



UFRPE

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

JOSÉ HENRIQUE DA SILVA

Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de
lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

JOSÉ HENRIQUE DA SILVA

Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física

Área de concentração: Materiais
Orientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda
Coorientador: Prof^a Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

Cabo de Santo Agostinho – PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i

Silva, José Henrique da
Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto / José Henrique da Silva. - 2021.
119 f. : il.

Orientador: Romildo Morant de Holanda.
Coorientadora: Fernanda Wanderley Correa de Araujo.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, 2021.

1. Compósito. 2. Cinza de biomassa. 3. Lavanderias. 4. Algaroba. 5. Carbonato de cálcio. I. Holanda, Romildo Morant de, orient. II. Araujo, Fernanda Wanderley Correa de, coorient. III. Título

CDD 621

JOSÉ HENRIQUE DA SILVA

Incorporação de cinza de biomassa, decorrente da queima em caldeiras de lavanderias de jeans do agreste de Pernambuco, no concreto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física

Aprovada em: 03/03/2021

Banca Examinadora

Orientador – Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda

Coorientadora – Profª Dra. Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

Examinadora externa – Profª Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette

Examinador interno – Prof. Dr. Marcos Gomes Ghislandi

Dedico este trabalho aos meus pais, que foram fundamentais na minha formação social, e aos meus ancestrais, que deram o sangue e a vida para que hoje eu pudesse ser mestre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao autor do universo por mais essa conquista, por iluminar os meus passos e zelar pela minha vida.

À minha família, por todo apoio, confiança e carinho. Sou o primeiro a dar um passo maior nesse universo educacional e espero ser inspiração para que os mais novos levem o nosso sangue para o mais alto que conseguirem alcançar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Romildo Morant, pela dedicação, disponibilidade, confiança, amizade e experiências compartilhadas; e à minha Coorientadora Prof^a Dra. Fernanda Wanderley, por todo apoio, acolhimento e contribuições fundamentais para a realização do projeto.

Aos amigos, por toda torcida e positividade. Em especial: Matheus Mariano, por me incentivar a fazer a seleção do programa; João Neto e Isadora Lima, por toda energia trocada; Eullys Alves e Ricardo Júnior, pelas trocas de conhecimentos; Jéssica Beatriz, Robson Vieira, Sebastião Pinto e Aline Melo, pela irmandade construída ao longo do programa; e Leonardo Santiago, Alisson Torquato e Roberta Costa, pela disponibilidade em cooperar nessa minha trajetória.

Ao PPEngFis, por todo suporte e dedicação. Em especial: Prof^a Dra Martine Chevrollier, nossa coordenadora; Prof^a Dra Verônica Diniz, Prof. Dr. Albert Ocas e Prof. Dr. Vinícius Dantas, pela ajuda fundamental na construção dessa pesquisa; e aos demais docentes do programa, bem como os secretários que por ele passaram.

Aos companheiros do CITAR, o nosso grupo de pesquisa, pela cooperação e disponibilidade. Em especial: Jackson José, Ana Luiza, Paulo Ferraz e Átyla Rego.

À Indústria Elizabeth Cimentos e Lavanderia Nossa Senhora do Carmo, pelo fornecimento dos insumos para a pesquisa. Em especial: os Srs. Degmar Peixoto, Vilmar Manoel e José Ailton, representando o grupo Elizabeth; e a Srta. Jacqueline Macêdo, representando a lavanderia.

À UFRPE (sede) e UACSA, pela disposição de suas estruturas. Em especial: o Laboratório de Materiais de Construção e o Laboratório de Caracterização de Materiais.

À CAPES, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

O estado de Pernambuco se destaca no cenário nacional como um importante polo do setor de confecções, pelas atividades industriais exercidas no Arranjo Produtivo Local do Agreste do estado. Dentro deste contexto estão as lavanderias de *jeans*, responsáveis pelo beneficiamento das peças e que dependem de uma grande geração de vapor para os seus processos. As lavanderias consomem quantidades expressivas de lenha por mês para a combustão em caldeiras, gerando como resíduo secundário a cinza de biomassa, que tem se mostrado um problema quanto à sua destinação, devido aos descartes irregulares na região. Este trabalho tem por objetivo estudar a incorporação da cinza de biomassa, proveniente da caldeira de uma lavanderia do Agreste de Pernambuco, na produção de concreto para fins estruturais. Para a realização do trabalho, a cinza foi coletada em uma lavanderia localizada em Caruaru-PE, cuja maior fonte energética é a lenha de algaroba, e foram realizadas as caracterizações químicas e/ou físicas dos componentes do concreto (cimento, areia, brita e cinza), para posterior dosagem dos traços, sendo um traço padrão (convencional) e três traços com a adição de cinza em substituição volumétrica ao cimento, em três proporções: 10, 20 e 40%. Nas caracterizações, foram utilizadas técnicas como a difração de raio-X (DRX), para a determinação mineralógica, e a microscopia eletrônica de varredura (MEV), para a caracterização microestrutural. Após a dosagem do concreto, o material foi produzido, moldado e caracterizado, sendo observada sua consistência no estado plástico e sua resistência e porosidade no estado endurecido, além de ter sua microestrutura avaliada. Conforme os resultados da pesquisa, a cinza de biomassa mostrou ser um potencial *filler* calcário alternativo, devido ao alto teor de carbonato de cálcio (CaCO_3) em sua composição. Foi verificado que os compósitos T10 e T20 se mostraram compatíveis com as exigências da norma técnica brasileira vigente, justificando, assim, suas possíveis aplicações em elementos de estruturas, contudo, a diminuição do teor de cimento provocou uma menor trabalhabilidade na mistura e o acréscimo de água resultou em maior porosidade e menor resistência à compressão do compósito. Também foi verificado o aumento de ocorrência de etringita tardia diante do acréscimo de cinza no material, além da possível influência do tipo de cimento.

Palavras-chave: Compósito. Cinza de biomassa. Carbonato de cálcio. Resistência à compressão. Lavanderias. Etringita tardia.

ABSTRACT

The state of Pernambuco stands out in the national scenario as an important center of the clothing sector, due to the industrial activities executed at the Local Productive Arrangement of the Agreste of the state. Jeans laundries, responsible for processing the garments and depending on a large generation of steam for their processes, are within this context. The laundries consume significant quantities of wood per month for combustion in boilers, generating as secondary residue the biomass ash, which has become a problem regarding its destination, due to the irregular disposal in the region. This work aims to study the incorporation of the biomass ash, from the boiler of a laundry in the Agreste of Pernambuco, in the production of concrete for structure purposes. To conduct the work, the ash was collected from a laundry located in Caruaru-PE, which main energy source is the algaroba wood, and the chemical and/or physical characterizations of the concrete components (cement, sand, gravel and ash) were carried out, for later dosage of the traces, being one standard (conventional) trace and three traces with the addition of ash in volumetric substitution to the cement, in three proportions: 10, 20 and 40%. In the characterizations, techniques such as X-Ray Diffraction (XRD), for mineralogical determination, and Scanning Electron Microscope (SEM), for microstructural characterization, were used. After the concrete dosage, the material was produced, molded and characterized, its consistency being observed in the fresh state and its resistance and porosity in the hardened state, in addition to having its microstructure evaluated. According to the research results, the biomass ash proved to be a potential alternative limestone filler, due to the high content of calcium carbonate (CaCO_3) in its composition. It was also verified that the ash content, reducing the cement content, caused lower workability, higher porosity and lower resistance to compression in the concrete; however, the traces with 10 and 20% of ash were compatible with the requirements of the current Brazilian technical standard, thus justifying its possible applications in structure elements. The increase in occurrence of delayed ettringite due to the addition of ash in the material was also verified.

Keywords: Composite. Biomass ash. Calcium carbonate. Resistance to compression. Laundries. Delayed ettringite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores que variam a resistência mecânica do concreto.	26
Figura 2 – Micrografia da cinza de lenha de Eucalipto, obtida por MEV.	29
Figura 3 – Resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.	32
Figura 4 – Desenho esquemático da Lei de Bragg.	34
Figura 5 – Difrátômetro comercial com configuração clássica de Bragg-Brentano. ..	35
Figura 6 – Esquema do funcionamento do equipamento, com a trajetória do feixe da fonte até o detector.	35
Figura 7 – Representação esquemática dos componentes do MEV.	37
Figura 8 – Interações entre o feixe de elétrons e a amostra.	39
Figura 9 – Estoque de lenha de Algaroba da lavanderia Nossa Senhora do Carmo.	41
Figura 10 – Ensaio de determinação da massa unitária da cinza de biomassa: proveta + resíduo sendo pesados (figura à esquerda) e proveta + resíduo adensado (figura à direita).	42
Figura 11 – Frasco de Le Chatelier + xileno submersos em água (figura à esquerda) e realização da leitura do volume de xileno no frasco (figura à direita).	45
Figura 12 – Leitura do volume do frasco de Le Chatelier contendo xileno + cimento.	46
Figura 13 – Ensaio de determinação da massa unitária do cimento: proveta + cimento sendo pesados (figura à esquerda) e proveta + cimento adensado (figura à direita).	47
Figura 14 – Areia submersa em água (figura à esquerda) e em processo de secagem (figura à direita).	48
Figura 15 – Ensaio de tronco cônico: areia com umidade superficial (foto à esquerda) e areia seca no ponto de saturado superfície seca (foto à direita).	48
Figura 16 – Utilização do frasco aferido em ensaio de massa específica de areia: frasco + areia (foto à esquerda) e frasco + areia + água (foto à direita).	49
Figura 17 – Pesagem do agregado submerso em água.	51
Figura 18 – Registro da massa do recipiente seco (figura à esquerda) e com água (figura à direita).	53
Figura 19 – Balde com os agregados miúdo (figura à esquerda) e graúdo (figura à direita).	54

Figura 20 – Areia no frasco de Chapman para determinação do teor de umidade. ..	57
Figura 21 – Determinação da relação a/c pela curva de Abrams.....	58
Figura 22 – Esquema do ensaio de abatimento.....	60
Figura 23 – Ensaio de abatimento utilizando o limite de 50 ± 10 mm.	60
Figura 24 – Corpos de prova moldados para posteriores ensaios.	61
Figura 25 – Representação do ensaio de compressão.	63
Figura 26 – Preparação das amostras dos concretos para caracterização.....	66
Figura 27 – Amostras no processo de metalização.....	67
Figura 28 – MEV com EDS acoplado, do laboratório de caracterização de materiais da UACSA.....	67
Figura 29 – Cinzas peneiradas para determinação granulométrica.	69
Figura 30 – Difratoograma da cinza de biomassa mista com identificação dos picos. 71	
Figura 31 – Areia peneirada para determinação granulométrica.....	77
Figura 32 – Curva granulométrica da areia.	78
Figura 33 – Brita peneirada para determinação granulométrica.....	82
Figura 34 – Curva granulométrica da brita.	83
Figura 35 – Correlação entre a resistência e o índice de vazios.....	97
Figura 36 – Correlação entre a quantidade de água no traço e o índice de vazios...98	
Figura 37 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T10, com resolução de $100 \mu\text{m}$	99
Figura 38 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T20, com resolução de $50 \mu\text{m}$	99
Figura 39 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T40, com resolução de $100 \mu\text{m}$	100
Figura 40 – Resultado do EDS para o concreto dos traços: a) T10; b) T20; c) T40.	101
Figura 41 – Etringita presente no concreto do traço T10.	102
Figura 42 – Etringita presente no concreto do traço T20.	102
Figura 43 – Etringita presente no concreto do traço T40.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de produção e consumo de cimento por região do Brasil, em 2019.	19
Tabela 2 – Número de fábricas e produção de cimento por estado do nordeste, em 2019.	20
Tabela 3 – Dados sobre as lavanderias industriais no APL do agreste de Pernambuco.	21
Tabela 4 – Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil.....	24
Tabela 5 – Características químicas do CP II-Z.	44
Tabela 6 – Características físicas do CP II-Z.	44
Tabela 7 – Densidade da água.	54
Tabela 8 – Série de peneiras granulométricas.	55
Tabela 9 – Quantitativo de corpos de prova moldados.	62
Tabela 10 – Composição granulométrica da cinza ensaiada.	68
Tabela 11 – FDX da cinza da lenha de Algaroba.	72
Tabela 12 – Composição granulométrica da areia.	76
Tabela 13 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	78
Tabela 14 – Composição granulométrica da brita.	81
Tabela 15 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	83
Tabela 16 – Consumo de água aproximado (L/m ³).	84
Tabela 17 – Volume compactado seco (V _c) do agregado graúdo por m ³ de concreto.	85
Tabela 18 – Dados da dosagem do concreto padrão.....	88
Tabela 19 – Volume real para um saco de cimento.	88
Tabela 20 – Volume real e massa de cada componente para moldagem de um corpo de prova.	89
Tabela 21 – Dosagem para a produção de 26 CPs cilíndricos de concretos por traço.	90
Tabela 22 – Teor de água adicionada para alcance do adensamento estabelecido.	90
Tabela 23 – Resistência característica por exemplar (MPa).	91
Tabela 24 – Estatística descritiva dos traços.	93
Tabela 25 – Análise de Variância para os traços.	94

Tabela 26 – Teste de Tukey entre os traços.....	95
Tabela 27 – Valores de absorção, índice de vazios e massa específica obtidos por indivíduos.....	96
Tabela 28 – Valores médios de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ANM: Agência Nacional de Mineração;
ANOVA: Análise de Variância;
APL: Arranjo Produtivo Local;
CBCA: Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar;
CBM: Cinza de Biomassa Mista;
CNI: Confederação Nacional das Indústrias;
CP: Cimento Portland;
CPs: Corpos de Prova;
CRLA: Cinza Residual da Lenha de Algaroba;
DP: Desvio Padrão;
DRX: Difração de Raio-X;
 F_{ck} : Resistência Característica à Compressão;
FDX: Fluorescência de Raio-X;
GL: Graus de Liberdade;
MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura;
MF: Módulo de Finura;
NBR: Norma Brasileira;
NM: Norma Mercosul;
QM: Quadrado Médio;
SEBRAE: Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas;
SNIC: Sindicato Nacional da Indústrias do Cimento;
SQ: Soma dos Quadrados.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1 O CENÁRIO DAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS E DE CIMENTO	19
3.1.1 Panorama da indústria cimentícia no Brasil	19
3.1.2 O setor têxtil no Brasil e o arranjo produtivo local (APL) do agreste de Pernambuco ..	20
3.1.3 As lavanderias industriais no APL	21
3.2 MATERIAIS DE MATRIZ CIMENTÍCIA	22
3.2.1 Cimento Portland	22
3.2.2 Concreto	25
3.3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NO CONCRETO	27
3.4 UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE BIOMASSA	28
3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	33
3.5.1 Difração de raio-X	33
3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura	36
4 METODOLOGIA	40
4.1 CINZA DE BIOMASSA MISTA	40
4.1.1 Obtenção da cinza	40
4.1.2 Caracterização físico-química da cinza	41
4.2 CIMENTO PORTLAND	43
4.3 AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO	47
4.3.1 Determinação de massa específica para agregado miúdo	47
4.3.2 Determinação de massa específica para agregado graúdo	51
4.3.3 Determinação de massa unitária dos agregados	53
4.3.4 Determinação de granulometria dos agregados	55
4.3.5 Determinação do teor de umidade do agregado miúdo	56
4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO	57
4.4.1 Dosagem do concreto	58
4.4.2 Mistura do concreto	59
4.4.3 Determinação de abatimento do concreto	59
4.4.4 Produção dos corpos de prova (CPs)	61
4.4.5 Ensaio de resistência à compressão	62
4.4.6 Controle estatístico do ensaio de compressão	64

4.4.7 Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica	65
4.4.8 Análise morfológica e de composição do corpo de prova rompido	66
5 RESULTADOS	68
5.1 CARACTERIZAÇÕES DA CINZA DE BIOMASSA MISTA	68
5.1.1 Determinação da composição granulométrica da cinza	68
5.1.2 Determinação da massa unitária compactada da cinza	70
5.1.3 Determinação da composição mineralógica da cinza	70
5.2 CARACTERIZAÇÕES DO CIMENTO PORTLAND	72
5.2.1 Determinação da massa específica do cimento	72
5.2.2 Determinação da massa unitária do cimento	73
5.3 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO MIÚDO	74
5.3.1 Massa específica da areia	74
5.3.2 Massa unitária da areia	75
5.3.3 Composição granulométrica da areia	76
5.3.4 Teor de umidade da areia	79
5.4 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO GRAÚDO	79
5.4.1 Massa específica da brita	79
5.4.2 Massa unitária da brita	80
5.4.3 Composição granulométrica da brita	81
5.5 ANÁLISES DOS CONCRETOS DESENVOLVIDOS	84
5.5.1 Determinação do consumo de água (C_a)	84
5.5.2 Determinação do consumo de cimento (C)	84
5.5.3 Determinação do consumo de agregado miúdo (C_m) e agregado graúdo (C_b)	85
5.5.4 Determinação do traço	87
5.5.5 Análise da consistência dos concretos	90
5.5.6 Determinação da resistência à compressão dos concretos desenvolvidos e análise estatística dos resultados	91
5.5.7 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos	95
5.5.8 Análise microestrutural do concreto com CBM	98
6 CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS	106
APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T0	116
APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T10	117
APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T20	118
APÊNDICE D – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T40	119

1 INTRODUÇÃO

As indústrias são responsáveis por parte da geração dos resíduos na sociedade; muito em função da grande variedade de atividades industriais; fato que gera uma gama de resíduos, constituindo assim o setor como um dos principais agentes de impacto ao meio ambiente (ORTH; BALDIN; ZANOTELLI, 2014).

