudado o efeito da substituição parcial do agregado miúdo pelas cinzas, visando verificar os efeitos resultantes.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739 - Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11172 - Aglomerantes de origem mineral - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 16605 - Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16889 - Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ALMEIDA, R. R. P; SILVA, M. A; CHAVES, A.D. C. G; Identificação e análise dos impactos ambientais gerados na indústria da construção civil. **INTESA**, v. 9, n. 1, p. 39-46, Jan.-Jun., 2015.

BONATO, M. M. **Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco – Soerguimento das áreas

tradicionais do Nordeste. **Caderno Setorial ETENE**. Ano 5, Nº 127, agosto, 2020.

CABRAL, M. M. S. *et. al.* Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **ENGEVISTA**, V. 19, n.1, p. 99-108, Janeiro 2017.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Carlos, n. 55, p.18-32, 2009.

CAVALCANTE, L. V. A modernização da produção brasileira de coco e a racionalidade do capital. **Ateliê Geográfico** - Goiânia-GO, v. 11, n. 3, dez./2017, p. 235-254.

CENTURIONE, S. L. **A mineralização do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1999.

CORRADINI, E. *et al.* Composição Química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Rev. Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 31, n. 3, p.837-846, setembro, 2009.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v.1. São Paulo, SP: IBRACON, 2005. Cap. 12, p. 345 – 379.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Rumo à Economia Circular: O racional de negócio para acelerar a transição**, 2015. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: agosto de 2021.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. 2017. Disponível em: <<https://ellenmacarthurfoundation.org>>. Acesso em: agosto de 2021.

GOMES, Pedro B. **Caracterização de materiais: uma abordagem das possibilidades**

de algumas técnicas instrumentais. Universidade Federal de São João Del Rei, 2015.

IBGE. **Produção agrícola municipal - lavoura permanente** - 2017 Disponível em: <http://cod.ibge.gov.br/1JIN2>. Acesso em: 2 fev. 2019.

LUZ, B. **Economia circular Holanda Brasil: da teoria à prática**. 1ª edição. Rio de Janeiro, 2017.

MATOS, S. R. C.; GUIMARÃES, C. C. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento portland em argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Vol 13 - nº 1, pág 251 – 269, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2014.

PADILLA, E.R.D. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: Caracterização Físico – Química e produção de carvão para energia**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

PADILLA, E. R. D. *et al.* Potencial Energético da Casca de Coco (Cocos nucifera L.) para Uso na Produção de Carvão Vegetal por Pirólise. **Rev. Virtual Química**, ed. 10 (2), p. 334-345, 2018.

RODRIGUES, P. P. M. Parâmetros de Dosagem do Concreto. **Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP**, ed. 3, São Paulo, 1998.

ROYER, B.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; RODRIGUES, G. Efeito da Aplicação do Poliestireno Sulfonado (PSSNa) como Aditivo em Argamassas e Concretos de Cimento Portland CPV32. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 63-67, 2005.

SCHWAAB, S. **Efeito da adição de aditivo plastificante retardador de pega nas propriedades de concretos usinados de cimento Portland usando planejamento fatorial**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015.