A partir disso, vem sendo criados estímulos para uma mudança nos métodos de processamentos industriais, partindo de uma lógica linear para uma lógica circular, onde os recursos naturais explorados são utilizados visando a sua máxima eficiência e os resíduos resultantes são reaproveitados ao máximo, diminuindo a demanda de mais exploração (CNI, 2014).

De acordo com Santos (2015), apesar do setor da construção civil provocar impactos ambientais consideráveis, sobretudo através do consumo de recursos naturais, consumo de energia e produção de resíduos, o setor também possui uma grande capacidade de absorver resíduos diversos em seus processos, principalmente com a incorporação desses resíduos aos materiais de matriz cimentícia, como o concreto e a argamassa, seja como adição mineral ao clínquer ou em substituição aos agregados.

A indústria do cimento, ao longo dos anos, também vem buscando substituir os seus insumos por resíduos, dadas as necessidades de redução de custos e mitigação dos impactos ao meio ambiente, que estão associados ao processo de produção do material.

Lucas e Benatti (2008) destacaram que a reutilização dos resíduos sólidos por parte da indústria da construção civil reduz também os custos relativos ao gerenciamento desses materiais, que, por consequência, induz ao desenvolvimento de tecnologias e materiais alternativos. Estes resíduos deixam de ser destinados aos aterros sanitários e são incorporados na produção de artefatos cerâmicos diversos, como blocos, tijolos, telhas, lajotas, bloquetes e tubos.

Ainda segundo os autores, os resíduos que têm despertado mais interesses por parte dos pesquisadores são os efluentes de estações de tratamento, cinzas volantes, areias de fundição, refulgos de mineração, escórias de forno e resíduos de serragens de granito.

As escórias siderúrgicas, cinzas volantes, argilas calcinadas e *filler* calcário também vem há décadas sendo utilizados como adição mineral na produção de cimento Portland; onde, entre 1990 e 2018, provocou a redução de 80% para 69% da presença de clínquer no material (SNIC, 2020).

Segundo Nascimento *et al.* (2019), o uso do *filler* calcário alternativo como substituto parcial do clínquer, na produção do cimento, reduz o consumo energético e a emissão de dióxido de carbono (CO₂), além de reduzir a exploração de calcário e argila, que são as matérias-primas do clínquer.

No agreste de Pernambuco, destacando as cidades de Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, há uma consolidada e desenvolvida atividade industrial no setor têxtil e de confecções (SILVA *et al.*, 2012). O desenvolvimento desses segmentos da indústria proporcionou também o surgimento de lavanderias industriais na região, principalmente no município de Caruaru, que utilizam a água do rio Ipojuca nas suas atividades, além do consumo de lenha proveniente da região como fonte energética (BEZERRA; FREITAS, 2013).

Como constatado por Nascimento (2014), diariamente, há produção de cinzas pelas lavanderias do agreste pernambucano, resultantes da queima da lenha em caldeiras, e em muitas situações esses resíduos são descartados de forma irregular no solo ou nos cursos de água.

Como observado por Pires (2016), o consumo massivo de lenha também é uma realidade em outras regiões produtivas do estado, como o polo gesseiro do Araripe e o polo de cerâmica, resultando em uma grande produção de cinzas pelas indústrias pernambucanas. Segundo Melo (2012), apenas uma lavanderia de médio porte é capaz de produzir 6.500 Kg de cinzas por mês.

Diante disso, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos para uma melhor destinação desses resíduos, testando a viabilidade de incorporação das cinzas de biomassa na indústria cimentícia como um *filler* calcário alternativo, devido ao alto teor de carbonato de cálcio, diante da já citada capacidade de aproveitamento de resíduos pelo setor.

Esse estudo pode trazer retorno financeiro às lavanderias da região, agregando valor a um material atualmente descartável; possibilidade de resolução de um passivo ambiental, diante dos descartes inadequados do resíduo; e o desenvolvimento de um material compósito mais sustentável, que atenda às normas técnicas.

2 OBJETIVOS

Foram definidos os seguintes objetivos para realização do presente trabalho:

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a incorporação da cinza de biomassa mista (CBM), proveniente da lenha queimada em caldeira de uma lavanderia do Arranjo Produtivo Local (APL) de Confecções do agreste de Pernambuco, na produção de concreto convencional para fins estruturais, como substituição parcial do cimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicamente os componentes para a produção do concreto;
- Caracterizar a composição mineralógica da cinza de biomassa mista, através do método da Difração de Raio-X (DRX);
- Desenvolver o traço para os compósitos com e sem cinza;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos desenvolvidos, seguindo as normas técnicas vigentes;
- Realizar análise estatística dos resultados do ensaio mecânico;
- Avaliar a microestrutura do concreto rompido com adição de cinza, utilizando a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na presente sessão serão abordados os temas que norteiam o desenvolvimento do trabalho, partindo de um embasamento teórico, proveniente de consultas à literatura técnica e científica.

3.1 O CENÁRIO DAS INDÚSTRIAS TÊXTEIS E DE CIMENTO

3.1.1 Panorama da indústria cimentícia no Brasil

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2020), o Brasil conta com 100 fábricas de cimento, distribuídas em 88 cidades, em 24 estados, controladas por 24 grupos empresariais. O setor emprega diretamente cerca de 23 mil pessoas e tem uma capacidade produtiva estimada de 100 milhões t/ano.

Segundo os dados publicados no relatório anual do SNIC (2020), referentes ao ano de 2019, o Brasil teve uma produção de 56.611.000 toneladas de cimento e um consumo aparente de 54.794.000 toneladas. A tabela 1 discrimina os dados citados por região geográfica do país.

Tabela 1 – Dados de produção e consumo de cimento por região do Brasil, em 2019.

Região	Produção (t)	Consumo (t)
Norte	2.138.000	3.269.000
Nordeste	11.618.000	12.050.000
Centro Oeste	6.200.000	5.353.000
Sudeste	27.580.000	24.260.000
Sul	9.075.000	9.862.000

Fonte: Adaptada de SNIC (2020).

A nível de nordeste, os dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (2020) dão conta de que a Paraíba é o estado de maior produção da região, com 2.814.000 toneladas produzidas em 2019.

Em compensação, os estados da Bahia, Ceará e Pernambuco consumiram, respectivamente, 3.246.000 toneladas de cimento, 1.701.000 toneladas de cimento e 1.691.000 toneladas de cimento em 2019, sendo o setor empresarial o maior

consumidor do produto, sobretudo as construtoras e indústria de produção e beneficiamento de concreto. A tabela 2 detalha os dados mencionados.

Tabela 2 – Número de fábricas e produção de cimento por estado do nordeste, em 2019.

Estado	Número de Fábricas	Produção Parcial (t)	Consumo (t)
Paraíba	4	2.814.000	769.000
Ceará	5	2.242.000	1.701.000
Sergipe	3	1.893.000	410.000
Bahia	4	1.176.000	3.246.000
Rio Grande do Norte	3	798.000	563.000
Pernambuco	5	317.000	1.691.000
Maranhão	5	298.000	774.000
Alagoas	2	282.000	395.000
Piauí	1	-	703.000

Fonte: Adaptada de SNIC (2020).

3.1.2 O setor têxtil no Brasil e o arranjo produtivo local (APL) do agreste de Pernambuco

O setor têxtil emprega aproximadamente 1,7 milhões de pessoas diretamente e 4 milhões de pessoas no total, levando em consideração os empregos indiretos, sendo a quarta maior folha de pagamentos da indústria de transformação do país, movimentando em 2011 cerca de \$67 bilhões (sessenta e sete bilhões de dólares), apesar de ainda ser um setor com perfil de empresas familiares de pequeno e médio porte (SILVA, 2016).

Pernambuco é o segundo maior polo de confecções do país, possuindo cerca de 20 mil empresas, que processam juntas cerca de 210 mil toneladas por ano de tecido, produzem cerca de 60 milhões de peças de vestuário por mês (representando 15% da produção nacional) e equivalem a 10% do PIB estadual (GUIMARÃES *et al.*, 2018).

Segundo Melo (2012), o agreste é responsável por 60% da produção têxtil do estado, sobretudo as cidades de Toritama, Santa Cruz do Capibaribe e Caruaru, que integram o APL. Os principais produtos confeccionados na região são o *jeans*, malhas de algodão e vestuários em tecido.

O APL é composto pelas cidades de Agrestina, Brejo da Madre de Deus, Caruaru, Cupira, Riacho das Almas, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Taquaritinga do Norte, Toritama e Vertentes. Das cidades citadas, Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe representam juntas 77% do PIB do arranjo, 77% do total de empresas do ramo, 76% dos postos de empregos do setor, além de possuírem 66% da população da região (SEBRAE, 2013).

Sobre as principais cidades, Toritama tem se destacado por ser a segunda maior produtora de *jeans* do país, abrigando cerca de 1000 fábricas que geram em torno de 60 mil empregos, sendo 15 mil diretos. Considerando também as cidades de Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Surubim, os empregos passam dos 360 mil, onde 120 mil são diretos (SEBRAE, 2019).

3.1.3 As lavanderias industriais no APL

Ribeiro e Tavares (2018) definem as lavanderias industriais como o segmento do setor têxtil responsável pelo acabamento e efeitos visuais do tecido, alterando a textura e a forma das peças, além de se preocupar em atender os parâmetros definidos pelos estilistas.

Guimarães *et al.* (2018) apontam que no APL do agreste pernambucano há cerca de 175 lavanderias industriais, das quais processam mensalmente 4,8 milhões de peças de *jeans*, o equivalente a 5,3 mil toneladas. A concentração de lavanderias industriais está nas cidades de Caruaru, Toritama, Riacho das Almas, Vertentes e Surubim, dados que estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Dados sobre as lavanderias industriais no APL do agreste de Pernambuco.

Cidade	Total de Lavanderias (%)	Roupas Processadas (t/mês)
Caruaru	33	1.848
Toritama	30	1.708
Riacho das Almas	18	223
Vertentes	15	395
Surubim	4	122

Fonte: Adaptada de Guimarães *et al.* (2018)

Associado às atividades das lavanderias está o alto consumo de biomassa como fonte energética para as caldeiras, principalmente o consumo de lenha e carvão. Guimarães *et al.* (2018) destacam que essas duas fontes energéticas representam entre 25% e 30% da matriz energética do Nordeste, gerando cerca de 90.000 empregos diretos na zona rural com atividades florestais.

Segundo Bazzo (1995), devido ao alto calor específico, o vapor é empregado em variadas atividades industriais, seja para aquecimento ou para acionamento mecânico, dentre as quais se destacam as indústrias de alimentos, bebidas, têxtil, metalúrgica, papel e química; e nesse contexto estão as lavanderias, que necessitam do vapor produzido pelas caldeiras em seus variados processos.

Para geração de vapor, as lavanderias do agreste de Pernambuco consomem em média 2,82 st (metro estéreo) de lenha por tonelada de tecido processado, o que equivale a aproximadamente 10.000 st de lenha por mês; consumo que corresponde a 1.000 ha de área desmatada mensalmente (GUIMARÃES *et al.*, 2018).

Ainda segundo os autores, o custo médio da lenha na região varia entre R\$100,00/m³ e R\$120,00/m³, sendo a lenha legalizada da vegetação nativa responsável por atender apenas 13,7% da demanda do setor, enquanto a maior parcela vem da lenha de desmatamento autorizado, onde se destaca a Algaroba (*Prosopis juliflora*), espécie bastante explorada nos estados de Pernambuco e Paraíba.

3.2 MATERIAIS DE MATRIZ CIMENTÍCIA

3.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um material aglomerante de baixo custo, boa durabilidade, boa resistência à compressão, baixa resistência à tração, ruptura frágil e baixa capacidade de deformação, que sofre reações químicas ao ter contato com a água, sendo também conhecido como cimento hidráulico (RODRIGUES, 2015).

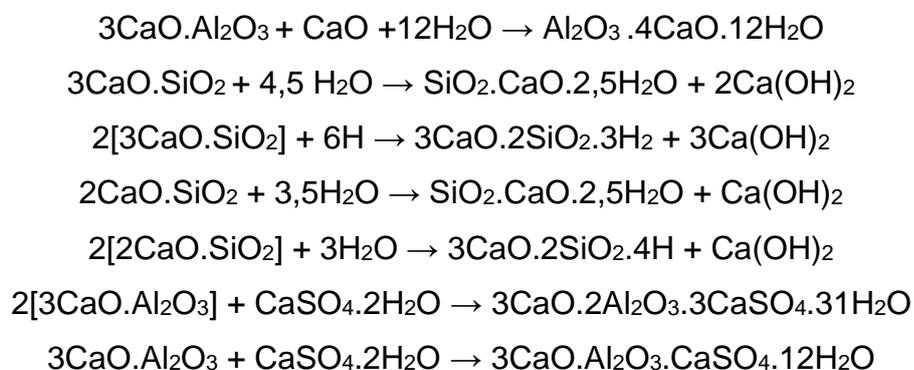
É obtido através da moagem e mistura, em proporções adequadas, de argila e calcário, submetidos ao aquecimento em forno rotativo, em aproximadamente 1400°C; processo conhecido como calcinação, cujo material resultante é o clínquer (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016). Conforme os autores, o clínquer é moído na forma de um pó muito fino e misturado a uma pequena quantidade de gesso

(CaSO₄.2H₂O), que segundo Rodrigues (2015) corresponde de 3% a 5% em massa, atuando como retardante no processo de pega (endurecimento) do aglomerante.

É constituído por óxido de cálcio ou cal (CaO); óxido de silício ou sílica (SiO₂); óxido de alumínio ou alumina (Al₂O₃); óxido de ferro (Fe₂O₃); baixa quantidade de óxido de magnésio ou magnésia (MgO); pequenos teores de anidrido sulfúrico (SO₃); e em menores proporções: óxidos de potássio (K₂O), óxido de sódio (Na₂O), óxido de titânio (TiO₂), óxido de manganês (Mn₃O₄), anidrido fosfórico (P₂O₅) e impurezas (BAUER, 2008).

Segundo Bauer (2008) e Cunha (2020), a composição do cimento Portland, devido ao processo de formação do clínquer, estabelece quatro fases cristalinas: a alita, silicato tricálcico ou C₃S (3CaO.SiO₂); a belita, silicato bicálcico ou C₂S (2CaO.SiO₂); a celita, aluminato tricálcico ou C₃A (3CaO.Al₂O₃); e a brownmillerita, ferro aluminato tetracálcico ou C₄AFe (4CaO. Al₂O₃.Fe₂O₃).

Kanning (2013) explica que o processo de hidratação do cimento se dá pela hidrólise da pasta (cimento + água); num primeiro momento pelos aluminatos e posteriormente pelo aumento da resistência dos silicatos, conferindo o enrijecimento; conforme as reações químicas a seguir:



Conforme o autor, na hidratação do cimento, o gesso atua na plasticidade da pasta, na pega e na resistência dos primeiros três dias; já a alita é responsável pela resistência mecânica da pasta nos primeiros 28 dias, enquanto a belita atua na resistência mecânica após os 28 dias, por ter uma hidratação mais lenta.

Ainda segundo o autor, a celita é responsável pelo calor de hidratação, assim como a alita, e tem uma alta reatividade à água, proporcionando a pega instantânea da pasta, que é controlada pela presença do gesso; já a brownmillerita também

influencia na pega rápida, sendo controlada pelo gesso, porém, o óxido de ferro atua como fundente, fixando a alumina, que é resistente aos sulfatos.

Horas após o início da reação, os silicatos passam por um processo de transformação de fase, resultando em silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), responsáveis pela resistência da pasta a esforços mecânicos (JOHN; CINCOTTO; SILVA, 2003); e portlandita ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), responsável por preencher os espaços ocupados pela água (KANNING, 2013), porém, de fácil lixiviação, favorecendo a porosidade do material (RODRIGUES, 2015).

Para além dessas características, Rodrigues (2015) também destaca que os óxidos constituintes do cimento, a partir dos silicatos e aluminatos, também atuam na estabilidade de volume e têm a função de mineralizadores, o que permite a formação de compostos do cimento na temperatura ambiente.

Existem oito tipos de cimento Portland normatizados no Brasil, cujas diferenças estão na composição e no objetivo da aplicação (BATTAGIN; BATTAGIN, 2011). Na tabela 4 é possível observar um resumo acerca da composição dos diferentes tipos de cimento Portland existentes no Brasil.

Tabela 4 – Tipos de cimento Portland normatizados no Brasil.

Tipo	Sigla	Classes	Clínquer + Gesso (%)	Escória (%)	Pozolana (%)	Filler Calcário (%)
Comum	CP I	25, 32, 40	100	–	–	–
Comum com adição	CP I-S	25, 32, 40	99 - 95	–	1 - 5	–
Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	94 - 56	6 - 34	–	–
Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	94 - 76	–	6 - 14	–
Composto com <i>Filler</i>	CP II-F	25, 32, 40	94 - 90	–	–	6 - 10
Alto-Forno	CP III	25, 32, 40	65 - 25	35 - 70	–	0 - 5
Pozolânico	CP IV	25, 32	85 - 45	–	15 - 50	0 - 5
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	-	100 - 95	–	–	0 - 5
Resistente a Sulfatos	RS	25, 32, 40	Depende do tipo original que é derivado			
Baixo Calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco Estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: Adaptada de Battagin e Battagin (2011).

Segundo Cunha (2020), o cimento do tipo CP II é o de maior demanda no Brasil, representando um consumo de cerca de 98% do mercado.

3.2.2 Concreto

O concreto é o material mais consumido do mundo na atualidade, sendo constituído pela mistura do cimento Portland com água e agregados, podendo ainda conter adições minerais, pigmentos ou reforços (HELENE; ANDRADE, 2010).

Conforme os autores, a pasta formada pela mistura do aglomerante com a água possui uma fluidez capaz de envolver os agregados, em seus diferentes tamanhos e formatos. Essa fluidez permite que o material seja moldado nas primeiras horas, mas com o passar do tempo, a pasta vai adquirindo resistência mecânica, devido à reação química irreversível entre o cimento e a água.

Por outro lado, Giaccio *et al.* (2020) destacam que a diferença de dureza entre o aglomerante e os agregados é responsável por provocar tensões na região de interface desses materiais, onde, majoritariamente, pode resultar no surgimento de fissuras.

Segundo Bastos (2002), a grande aplicabilidade do concreto é resultado de suas propriedades, destacando a boa resistência à compressão, resistência à água, capacidade de moldagem, capacidade de incorporação de reforços contra a tração e o cisalhamento, e baixo custo.

O concreto pode ser encontrado em dois estados físicos: plástico e endurecido. O concreto fresco deve apresentar trabalhabilidade, homogeneidade e coesão; enquanto o concreto no estado endurecido deve apresentar resistência à compressão, à tração e à abrasão, impermeabilidade, elasticidade e durabilidade (MARTINS, 2008).

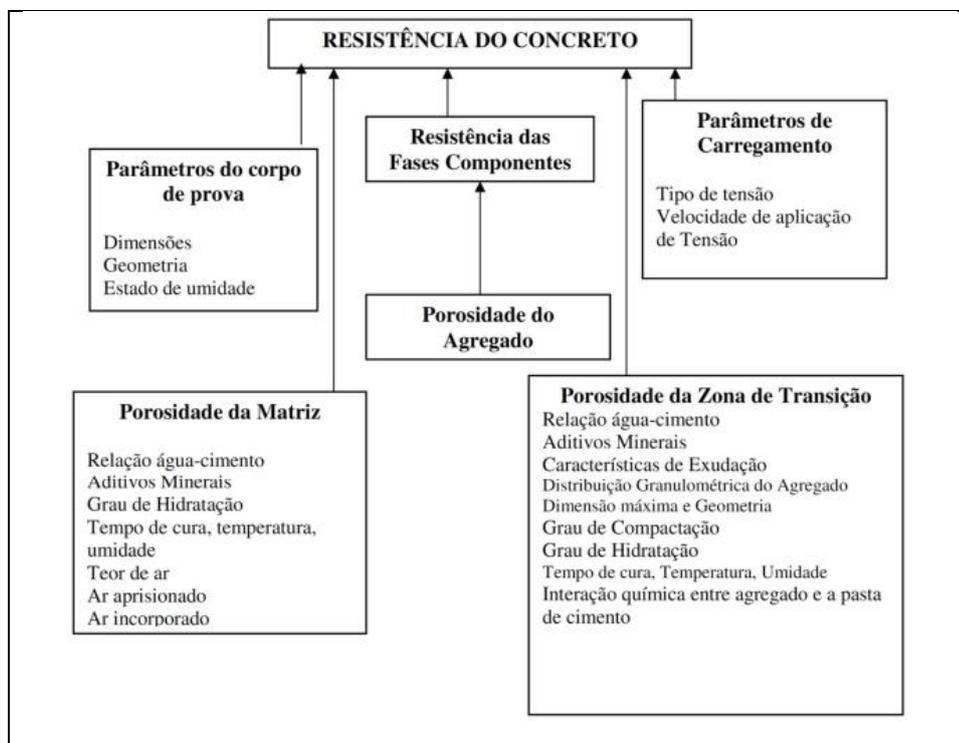
Sabendo que as propriedades do concreto dependem das propriedades dos seus constituintes, a dosagem do concreto é o estudo para obter a melhor proporção entre os materiais constitutivos (traço), podendo ser definida pela massa ou pelo volume dos componentes. Além disso, o estudo deve garantir a economia da operação e observar os insumos disponíveis na região (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Os autores ainda destacam que apesar de haver inúmeros métodos de dosagem conhecidos, todos se relacionam a partir do cálculo da resistência média de

dosagem, da correlação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento (a/c) e da sustentabilidade que norteia o processo.

A resistência à compressão do concreto é medida através da moldagem de corpos de prova com o material, e estes são submetidos a forças axiais em prensas, até o momento do seu rompimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo os autores, a determinação da resistência à compressão é mais recorrente devido à facilidade na operação do ensaio e por outras propriedades estarem relacionadas à esta. A figura 1 mostra os fatores que influenciam a resistência.

Figura 1 – Fatores que variam a resistência mecânica do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Já a relação água/cimento influencia nas propriedades mecânicas do concreto, visto que quanto maior for esta relação, maior será a fluidez, a permeabilidade e a porosidade da pasta de cimento hidratada (LOPES, 1999).

No caso do concreto de alta resistência (CAR), a relação a/c não influencia totalmente na medida de resistência mecânica do compósito, uma vez que, para esse tipo específico de concreto, a resistência, forma e textura dos agregados passam a ser os fatores fundamentais para tal (HELENE; ANDRADE, 2010).

Já o concreto autoadensável (CAA) é um concreto fluido, normalmente moldado *in loco*, sem vibrações, de modo que o material tenha o mínimo de espaços vazios e falhas, sendo as adições químicas as grandes responsáveis por essa característica especial (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como já citado, o concreto pode ser constituído também de aditivos químicos. Segundo Bauer (2008), aditivo é todo material não essencial ao concreto, que pode ser adicionado ao concreto imediatamente antes ou durante a mistura, em pequenas proporções, para reforçar ou fazer aparecer determinadas características.

O autor classifica os aditivos químicos em: modificadores da trabalhabilidade; modificadores da resistência mecânica; modificadores da resistência em condições especiais de exposição; modificadores do tempo de pega; impermeabilizantes; expansores; adesivos; anticorrosivos; e corantes.

Segundo Corrêa (2010), os aditivos químicos mais utilizados no Brasil são os plastificantes (modificadores da trabalhabilidade), que reduzem o consumo de cimento entre 6% e 15%, podendo não alterar a quantidade de água, modificando a consistência do material. O autor relaciona a utilização desses aditivos às indústrias concreteiras e de pré-moldados.

A durabilidade do concreto depende de fatores extrínsecos (condições ambientais) e dos fatores intrínsecos. Essa propriedade está relacionada aos mecanismos de transporte ou penetração de agentes agressivos nos poros do material (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Segundo os autores, a deformabilidade depende do módulo de elasticidade, que está ligado à resistência mecânica, e pode ser medida pelo ensaio descrito na NBR 8522: Concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão (ABNT, 2017a).

3.3 A INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS NO CONCRETO

Apesar de serem vistos como simples materiais inertes, que servem como enchimento no concreto, na realidade, os agregados desempenham importantes funções nos compósitos cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Bauer (2008), agregados são materiais particulados, de diferentes formas e tamanhos, com atividade química quase nula. Podem ser classificados quanto à origem ou quanto ao tamanho dos grãos.

Quanto à origem, Sbrighi Neto (2011) classifica os agregados em: naturais, quando encontrados na natureza sem nenhum beneficiamento; britados, quando submetidos ao processo de cominuição; artificiais, quando são derivados de processos industriais; e reciclados, quando são resíduos industriais granulares de outros materiais.

Já Ambrozewicz (2012) os classifica quanto ao tamanho dos grãos: os agregados miúdos são as areias naturais ou derivadas de britagem, cujos grãos de maior tamanho passam pelo menos 85% na peneira ABNT de 4,8 mm; e os graúdos são os pedregulhos ou britas que passam pela peneira nominal de 152 mm e ficam 85% retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

Segundo Fabro *et al.* (2011), os agregados influenciam nas propriedades do concreto nos estados plástico e endurecido e Ambrozewicz (2012) cita que a mistura entre agregados graúdos e miúdos no material representa cerca de 75% do volume do concreto.

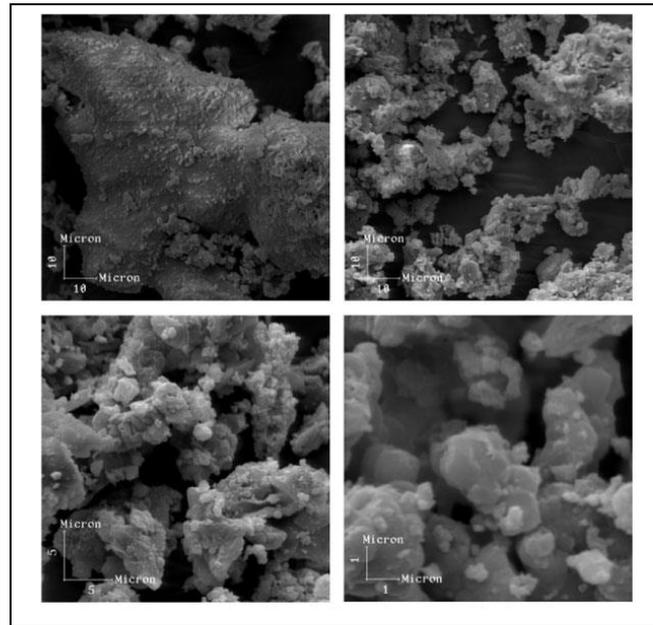
O estado plástico é diretamente influenciado pela porosidade, a massa específica, o teor de umidade, a composição granulométrica, a forma e a textura superficial dos agregados, pois essas características ditam o consumo da pasta de cimento no compósito (FABRO *et al.*, 2011).

Como as propriedades do concreto dependem das propriedades dos seus constituintes, os agregados miúdos atuam na resistência à compressão, durabilidade e trabalhabilidade do material (CUNHA, 2020), enquanto os agregados graúdos influenciam na resistência mecânica e no módulo de elasticidade (POMPEU NETO; OLIVEIRA; RAMOS, 2011).

3.4 UTILIZAÇÃO DAS CINZAS DE BIOMASSA

As cinzas de biomassa ou moinha de carvão são resíduos sólidos pulverulentos provenientes de combustão incompleta de biomassa, em sua maioria para fins energéticos. Possuem em sua composição altos teores de cálcio, silício, potássio e ferro (MORO; GONÇALVES, 1995). Na figura 2, observa-se a micrografia de uma amostra de cinza de lenha de eucalipto.

Figura 2 – Micrografia da cinza de lenha de Eucalipto, obtida por MEV.



Fonte: Borlini et al. (2005).

Em sistemas cimentícios, as cinzas ricas em silicatos podem ser utilizadas como materiais pozolânicos (reativo), enquanto as ricas em compostos calcários podem atuar como *filler* (inerte) (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Também podem conter metais em sua composição e a sua suspensão no ar pode acarretar poluição, trazendo problemas respiratórios à população. Isso faz com que a incorporação desses materiais na indústria da construção civil seja um método importante de mitigação de impactos ambientais, incluindo a redução da extração de calcário e argila, que são a base de produção do clínquer (VASKE, 2012).

Silva *et al.* (2015) destacam que a principal aplicação das cinzas, como alternativa ao armazenamento nas próprias empresas geradoras e ao descarte irregular, tem sido como corretores de solo. Porém, os autores também comentam sobre o risco de contaminação do solo, a depender da composição química do resíduo.

Os autores relatam ainda que a função das cinzas nos materiais cimentícios depende da sua finura, enquanto os efeitos da incorporação nos sistemas cimentícios dependem do tipo de biomassa utilizada e das condições da queima, como o tipo da caldeira e a temperatura empregada.

Esses resíduos possuem a capacidade de interagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante, possuindo potencialidade para serem empregadas como adição mineral em argamassas e concretos (GLUITZ e MARAFÃO, 2013).

Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009) observaram que as cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram atividade pozolânica satisfatória devido ao aumento controlado da temperatura de combustão até o nível de 600°C, além de maior redução do tamanho das partículas.

Costa (2017) concluiu que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em condição natural, finamente moída por sete horas, beneficiada em peneira de malha com abertura de 0,038 mm (#400) e sem tratamento térmico, desenvolve atividade pozolânica satisfatória, em um sistema com metacaulim e cal hidratada.

Vasconcelos (2013) também encontrou altos índices de atividade pozolânica em cinzas de bagaço de cana-de-açúcar calcinadas a 600°C *in natura*. Já Góes (2016) encontrou atividade pozolânica relevante em CBCAs finamente moídas por sete horas, peneiradas em peneiras de malhas #200 e #400 e calcinadas até 400°C, substituindo o cimento em suas pastas.

Anjos *et al.* (2010) adicionaram CBCA em quatro traços de um concreto autoadensável, atuando como um *filler*, e foi verificado que o resíduo proporcionou um concreto mais coeso no estado fluido e melhorou a resistência e diminuiu o índice de vazios no estado endurecido.

Andrade *et al.* (2019) desenvolveram uma membrana de cerâmica porosa para microfiltração, utilizando uma mistura de argila caulínica e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, sendo este o agente porogênio. Os autores observaram que as membranas processadas entre 800°C e 1000°C se mostraram viáveis para aplicação.

Nascimento (2014) utilizou as cinzas de algaroba, provenientes da caldeira de uma lavanderia, para substituir a cal hidratada da argamassa de revestimento, nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%, submetidas ao peneiramento em malha #200. Ele concluiu que nenhuma das proporções estudadas prejudicou as propriedades do material, além de que as cinzas eram ricas em carbonato de cálcio (CaCO₃), assim como a cal.

Melo (2012) coletou cinzas de algaroba do topo e da base de uma caldeira de lavanderia, peneirou o resíduo em malha #200 e as adicionou em argamassa de emboço, nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40% em relação à massa de cimento. O autor verificou que os dois tipos de cinzas não possuíam diferenças significativas e tampouco prejudicaram as propriedades do material desenvolvido, sendo isto atribuído ao efeito *filler* do resíduo, que compactou melhor o sistema.

Pires (2016) desenvolveu uma argamassa de emboço, substituindo o cimento pelas cinzas de algaroba, nas proporções de 5%, 10% e 20%. A autora concluiu que a argamassa com 5% de cinza conservou as características da argamassa convencional, enquanto a argamassa com 10% de cinza proporcionou pequenas alterações nas características, porém, sem prejuízos ao material.

Melo (2012) desenvolveu argamassas substituindo o cimento por cinza residual de lenha de algaroba (CRLA) peneirada, nas proporções de 5%, 7%, 10%, 12% e 15%, concluindo que a utilização de até 10% das cinzas não comprometeu as propriedades da argamassa, porém, só houve um acréscimo na resistência com o teor de 5%.

Mota (2014) avaliou um concreto para pré-moldado, com adição de cinza de algaroba, processado por compactação em prensa hidráulica. O autor adicionou a cinza para melhorar o empacotamento do material, testando proporções entre 5% e 40% em relação à massa do cimento. Concluiu-se que a adição de 20% de cinzas obteve o melhor desempenho, podendo ser um concreto utilizado em distintas aplicações.

Lima (2019) produziu um concreto autoadensável substituindo parcialmente o *filler* calcário convencional por cinza de algaroba, nas proporções de 25%, 50% e 75%, concluindo que a utilização de 50% de cinzas no sistema foi viável, pois melhorou a resistência e a durabilidade, além de que manteve as características do concreto convencional.

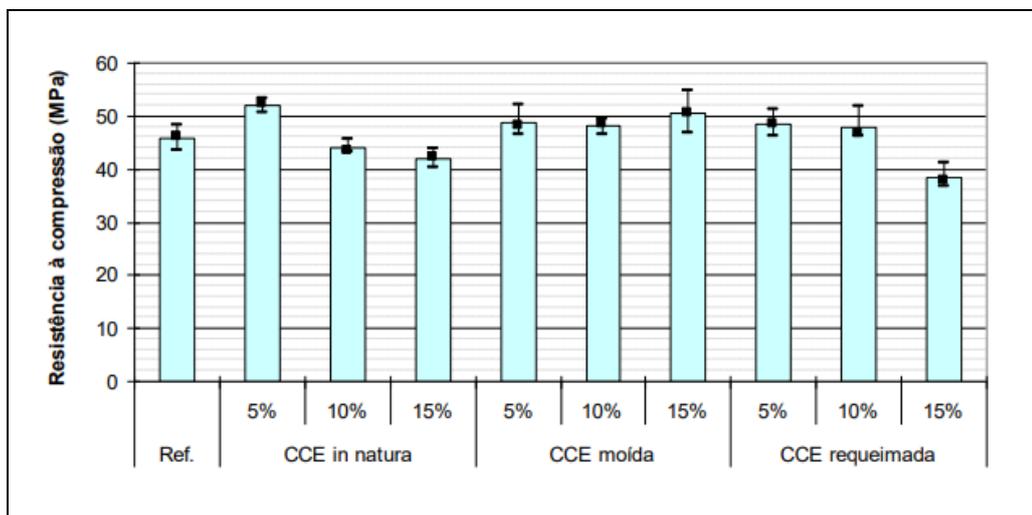
Nascimento *et al.* (2016) utilizaram cinza de lenha de algaroba como adição no concreto, nas proporções de 5%, 10% e 15%, e observaram ser possível aplicar as três proporções estudadas, com as cinzas peneiradas em malha #200, sem proporcionar prejuízos às propriedades do concreto. A cinza reduziu a segregação do material e a adição de 5% melhorou a resistência à compressão e à tração.

Vaske (2012) utilizou cinza de lenha de eucalipto, proveniente de caldeira, como adição mineral na produção de concreto, nas proporções de 15%, 30% e 45%. O autor concluiu que a adição de 15% da cinza melhorou as propriedades físicas e mecânicas do compósito, além dos benefícios econômicos.

Resende (2013) desenvolveu um compósito cimentício substituindo o cimento pela cinza do cavaco de Eucalipto em três proporções. As cinzas utilizadas tiveram processos diferentes de beneficiamento: *in natura*, moída por 12 horas em moinho de bolas e calcinada a 600°C.

Conforme a figura 3, o autor concluiu que a substituição do cimento pela cinza *in natura* obteve melhores resultados de resistência aplicada com proporção de 5%, enquanto as substituições em 10% e 15% diminuíram a resistência. Já a cinza calcinada não se mostrou mais eficiente que a cinza *in natura*, não justificando a aplicação do processo. Apenas a cinza moída apresentou resultados satisfatórios, devido ao incremento de atividade pozolânica.

Figura 3 – Resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias.



Fonte: Resende (2013).

Para além dos tipos já mencionados, existem ainda variados estudos sobre a incorporação em sistemas cimentícios das cinzas das biomassas mais abundantes em determinadas regiões do país, como: cinza da casca da amêndoa do cacau (SILVA *et al.*, 2015), na Bahia; cinza da casca de arroz (TRINDADE, 2011), no Rio Grande do Sul; e cinza do caroço de açaí (Cordeiro *et al.*, 2019), no Pará.

3.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

3.5.1 Difração de raio-X

Em 1895, o raio-X foi descoberto por Wilhelm Roentger e definido como ondas eletromagnéticas de comprimento muito curto, da ordem de 10^{-10} m. Roentgen observou que os elétrons emitiam uma radiação capaz de marcar uma chapa fotográfica quando adquiriam energia cinética suficiente no tubo de raios catódicos. Ele colocou corpos opacos entre o tubo e a chapa fotográfica e observou que a radiação transmitida diminuía com a presença dos materiais, porém, os corpos não conseguiam impedir totalmente a chegada da radiação na placa. Em 1913, Max Von Loue sugeriu que os arranjos regulares dos átomos em um cristal, cujo espaçamento conhecido era de 10^{-10} m, poderiam agir como uma rede tridimensional de difração de raios (JEWETT JUNIOR; SERWAY, 2005).

O raio-X é largamente aplicado em radiografias, na área da medicina, porém, pelo alto poder de penetração, essa radiação também é utilizada em análises de materiais. O raio-X é produzido a partir da desaceleração de uma partícula com alta energia cinética, como por exemplo, quando um elétron de alta energia colide com uma superfície metálica. Henry Bragg e seu filho são os principais responsáveis pelos estudos que levaram as primeiras interpretações de experimentos de difração para cristais de estruturas simples. Posteriormente, ambos desenvolveram um detector de raio-X e, desde então, os experimentos para detecção de estruturas cristalinas se desenvolveram rapidamente (SURYANARAYANA, 2011).

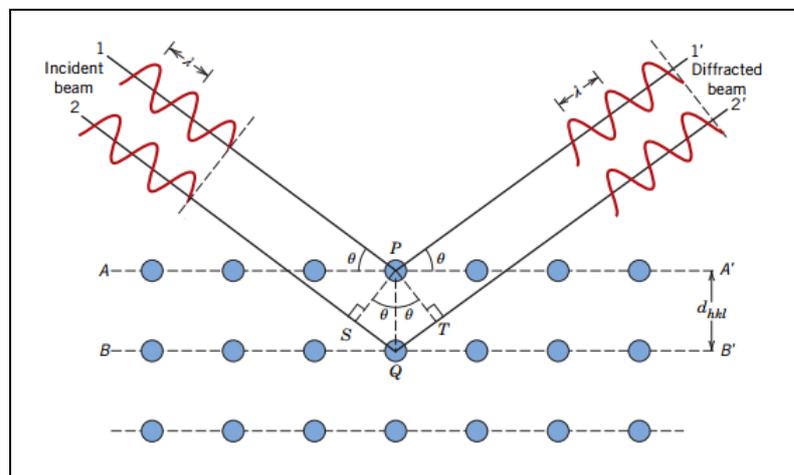
A difração de raio-X (DRX) é a técnica recomendada para determinação das fases cristalinas dos materiais, porque na maior parte dos sólidos, os átomos se distribuem ordenadamente em planos cristalinos, que são separados por distâncias da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda do raio-X (ALBERS *et al.*, 2002).

A difração é um fenômeno que consiste no espalhamento da radiação eletromagnética, provocada pela interação entre o feixe de raio-X incidente e os elétrons dos átomos que compõem a eletrosfera do material. Esse espalhamento fornece informações que normalmente são utilizadas junto a outras técnicas de caracterização de materiais, para que se tenha uma análise mais completa (CANEVAROLO JUNIOR, 2004).

Tratando-se da identificação de estruturas cristalinas e da compreensão da estrutura da matéria de uma forma geral, a técnica de difração é de extrema importância e a mais usual (CANEVAROLO JUNIOR, 2004).

Segundo Albers *et al.* (2002), ao incidir um feixe de raio-X em um material, os átomos presentes na sua estrutura cristalina provocam o fenômeno da difração, e esta difração obedece a Lei de Bragg. Considerando a estrutura periódica do material cristalino, a Lei de Bragg estabelece a relação entre o ângulo de incidência do feixe de raio-X (θ), a distância entre os planos cristalográficos do material (d) e o comprimento de onda do raio incidido (λ), conforme a expressão $n\lambda=2d.\text{sen}\theta$, exemplificada na figura 4.

Figura 4 – Desenho esquemático da Lei de Bragg.



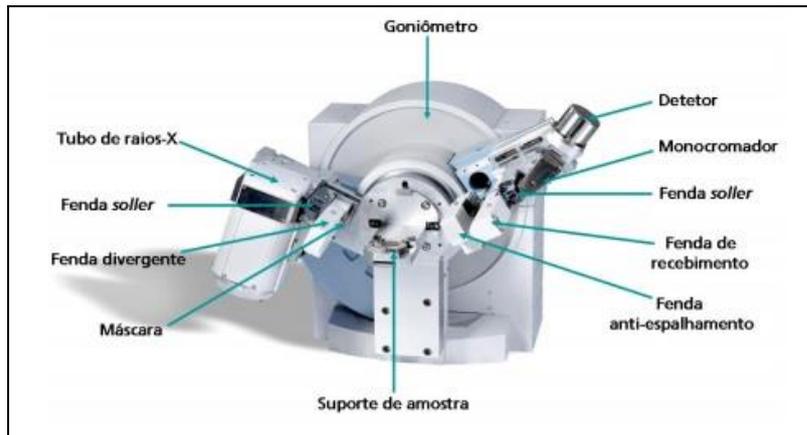
Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2016).

Essas interações entre o ângulo de difração e a distância entre os planos geram um perfil de difração, que é característico para cada fase cristalina do material, determinando sua composição mineralógica (ALBERS *et al.*, 2002).

O padrão de difração se dá pela interferência dos feixes dispersos que estão em fase. Os comprimentos de onda interagem com diferentes planos cristalográficos e por saírem em fase, tem suas amplitudes somadas, determinando um pico de difração que posteriormente será usado para a obtenção dos dados de interesse (SURYANARAYANA, 2011).

O equipamento utilizado para realizar o ensaio de difração é o difratômetro, cujos componentes são basicamente uma fonte de raio-X, o goniômetro, um suporte de amostra, um monocromador e um detector móvel (GOBBO, 2009). Na figura 5 pode-se observar um modelo de difratômetro comercial.

Figura 5 – Difratorômetro comercial com configuração clássica de Bragg-Brentano.

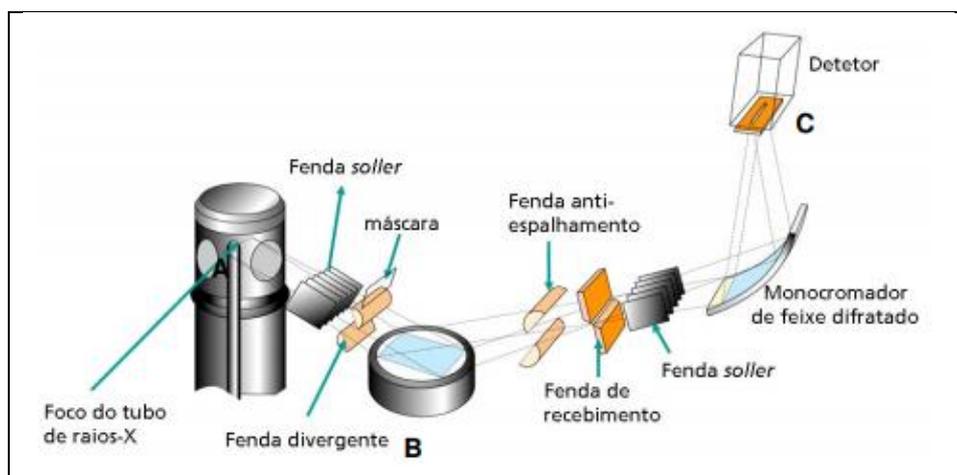


Fonte: Gobbo (2009).

Os raios-X são gerados aplicando um feixe de elétrons de elevada energia em um ânodo de metal, que fica dentro do tubo sob vácuo, com corrente variável, dependendo do metal utilizado. A intensidade da corrente aplicada afeta a intensidade dos picos obtidos, mas não altera os valores dos ângulos (SURYANARAYANA, 2011).

Além disso, o detector do equipamento pode ser de três tipos, sendo os mais usuais: o proporcional, de cintilação e estado sólido. Em geral, os difratômetros para amostras em pó utilizam os detectores proporcionais (SURYANARAYANA, 2011). A figura 6 demonstra de forma esquemática como acontece a detecção dos raios X em uma amostra.

Figura 6 – Esquema do funcionamento do equipamento, com a trajetória do feixe da fonte até o detector.



Fonte: Gobbo (2009).

O feixe gerado pela fonte sai do tubo, passa pela fenda *soller*, a qual tem a função de diminuir a divergência axial do feixe (também chamada de colimador), incidindo sobre a amostra, indicado por “B”. O feixe difratado passa pelas demais fendas e incide no detector “C”, depois de ter passado pelo monocromador (GOBBO, 2009).

3.5.2 Microscopia eletrônica de varredura

Segundo Maliska [s.d.], a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma das técnicas mais utilizadas para observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos, com sua criação atribuída ao trabalho publicado em 1935 por Knoll, concebendo a ideia do equipamento.

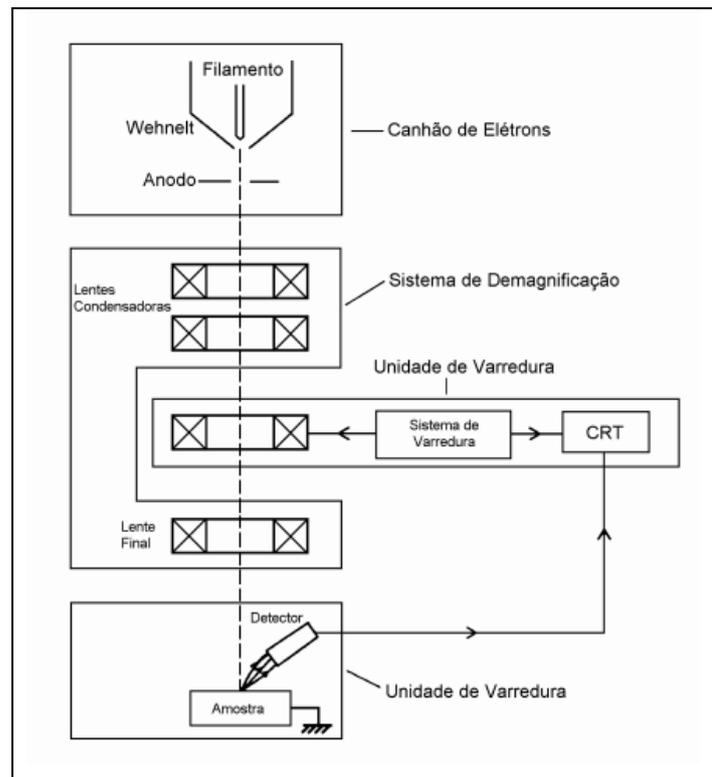
Com a utilização do MEV é possível obter ampliação de até 300.000 vezes (MORAES, 2009) e um limite de resolução de cerca de 10 nm, em alguns instrumentos mais básicos, e, em equipamentos mais sofisticados, pode ser obtida uma resolução de até 1 nm (CANEVAROLO JUNIOR, 2004; SURYANARAYANA, 2011).

O MEV consegue uma ampliação intermediária entre o microscópio óptico (MO) e o microscópio eletrônico de transmissão (MET), porém, além de ter uma resolução maior que o primeiro, requer uma preparação de amostra mais simples do que o segundo (MALISKA, s.d.).

Com a técnica, a interpretação da imagem é facilitada, pois as imagens fornecidas dão uma noção tridimensional, devido à elevada profundidade de foco (SURYANARAYANA, 2011; MALISKA, s.d.). As imagens têm um caráter virtual, pois o que é transmitido para o monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, diferente da radiação de luz emitida pelas técnicas habituais (MORAES, 2009).

O equipamento é composto, basicamente, por coluna optoeletrônica, que gera o feixe de elétrons; sistema de lentes, para reduzir o feixe eletrônico; unidade de varredura; câmara de amostra; e detectores, conforme a figura 7 (MALISKA, s.d.).

Figura 7 – Representação esquemática dos componentes do MEV.



Fonte: Maliska (s.d.).

O princípio de funcionamento do equipamento se dá pela emissão de um feixe de elétrons por um eletrodo negativo de tungstênio, através da aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV, fazendo com que haja a aceleração dos elétrons. O eletrodo positivo atrai os elétrons acelerados, tendo o percurso ajustado pelas lentes condensadoras, a fim de atingir a lente objetiva, que ajusta o foco do feixe para a amostra (MORAES, 2009).

Quando o feixe de elétrons primários incide sobre a amostra e interage com a eletrosfera desta, alguns sinais são produzidos, onde uma parte destes se difundem, constituindo um volume de interações que é utilizado para formar a imagem, além de servir para analisar a composição química do material (CANEVAROLO JUNIOR, 2004).

Esses sinais produzidos são compostos por elétrons secundários, elétrons retroespalhados, elétrons *auger*, raios-x, catodoluminescência e corrente de imagem de feixe de elétrons (CANEVAROLO JUNIOR, 2004).

Os elétrons secundários são resultantes das interações fracas entre os elétrons primários (o feixe) e a amostra, de baixa energia (< 50 eV) e responsáveis por formar imagens de alta resolução (3-5 nm) (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Normalmente, apenas os elétrons gerados próximos a superfície são detectados, pois os que são produzidos em camadas mais internas são absorvidos pela amostra; e esse relevo dá a noção de contraste da imagem (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Os elétrons retroespalhados possuem energia que vão de 50 eV até o valor da energia do elétron primário, sendo estes os que sofreram espalhamento elástico, vindos de camadas mais superficiais da amostra. Porém, se apenas estes elétrons de maior energia forem captados, as informações de profundidade contidas na imagem serão insuficientes, sendo necessário o resultado das interações ocorridas mais internamente na amostra e provenientes de uma região de diâmetro maior do que o diâmetro do feixe primário (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Ainda segundo as autoras, a imagem gerada por esses elétrons fornece diferentes informações em relação ao contraste que apresentam: pode-se obter uma imagem topográfica (contraste em função do relevo) e uma imagem de composição (contraste em função do número atômico dos elementos presentes na amostra).

Já os raios-x são gerados quando o feixe de elétrons primários possui energia suficiente para arrancar um elétron do átomo, mas dependem do nível onde estava o elétron arrancado e do elétron que vai preencher o buraco formado. Essas emissões fornecem informações sobre a composição química da amostra, sabendo que cada constituinte possui um comprimento de onda específico (SURYANARAYANA, 2011).

Nesse sentido, há dois aparelhos que podem ser acoplados ao MEV para determinação da composição química, a partir dos raios-X, utilizando duas técnicas diferentes. São elas: espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e espectroscopia por dispersão de comprimento de onda (WDS).

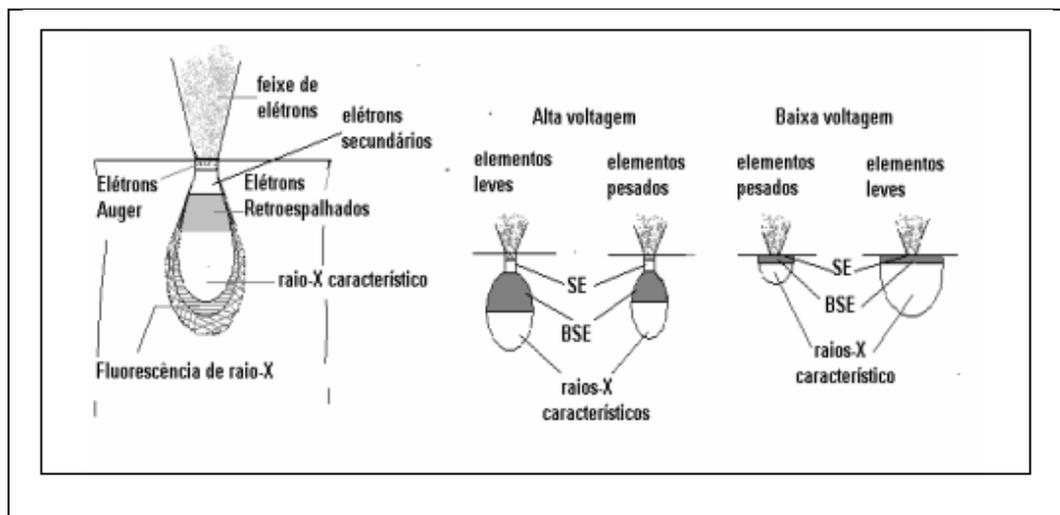
Quando o feixe de elétrons interage com o material amostrado, os elétrons mais externos dos átomos e os íons são excitados para um nível de maior energia, porém, ao retornarem para a condição inicial, liberam a energia adquirida emitindo raios-X, que são detectados pelo EDS. Como cada átomo possui um padrão de emissão, é possível determinar quais são os elementos presentes na amostra (MORAES, 2009).

Abreu *et al.* (2017) destacam que essa energia do fóton do espectro de raio-X liberado é proporcional à sua frequência. Com isso, o espectro emitido pelo aparelho tem a energia dos fótons no eixo das abscissas e o número de fótons recebidos no eixo das ordenadas, facilitando a visualização das suas respectivas energias no gráfico.

Já no WDS, os raios-X são separados por difração dos fótons incidentes característicos dos elementos contidos na amostra, obedecendo a relação entre o comprimento de onda e o ângulo de incidência do feixe, conforme a lei de Bragg (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Na figura 8 é possível ver o esquema com as formas de interação entre o feixe de elétrons e a amostra.

Figura 8 – Interações entre o feixe de elétrons e a amostra.



Fonte: Dedavid, Gomes e Machado (2007).

4 METODOLOGIA

No presente tópico estão discriminados os procedimentos metodológicos e os materiais utilizados para realização da pesquisa. Inicialmente, foram apresentadas as caracterizações referentes aos insumos para o traço do concreto; posteriormente, foram descritos os processos para obtenção do compósito; e, por fim, a exposição dos ensaios necessários, à luz das normas técnicas.

4.1 CINZA DE BIOMASSA MISTA

4.1.1 Obtenção da cinza

Foi realizado um mapeamento para identificar as lavanderias de *jeans* inseridas no APL, com foco nas principais cidades do polo: Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama.

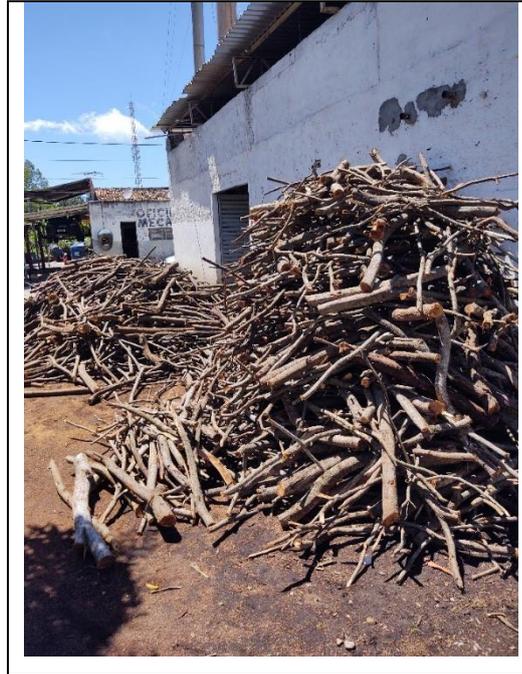
Após a etapa inicial, as empresas foram contatadas e apresentadas previamente ao projeto, visando captar apoio ao trabalho. Por fim, foi selecionada a lavanderia Nossa Senhora do Carmo, localizada na cidade de Caruaru-PE, onde foram coletados cinco sacos com cinza, cada um contendo cerca de 25 Kg do resíduo.

A cinza coletada foi proveniente da limpeza do cinzeiro da caldeira da empresa e foi transportada para o Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Dois Irmãos, e armazenada em sacos lacrados, de modo que reduzisse os efeitos da umidade e outros agentes externos sobre o material.

Constatou-se que a lenha de algaroba, produzida e adquirida na própria região, correspondia à 70% da fonte energética utilizada na caldeira, como visto na figura 9; enquanto 30% do material energético era dividido entre resíduos de movelaria e *pellets* de madeira (informações verbais)¹. Por consequência, a cinza coletada para esse trabalho era o resíduo da combustão de diferentes materiais orgânicos combinados para fins energéticos.

¹ Informações repassadas pela gerência da empresa, em 14 de agosto de 2020.

Figura 9 – Estoque de lenha de algaroba da lavanderia Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.1.2 Caracterização físico-química da cinza

A amostra coletada foi submetida à série de peneiras ABNT, dispostas em um agitador elétrico de peneiras, de marca solotest, a fim de executar o ensaio de determinação da composição granulométrica do material.

Seguindo as determinações da NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação, as peneiras utilizadas foram organizadas, respectivamente, de cima para baixo, com as seguintes aberturas de malha: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 600 μm ; 300 μm ; 150 μm ; e 75 μm (ABNT, 2019).

Para a realização do ensaio, pesou-se 60 g de cinza e, logo após, o material foi despejado sobre as peneiras, sendo submetido a 10 minutos de agitação, em uma frequência de 15 Hz. Em seguida, o conteúdo retido em cada peneira foi pesado individualmente para a determinação granulométrica.

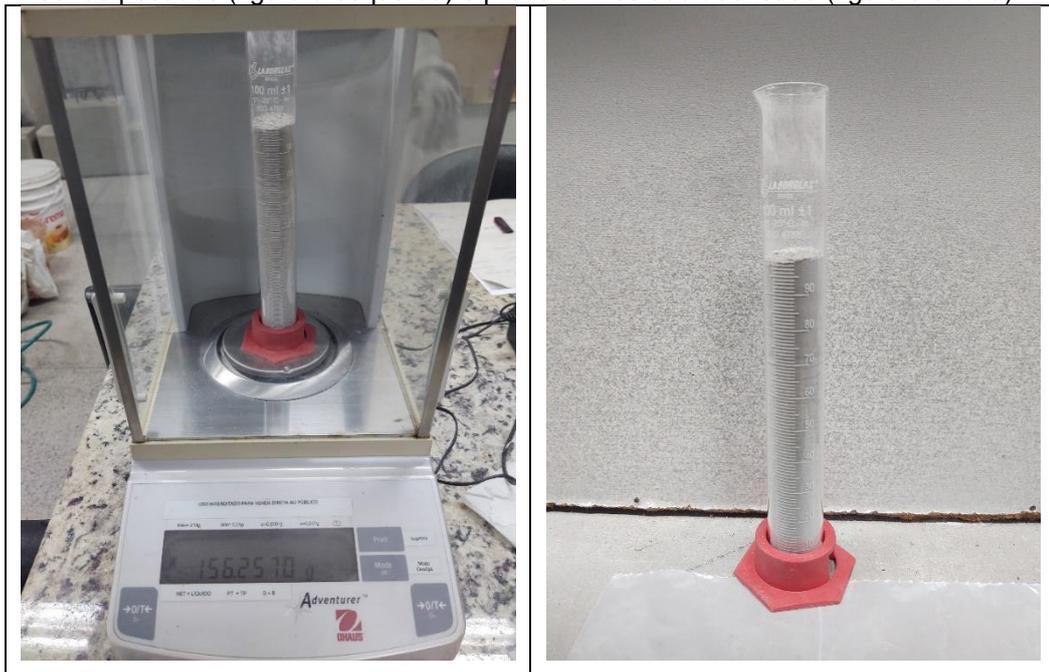
Para as demais etapas da pesquisa, todo resíduo foi peneirado com peneira ABNT malha #200 (abertura de 75 μm), onde foi aproveitado apenas o material passante, que corresponde à granulometria do cimento. O material não aproveitado para esse projeto foi condicionado aos mesmos sacos utilizados anteriormente, para posteriores pesquisas.

Com a cinza já beneficiada, foi determinada a massa unitária compactada do resíduo, tomando por base a metodologia adotada por Cunha (2020), uma vez que não há na literatura uma metodologia certificada. No referido ensaio, foi utilizada a seguinte instrumentação: proveta com capacidade de 100 mL, agitador elétrico e balança analítica com resolução de 0,0001 g.

Na execução do ensaio, a massa da proveta vazia foi determinada com o auxílio da balança; e, posteriormente, foi acrescentada a cinza à proveta, que foi submetida à agitação por dois minutos, em uma frequência de 10 Hz, a fim de melhor adensar o resíduo no recipiente.

A cinza foi adicionada e adensada até atingir o nível de 100 mL, conforme a marcação da graduação do recipiente, quando o conjunto (proveta e resíduo) foi novamente pesado, como pode ser visto na figura 10.

Figura 10 – Ensaio de determinação da massa unitária da cinza de biomassa: proveta + resíduo sendo pesados (figura à esquerda) e proveta + resíduo adensado (figura à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

No cálculo da massa unitária da cinza compactada, foi utilizada a equação 1, apresentada abaixo:

$$\rho_{unit.} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

Onde,

$\rho_{unit.}$: Massa unitária da cinza compactada (Kg/m³);

m_1 : Massa do recipiente vazio (Kg);

m_2 : Massa do recipiente + cinza compactada (Kg);

V: Volume do recipiente (m³).

Para determinação da composição mineralógica, as cinzas foram submetidas ao difratômetro de raio-X, de marca Bruker, modelo D8 Advance, utilizando os seguintes parâmetros: radiação do CuK α ; tensão no tubo de 40 kV; corrente de 40 mA; varredura de $5^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$; e velocidade do goniômetro de 0,02° por segundo (passo). O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais, da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE).

Utilizou-se o *software* X'Pert HighScore Plus para identificar os picos obtidos no difratograma, comparando-os com padrões já indexados no programa.

4.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland utilizado no trabalho foi do tipo CP II-Z, classe 32, fabricado e doado pela Cimento Elizabeth, localizada no município de Alhandra/PB.

As especificações do referido material são definidas pela norma NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos, que define o valor mínimo de resistência à compressão aos 28 dias de 32 MPa e o máximo de 49 MPa (ABNT, 2018b).

As informações referentes às características físico-químicas do cimento foram repassadas pelo fabricante por um laudo técnico, e podem ser observados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Características químicas do CP II-Z.

Características Químicas	Valores Médios (%)	Normas (ABNT)
Perda ao fogo	8,19	NM 18/12
Resíduo insolúvel	11,68	NM 15/12
SiO ₂	20,93	NBR 14656/01
Al ₂ O ₃	5,38	NBR 14656/01
Fe ₂ O ₃	2,17	NBR 14656/01
CaO	53,22	NBR 14656/01
MgO	4,50	NBR 14656/01
SO ₃	3,23	NBR 14656/01
Na ₂ O	0,24	NBR 14656/01
K ₂ O	1,01	NBR 14656/01

Fonte: Adaptada do boletim técnico fornecido pela Elizabeth Cimentos (2019).

Tabela 6 – Características físicas do CP II-Z.

Características Físicas	Unidade	Valores Médios	Normas (ABNT)
Massa específica	g/cm ³	3,02	NBR 16605/2017
Área específica	cm ² /g	4546	NBR 16372/2015
Início de pega	horas	02:57	NBR 16607/2018
Fim de pega	horas	03:56	NBR 16607/2018
Resistência à compressão 1 dia	MPa	11,1	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 3 dias	MPa	23	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 7 dias	MPa	27,3	NBR 7215/2019
Resistência à compressão 28 dias	MPa	35,3	NBR 7215/2019

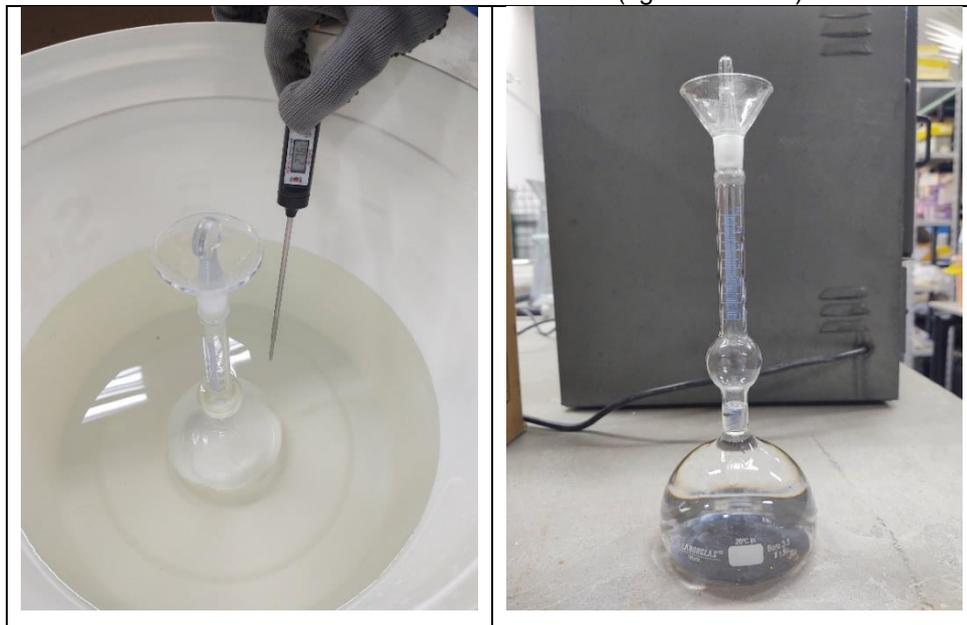
Fonte: Adaptada do boletim técnico fornecido pela Elizabeth Cimentos (2019).

Em laboratório, a fim de ratificar a especificação informada no boletim técnico do fabricante, foi realizado o ensaio de massa específica do cimento; dada a importância do parâmetro para a determinação da dosagem do concreto; conforme a NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica (ABNT, 2017).

Para o referido ensaio, foi utilizado frasco volumétrico de Le Chatelier; balança com resolução de 0,001 g; frasco para acomodar o cimento; funil; termômetro com resolução de 0,1 °C; e xileno, composto químico recomendado pela norma para determinação da massa específica do cimento, por não reagir com o material.

Na execução, encheu-se o frasco de Le Chatelier com o xileno até o nível compreendido entre as marcas de zero e um cm³, marcadas na vidraria; logo após, o frasco foi imerso em água por 30 minutos, com temperatura constante; e, posteriormente, foi realizada a primeira leitura volumétrica do conteúdo. O procedimento pode ser observado na figura 11.

Figura 11 – Frasco de Le Chatelier + xileno submersos em água (figura à esquerda) e realização da leitura do volume de xileno no frasco (figura à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Conforme a norma, pesou-se 60 g do cimento, e este foi inserido na vidraria com o auxílio do funil. Com o frasco novamente tampado, girou-se o recipiente levemente inclinado, para eliminar as bolhas de ar, e mais uma vez foi imerso em água, com temperatura constante, por 30 minutos, quando foi realizada a segunda leitura do volume. O procedimento está ilustrado na figura 12.

Figura 12 – Leitura do volume do frasco de Le Chatelier contendo xileno + cimento.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

A massa específica foi determinada a partir da equação 2, conforme a norma:

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

Onde,

ρ : Massa específica do cimento (g/cm^3);

m : Massa do cimento ensaiado (g);

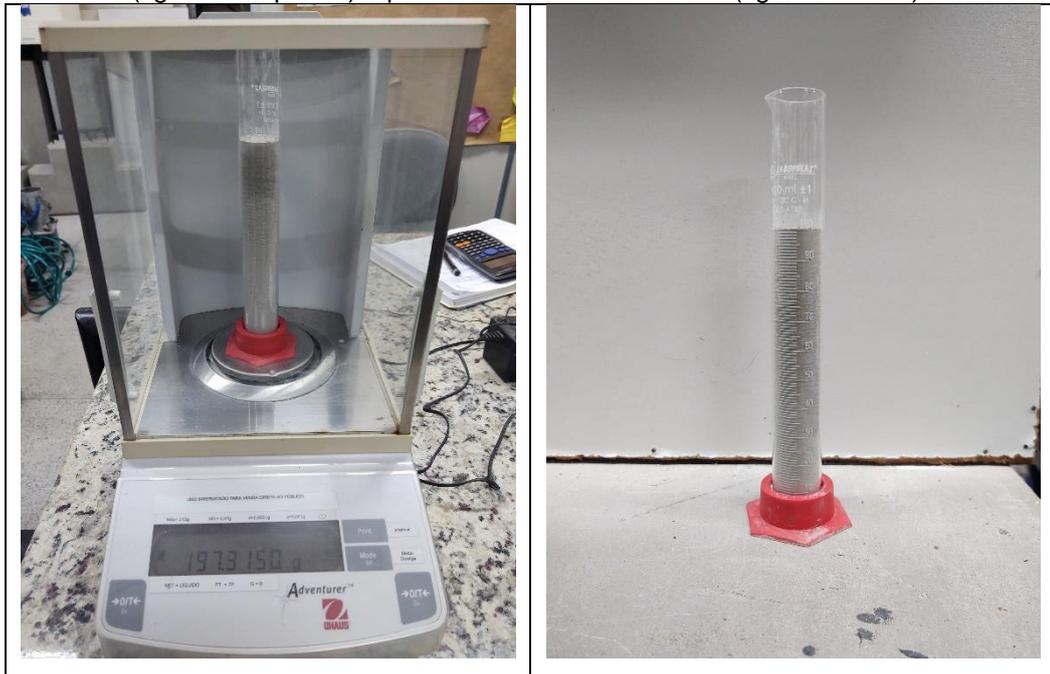
V_2 : Volume da segunda leitura (cm^3);

V_1 : Volume da primeira leitura (cm^3).

O mesmo método utilizado para determinar a massa unitária compactada da cinza também foi aplicado para determinar a massa unitária compactada do cimento, a fim de que se mantivesse um padrão metodológico na pesquisa, utilizando-se uma proveta contendo aglomerante até a marca de 100 mL, submetida à vibração, por dois minutos, em uma frequência de 10 Hz. Em seguida, foi registrada a massa da proveta mais o cimento, conforme a figura 13.

O cálculo da massa unitária do cimento foi feito com base na equação 1, também utilizada para o cálculo da massa unitária compactada da cinza.

Figura 13 – Ensaio de determinação da massa unitária do cimento: proveta + cimento sendo pesados (figura à esquerda) e proveta + cimento adensado (figura à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.3 AGREGADO MIÚDO E GRAÚDO

Abaixo foram descritos os procedimentos metodológicos adotados para caracterização dos agregados miúdo e graúdo, seguindo as determinações das normas correspondentes. A areia e a brita foram adquiridas no comércio comum, sendo a areia comprada como areia média e a brita como tipo 1.

4.3.1 Determinação de massa específica para agregado miúdo

Segundo a NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, a massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado e o seu volume, excluindo os espaços vazios (ABNT, 2009c).

Conforme a norma, foram utilizados os seguintes materiais para realização do ensaio: molde tronco cônico; haste de compactação metálica; balança com precisão de 0,001 g; Erlenmeyer com capacidade de 500 cm³; e estufa.

Para o ensaio, foi reservado um quilo de areia, após quarteamento, que posteriormente foi submersa em água por 24 horas. Após esse período, a areia foi espalhada em uma superfície plana e submetida à corrente de ar, até que os grãos estivessem secos e não agregados entre si. A figura 14 ilustra o processo.

Figura 14 – Areia submersa em água (figura à esquerda) e em processo de secagem (figura à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Logo após a secagem, a areia foi submetida ao molde tronco cônico e teve sua superfície compactada por 25 golpes, utilizando a haste de compactação. A norma estabelece que o ideal é a areia manter uma certa umidade superficial, de modo que, ao retirar o molde, a amostra mantenha o formato do cone.

Verificada essa condição, seguiu-se a secagem e a aplicação do molde, em intervalos regulares, até que o cone de areia desmoronou com a retirada do molde, conforme a figura 15.

Figura 15 – Ensaio de tronco cônico: areia com umidade superficial (foto à esquerda) e areia seca no ponto de saturado superfície seca (foto à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Essa condição garantiu que a areia estivesse no seu ponto de saturado superfície seca (PSSS); caso contrário, na primeira retirada do molde, a areia desmoronaria, evidenciando que secou além do necessário.

Com a areia no PSSS, pesou-se 500 g da amostra saturada superfície seca, que foi armazenada no Erlenmeyer, registrando a massa do conjunto frasco + areia. Em seguida, encheu-se o Erlenmeyer com água até próximo da marca dos 500 cm³ e este foi condicionado a um recipiente com água, sob temperatura controlada entre 19°C e 23°C, por uma hora.

Passado esse tempo, completou-se o recipiente com água até a marca dos 500 cm³ e foi registrada a massa do conjunto frasco + areia + água, conforme a figura 16.

Figura 16 – Utilização do frasco aferido em ensaio de massa específica de areia: frasco + areia (foto à esquerda) e frasco + areia + água (foto à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Logo após, o conteúdo foi retirado do frasco e submetido à estufa, sob 110°C, por 24 horas. Após ser retirado da estufa, aguardou-se o resfriamento do material e foi registrada a sua massa seca.

Após os procedimentos, utilizou-se as seguintes equações para obtenção dos dados:

- Massa específica do agregado seco (d_1)

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (3)$$

Onde,

m: Massa seca da areia após estufa (g);

V: Volume do frasco (cm³);

V_a: Volume de água adicionada ao frasco (cm³), obtido pela equação 4:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (4)$$

Onde,

m₂: Massa do frasco + agregado + água (g);

m₁: Massa do frasco + agregado (g);

ρ_a: Massa específica da água (g/cm³).

- Massa específica do agregado saturado superfície seca (d₂)

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (5)$$

Onde,

m_s: Massa da amostra saturada superfície seca (g);

V: Volume do frasco (cm³);

V_a: Volume de água adicionada ao frasco (cm³).

- Massa específica (d₃)

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (6)$$

Onde,

m: Massa seca da areia após estufa (g);

V: Volume do frasco (cm³);

V_a: Volume de água adicionada ao frasco (cm³);

m_s: Massa da amostra saturada superfície seca (g);

ρ_a: Massa específica da água (g/cm³).

4.3.2 Determinação de massa específica para agregado graúdo

Seguindo as recomendações da NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009d), foram utilizados os seguintes materiais para a realização do ensaio: balança com resolução de 0,001 g; cesto metálico com abertura máxima de malha de 3,35 mm; caixa de isopor, utilizada como tanque; e estufa.

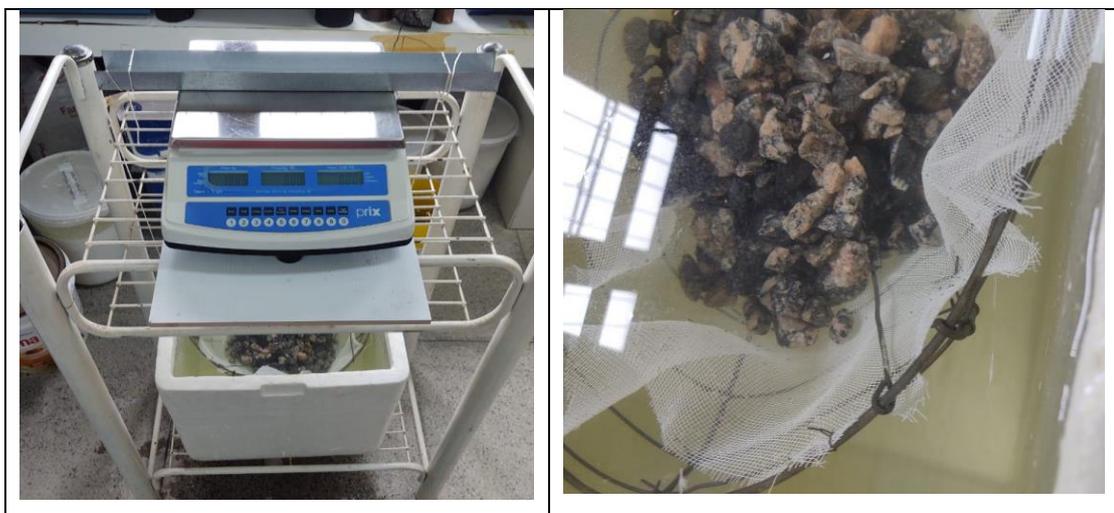
A norma estabelece que para o ensaio devem ser utilizados três quilos de brita, caso a dimensão máxima característica do material seja de 19 mm, o que correspondia à dimensão do tipo de agregado adquirido para a realização do presente trabalho.

Logo após à pesagem, a brita foi lavada para retirada de todo pó e material de superfície. Após a lavagem, o agregado foi seco em estufa, sob 110°C, durante 24 horas.

Após o resfriamento, o agregado foi submerso em água por 24 horas. E logo após esse período, o material foi seco em pano absorvente, para eliminação do excesso de água superficial; e, imediatamente após ao processo de secagem manual, foi pesado para obtenção da massa na condição saturada superfície seca.

Em seguida, a brita foi alocada no cesto metálico e submersa no tanque com água, a fim de registrar a massa do material em água, conforme a figura 17. A água foi mantida num intervalo de temperatura entre 21°C e 25°C.

Figura 17 – Pesagem do agregado submerso em água.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Posteriormente, o agregado foi novamente submetido à estufa, a uma temperatura de 110°C, por 24 horas. Após o referido processo, o material foi resfriado naturalmente e teve sua massa novamente registrada.

Conforme a norma, para obtenção das variáveis de interesse, utilizou-se as seguintes equações:

- Massa específica do agregado seco (d)

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (7)$$

Onde,

m : Massa do agregado seco (g);

m_a : Massa do agregado em água (g).

- Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (d_s)

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad (8)$$

Onde,

m_s : Massa do agregado na condição saturada superfície seca (g);

m_a : Massa do agregado em água (g).

- Massa específica aparente (d_a)

$$d_a = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (9)$$

Onde,

m : Massa do agregado seco (g);

m_s : Massa do agregado na condição saturada superfície seca (g);

m_a : Massa do agregado em água (g).

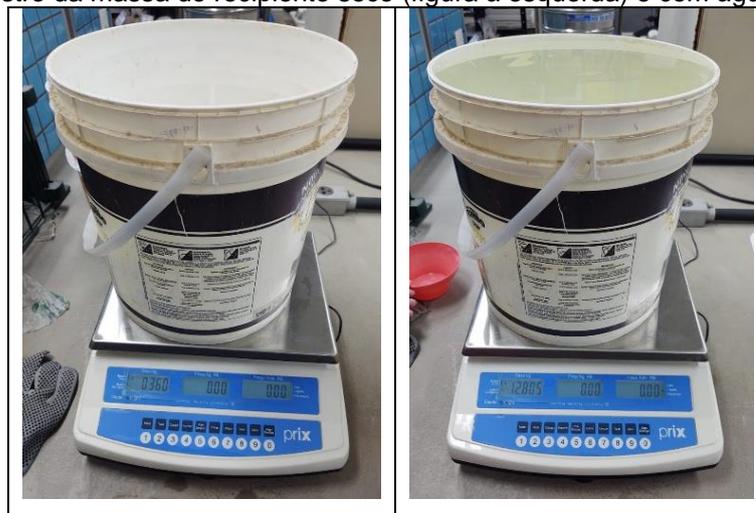
4.3.3 Determinação de massa unitária dos agregados

Conforme a NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, a massa unitária é a relação entre a massa do agregado lançado em um recipiente e o volume do referido recipiente (ABNT, 2006).

Para a realização do ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos: balança com resolução de 0,001 g; balde, utilizado como recipiente cilíndrico; termômetro; estufa; e placa de vidro de seis milímetros de espessura, utilizada para calibração.

Na primeira etapa do ensaio, registrou-se as massas do balde seco e com água até sua máxima capacidade, como pode ser observado na figura 18. Antes do registro da massa do balde com água, a placa de vidro foi posta sobre o recipiente, a fim de que eliminasse as bolhas de ar e o excesso de água.

Figura 18 – Registro da massa do recipiente seco (figura à esquerda) e com água (figura à direita).



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Observou-se também a determinação da norma, que estabelece que a temperatura da água deve estar em um intervalo compreendido entre 18°C e 25°C. A temperatura utilizada no trabalho obedeceu aos limites estabelecidos.

Utilizando-se a tabela 7, foi calculada a massa específica da água através de interpolação entre os valores tabelados e os valores registrados no ensaio. Com isso, fez-se uma relação entre a massa de água adicionada ao recipiente e sua massa específica, obtendo assim o volume (V) do recipiente.

Tabela 7 – Densidade da água.

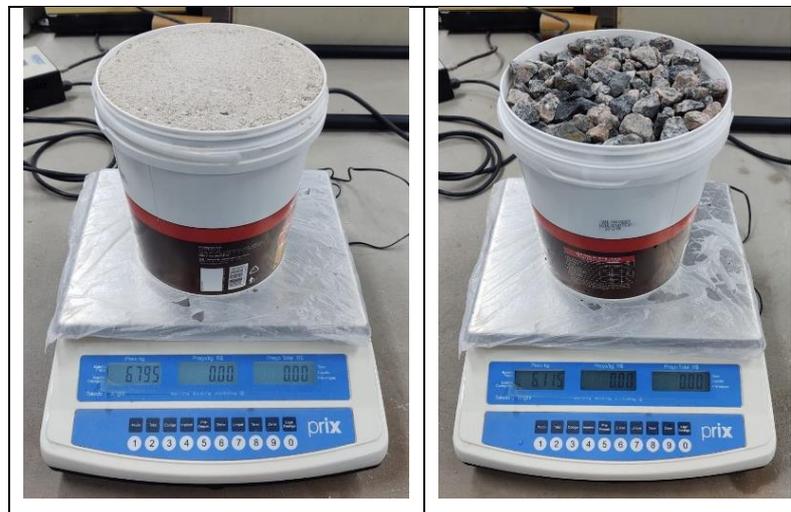
Temperatura °C	Densidade Kg/m ³
15,6	999,01
18,3	998,54
21,1	997,97
23,0	997,54
23,9	997,32
26,7	996,59
29,4	995,83

Fonte: Adaptada de ABNT (2006).

Na segunda etapa, definiu-se o método C do ensaio, que é empregado para agregados soltos.

Com isso, o balde foi preenchido com os agregados miúdo e graúdo, até que transbordasse. Após isso, passou-se uma régua para nivelar a camada superficial dos agregados com as bordas do recipiente, conforme a figura 19.

Figura 19 – Balde com os agregados miúdo (figura à esquerda) e graúdo (figura à direita).



Fonte: arquivo do autor (2020).

Após essa referida etapa, registrou-se a massa dos agregados mais o recipiente e foi determinada a massa unitária de cada agregado a partir da equação 10:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (10)$$

Onde,

ρ_{ap} : Massa unitária do agregado (Kg/m^3);

m_{ar} : Massa do recipiente mais agregado (Kg);

m_r : Massa do recipiente vazio (Kg);

V: Volume do recipiente (m^3).

4.3.4 Determinação de granulometria dos agregados

Conforme a NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica, o ensaio determina a dimensão máxima característica do agregado, pela malha onde o agregado fica retido em cerca de 5% em massa; e o módulo de finura, pela soma das porcentagens retidas da massa do agregado nas peneiras da série normal, dividida por 100 (ABNT, 2003).

Na tabela 8, observa-se as peneiras estabelecidas pela norma para a determinação da granulometria. No trabalho, foram utilizadas as peneiras recomendadas, o agitador de peneiras e a balança analítica.

Tabela 8 – Série de peneiras granulométricas.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

Fonte: Adaptado de ABNT (2003).

Seguindo a norma, foram pesados 300 g de areia, que posteriormente foi submetida à estufa, por 24 horas, em uma temperatura de 110°C. Após o resfriamento, o agregado foi depositado na série de peneiras e submetido à agitação por 10 minutos, sob uma frequência de 15 Hz.

No agitador, as peneiras foram empilhadas na ordem crescente de abertura de malha, da base para o topo. As peneiras utilizadas foram da abertura de malha de 75 µm até a 4,75 mm, em acordo com a definição de agregado miúdo. Após o processo de peneiramento, o conteúdo contido em cada peneira foi pesado separadamente.

Para a brita, dada a dimensão máxima nominal de 19 mm, foram pesados cinco quilos do material, conforme estabelecido pela norma. Em seguida, o agregado foi submetido a uma estufa, sob 110°C, por 24 horas. Logo após, o material foi resfriado naturalmente e depositado na série de peneiras.

As peneiras utilizadas foram da abertura de malha de 150 µm até a malha 31,5 mm, da base para o topo. O peneiramento ocorreu através de um agitador, por 10 minutos, sob uma frequência de 15 Hz. Logo após, o material contido em cada peneira foi pesado.

4.3.5 Determinação do teor de umidade do agregado miúdo

Conforme a norma NBR 9775: Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio, os equipamentos utilizados no ensaio foram: balança com resolução de 0,001 g; e o frasco de Chapman (ANBT, 2012).

Para a realização do ensaio, pesou-se 500 g de areia e encheu-se o frasco com água até a marca dos 200 mL. As paredes internas do frasco foram secas e, então, foi adicionada a areia com auxílio de um funil.

Inclinou-se o frasco em aproximadamente 45°, que foi levemente rotacionado, a fim de que as bolhas de ar fossem eliminadas. Logo após, deixou-se o frasco em repouso por 45 segundos, quando foi realizada a leitura do volume ocupado pelo agregado, conforme figura 20.

Para o cálculo do teor de umidade, utilizou-se a equação 11, conforme a norma:

$$h = \frac{[500 - (V - 200) * \gamma]}{(V - 700) * \gamma} \times 100 \quad (11)$$

Onde,

h: Teor de umidade (%);

V: Volume de areia lido no frasco de Chapman (mL);

γ : Densidade na condição saturada de superfície seca, conforme o ensaio de massa específica da areia (g/mL).

Figura 20 – Areia no frasco de Chapman para determinação do teor de umidade.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

Foi produzido um concreto padrão de classe C30, conforme a NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência; com resistência característica à compressão de 30 MPa aos 28 dias de moldagem (ABNT, 2015a).

O concreto padrão produzido serviu para fins comparativos com os demais compósitos desenvolvidos no trabalho, que possuíam 10%, 20% e 40% de cinza na sua composição, como substituição volumétrica ao cimento.

4.4.1 Dosagem do concreto

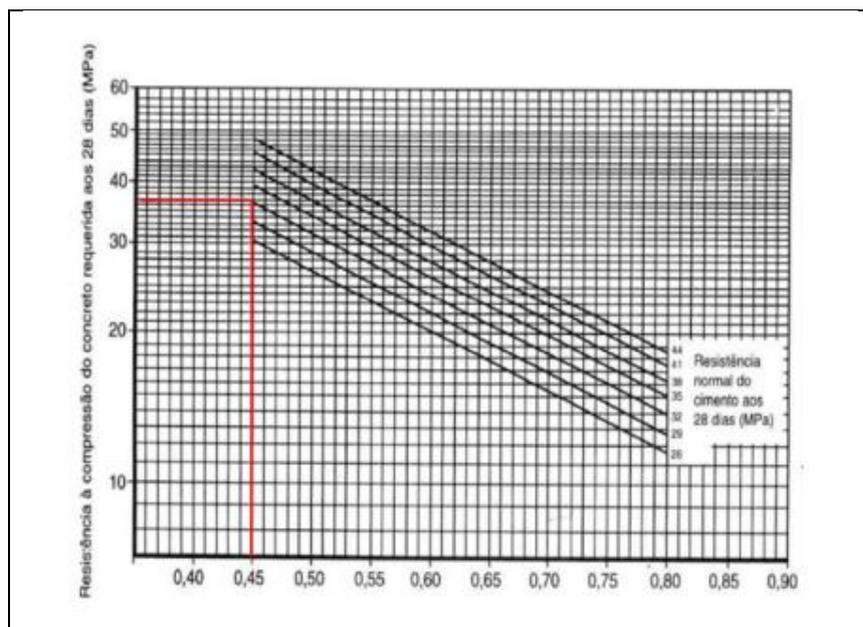
Foi definido um traço padrão a partir de um estudo de dosagem, conforme o método recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, por este ser baseado nos tipos de agregados mais comumente utilizados no Brasil (RODRIGUES, 1995).

Pelos procedimentos preliminares, como a caracterização dos componentes do concreto, o estudo da dosagem e o ajuste do traço, foi considerada a condição “A” de preparo do concreto, estabelecida na NBR 12655, que considera as medidas dos componentes em massa e corrige a quantidade de água na dosagem pela umidade dos agregados (ABNT, 2015b).

Com a escolha da condição “A” de preparo, para efeito de cálculo de resistência de dosagem foi considerado o desvio padrão de 4 MPa. Conforme a expressão dada pela norma, $f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot S_d$, onde a resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (f_{ckj}) escolhida foi de 30 MPa e o desvio padrão da dosagem (S_d) foi de 4 MPa, a resistência média da dosagem (f_{cmj}) obtida foi de 36,60 MPa.

Ao lançar o valor obtido do f_{cmj} no gráfico conhecido como curva de Abrams, conforme a figura 21, encontrou-se uma relação água/cimento (a/c) de 0,45, conforme o eixo horizontal do gráfico.

Figura 21 – Determinação da relação a/c pela curva de Abrams.



Fonte: Adaptada de Rodrigues (1995).

4.4.2 Mistura do concreto

A mistura do concreto se deu a partir da norma NBR 12821: Preparo de concreto em laboratório – Procedimentos, sendo realizada em betoneira de 120 litros, onde foi adicionada inicialmente metade do agregado graúdo e aproximadamente 1/3 da água de amassamento, deixando o equipamento em funcionamento por 30 segundos (ABNT, 2009b).

Posteriormente, conforme a norma, colocou-se o cimento e mais 1/3 da água de amassamento, novamente deixando o equipamento em funcionamento por mais 30 segundos. Por fim, foi inserido o agregado miúdo, a outra metade da brita e o restante da água, onde a betoneira permaneceu em funcionamento por quatro minutos.

Destaca-se que cada traço foi realizado em duas amassadas, devido à limitação de capacidade de mistura da betoneira, e a água de amassamento utilizada foi oriunda da rede de distribuição da companhia estadual. Para o compósito com adição de cinza, o procedimento adotado foi o mesmo, porém, com o resíduo sendo adicionado juntamente ao cimento.

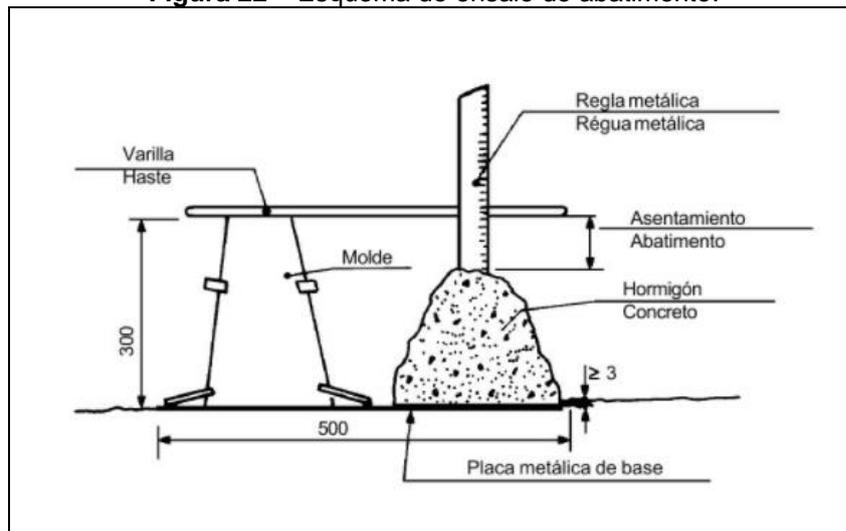
4.4.3 Determinação de abatimento do concreto

Imediatamente após cada betonada, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme procedimento descrito na NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, visando o controle da consistência do concreto, que determina a sua trabalhabilidade (ABNT, 1998).

Para tal, molhou-se a placa da base, bem como o molde e o funil; e, com o molde preso pelos pés, o mesmo foi preenchido com o concreto em três camadas, onde cada camada foi adensada por 25 golpes, utilizando a haste de adensamento.

A aferição foi expressa em milímetros, de acordo com a orientação da norma em questão, considerando a distância entre a haste posicionada horizontalmente na parte superior do molde e o eixo da amostra, como ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Esquema do ensaio de abatimento.

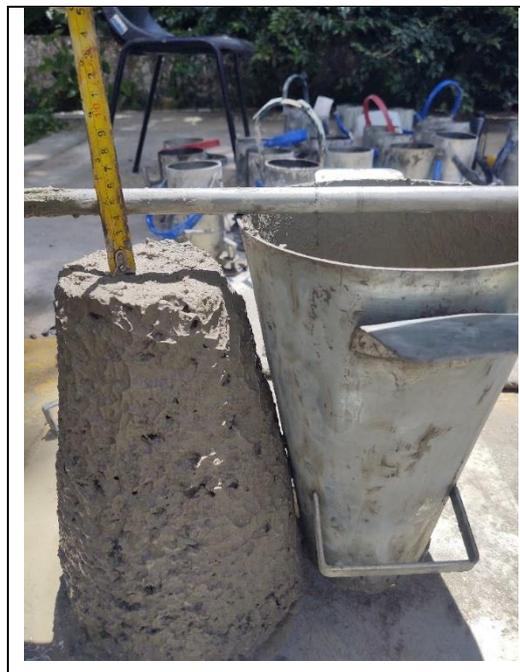


Fonte: ABNT (1998)

Optou-se pela classe de consistência S50, conforme a norma NBR 8953/2015, própria para a utilização do concreto em pavimentos e alguns elementos de fundações, onde o valor do abatimento deve estar entre 50 mm e 100 mm.

Estimando uma margem de segurança, para o presente trabalho, foi utilizado o valor padrão de abatimento de 50 ± 10 mm, conforme a figura 23.

Figura 23 – Ensaio de abatimento utilizando o limite de 50 ± 10 mm.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

4.4.4 Produção dos corpos de prova (CPs)

A moldagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção, do Departamento de Tecnologia Rural (DTR), da UFRPE, seguindo as determinações da norma NBR 5738: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016).

Foram utilizados moldes de 10 x 20 cm, que foram revestidos internamente com desmoldante. Utilizando-se do adensamento manual, os moldes foram preenchidos por duas camadas de concreto, adensadas por 25 golpes cada uma.

Após a moldagem, os corpos de prova foram retirados dos moldes depois de 24 horas. Esse período foi considerado a primeira idade de cura do concreto.

A segunda idade de cura foi aos 28 dias, onde, após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados em um tanque com água por mais 27 dias, completando assim o período de cura.

Foram produzidos 26 CPs cilíndricos, ilustrados na figura 24, para cada um dos compósitos, o padrão e com 10%, 20% e 40% de substituição volumétrica do cimento pela cinza, totalizando 104 CPs, atendendo à quantidade recomendada pela norma NBR 12655.

Figura 24 – Corpos de prova moldados para posteriores ensaios.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Os traços desenvolvidos foram denominados T0, sendo este o traço padrão obtido pelo estudo de dosagem, e T10, T20 e T40, conforme o percentual de cinza utilizado. A tabela 9 mostra um resumo sobre essas informações.

Tabela 9 – Quantitativo de corpos de prova moldados.

Traço	Porcentagem de Cinza	Formato	Quantidade de CPs
T0	0%	Cilíndrico	26
T10	10%	Cilíndrico	26
T20	20%	Cilíndrico	26
T40	40%	Cilíndrico	26

Fonte: o autor (2020).

4.4.5 Ensaio de resistência à compressão

O referido ensaio foi realizado aos 28 dias de cura após a moldagem, de acordo com as diretrizes da NBR 5739 (ABNT, 2018a), também no Laboratório de Materiais de Construção.

Foi utilizada uma prensa manual hidráulica, de marca Pavitest – Contenco, conforme figura 25, com capacidade para 100 toneladas, com indicador digital e calibrada em setembro de 2020 pela empresa TECOMAT.

Os corpos de prova ensaiados tiveram suas extremidades niveladas manualmente, com o uso de lixas, e tiveram suas dimensões aferidas com paquímetro. Os cabeçotes utilizados no ensaio foram revestidos com discos de neoprene®.

Considerou-se cada betonada como um lote para fins de cálculo da resistência à compressão, conforme parâmetros estabelecidos na NBR 12655/2015, onde cada betonada representa um tipo de traço.

Com isso, foi caracterizado o controle por amostragem parcial, cujo número mínimo de exemplares (n) é igual a seis, definido pela norma. Para esse trabalho, o número de exemplares definido foi igual a 11, totalizando 22 CPs para cada compósito.

Seguindo a determinação da norma, um exemplar era composto por dois corpos de prova do mesmo traço, com o objetivo de ter uma maior confiabilidade amostral, onde a resistência do exemplar foi representada pelo maior dos dois valores obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Figura 25 – Representação do ensaio de compressão.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

A resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi obtida através da equação 12, conforme estabelecido pela técnica.

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (12)$$

Onde,

f_c : Resistência à compressão (MPa);

F: Força máxima alcançada (N);

D: Diâmetro do corpo de prova (mm).

4.4.6 Controle estatístico do ensaio de compressão

Foi estimada a resistência característica à compressão ($f_{ck,est}$) de cada traço do compósito a partir do controle estatístico descrito pela equação 13, também definida pela NBR 12655/2015.

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{m-1}}{m-1} \right] - f_m \quad (13)$$

Onde,

m : $\frac{n}{2}$, desprezando-se o valor mais alto, caso n seja ímpar;

f_1, f_2, \dots, f_m : Valores de resistência à compressão dos exemplares dos corpos de prova, ordenados de forma crescente (MPa).

Para interpretação dos dados foram utilizadas técnicas de estatística descritiva, como a determinação de medidas de tendência central (média, mediana e quartis) e medidas de dispersão (variância e desvio padrão).

Segundo Martins (2014), os quartis dividem os dados de uma amostra, de forma ordenada crescente, em quatro partes iguais, onde 25% dos dados estão abaixo e os 75% restantes dos dados estão acima do primeiro quartil (Q_1); o segundo quartil (Q_2) representa a mediana, que divide a amostra em duas partes iguais; e o terceiro quartil (Q_3) representa o número que 75% dos dados estão abaixo dele, enquanto os 25% restantes estão acima.

Os quartis foram calculados a partir da equação 14:

$$Q = \frac{i(n+1)}{4} \quad (14)$$

Onde,

i : Quartil desejado;

n : Número de amostras.

Seguindo a metodologia adotada por Cunha (2020), realizou-se uma análise de variância (ANOVA), para saber se houve diferença estatística entre os tratamentos; e foi aplicado o teste de Tukey, para apontar a diferença estatística entre os compósitos.

4.4.7 Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os ensaios foram executados segundo os procedimentos da NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009a).

Foram utilizados quatro CPs de cada compósito para o ensaio, sendo submetidos à estufa por 72 horas, em uma temperatura de 110°C. Passado esse período, as amostras foram pesadas para registro da massa seca.

Em seguida, as amostras foram submersas em água por 72 horas e depois pesadas em balança hidrostática, para registro da massa saturada imersa. Logo após, as amostras foram enxugadas e novamente pesadas para registro da massa saturada após imersão.

As determinações foram obtidas pelas médias entre os resultados, com os valores expressos com duas casas decimais, de acordo com a norma referida. A absorção de água foi obtida pela equação 15:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (15)$$

Onde,

A: Absorção (%);

m_{sat} : Massa da amostra saturada após imersão (Kg);

m_s : Massa da amostra seca em estufa (Kg);

As massas específicas da amostra seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}) e real (ρ_r) foram calculadas pelas equações (16), (17) e (18), respectivamente.

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \times 1000 \quad (16)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \times 1000 \quad (17)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \times 1000 \quad (18)$$

Onde,

m_i : Massa da amostra saturada imersa (Kg).

O índice de vazios foi obtido pela equação 19.

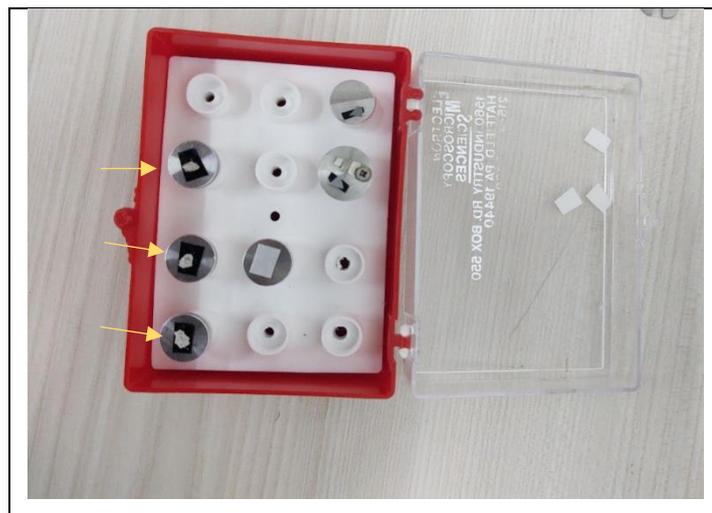
$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (19)$$

4.4.8 Análise morfológica e de composição do corpo de prova rompido

Para a caracterização microestrutural dos concretos com cinza foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura, realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais, da UACSA.

Primeiramente, as amostras de concreto foram trituradas manualmente, a fim de que fossem aproveitadas as menores partículas; separou-se uma partícula para cada compósito com cinza; e estas foram dispostas em porta-amostras metálicos, fixadas com o auxílio de fita de carbono, conforme a figura 26.

Figura 26 – Preparação das amostras dos concretos para caracterização.



Fonte: Arquivo do autor.

Após a preparação inicial das amostras, os porta-amostras foram submetidos à metalização com íons de ouro, sob os seguintes parâmetros: corrente de 40 mA; taxa de deposição de 2,92 Å/s; e tempo de 40 segundos. Na figura 27 é possível observar a metalizadora utilizada no ensaio.

Figura 27 – Amostras no processo de metalização.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Finalizado o processo de metalização, as amostras foram depositadas no Microscópio Eletrônico de Varredura VEGA3, da TESCAN, com fonte de elétrons de filamento de tungstênio e Espectômetro de Energia Dispersiva acoplado, a fim de determinar a composição elementar do material. A figura 28 ilustra o MEV utilizado na pesquisa.

Figura 28 – MEV com EDS acoplado, do laboratório de caracterização de materiais da UACSA.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

5 RESULTADOS

Abaixo foram expostos os resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos metodológicos adotados. Primeiramente, serão discutidas as caracterizações da cinza; posteriormente, as caracterizações referentes aos demais componentes do concreto; e, por fim, a análise dos concretos desenvolvidos.

5.1 CARACTERIZAÇÕES DA CINZA DE BIOMASSA MISTA

Na caracterização da cinza foi possível determinar a massa unitária compactada e a composição mineralógica, a fim de se desenvolver o traço do material.

5.1.1 Determinação da composição granulométrica da cinza

Conforme a metodologia descrita no item 4.1.2, após o peneiramento de 60 g de cinza e a pesagem do conteúdo retido em cada peneira, foi possível obter os dados contidos na tabela 10.

Tabela 10 – Composição granulométrica da cinza ensaiada.

Abertura das Peneiras	Massa Retida (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante (%)
4,75 mm	11,1551	18,59	18,59	81,41
2,36 mm	4,3675	7,28	25,87	74,13
1,18 mm	2,7582	4,60	30,47	69,53
600 µm	5,0254	8,37	38,84	61,16
300 µm	7,4118	12,35	51,19	48,81
150 µm	6,8107	11,35	62,54	37,46
75 µm	17,8984	29,83	92,37	7,63
Fundo	4,5767	7,63	100	0

Fonte: O autor (2020).

Constatou-se que o conteúdo retirado do cinzeiro da caldeira continha cerca de 62,54% de impurezas. Senger (2015) atribuiu essas impurezas aos restos da lenha que sofreu combustão incompleta e que atravessaram as grelhas do equipamento juntamente com as cinzas.

Na figura 29 é possível observar o resultado do ensaio, com a separação do material conforme sua granulometria.

Figura 29 – Cinzas peneiradas para determinação granulométrica.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Nas peneiras de abertura de 4,75 mm, 2,36 mm e 1,18 mm observou-se a presença massiva de carvão, variando apenas a granulometria. Nas peneiras de abertura de 600 µm, 300 µm e 150 µm notou-se pequenas partículas de carvão e de material orgânico não queimado.

A cinza, enquanto material pulverulento, foi obtida a partir do material retido na peneira de abertura de 75 µm (#200), representando 29,83% do material ensaiado, porém, o material de interesse do trabalho foi o resíduo passante dessa referida peneira, representando 7,63% da amostra total.

A dimensão máxima característica obtida com a CBM foi 2,36 mm, o mesmo valor encontrado por Leloup (2013).

Segundo Borlini et al. (2005), o método tradicional de determinação de composição granulométrica não é o mais indicado para cinzas, uma vez que a cinza é um aglomerado sinterizado de partículas, portanto, a curva granulométrica não representa partículas individuais de cinza, mas um aglomerado delas. Nesse sentido, a curva granulométrica para a cinza foi dispensada.

5.1.2 Determinação da massa unitária compactada da cinza

Conforme o método exposto no item 4.1.2, foi pesada a proveta vazia e, posteriormente, pesou-se a proveta contendo cinza até a marca dos 100 mL. Com os referidos procedimentos, foram obtidos os seguintes dados:

- Massa da proveta vazia (m_1): 75,3448 g = 0,0753 Kg;
- Massa da proveta + cinza (m_2): 156,2570 g = 0,1562 Kg;
- Volume da proveta (V): 100 mL = 0,0001 m³.

Aplicando os valores na equação 1, foi possível obter a massa unitária da cinza:

$$\rho_{unit.} = \frac{0,1562 - 0,0753}{0,0001} = 809 \text{ Kg/m}^3$$

Observou-se que a cinza é um material menos denso que o cimento, o que justificou a substituição deste em volume ao invés da substituição em massa, uma vez que seria necessário um grande volume de cinza para substituir o cimento em massa, diante das porcentagens de substituições estabelecidas (10, 20 e 40%), e isso poderia prejudicar o material.

O valor da massa unitária determinado pelo referido ensaio serviu para o cálculo da dosagem do concreto com a adição da cinza.

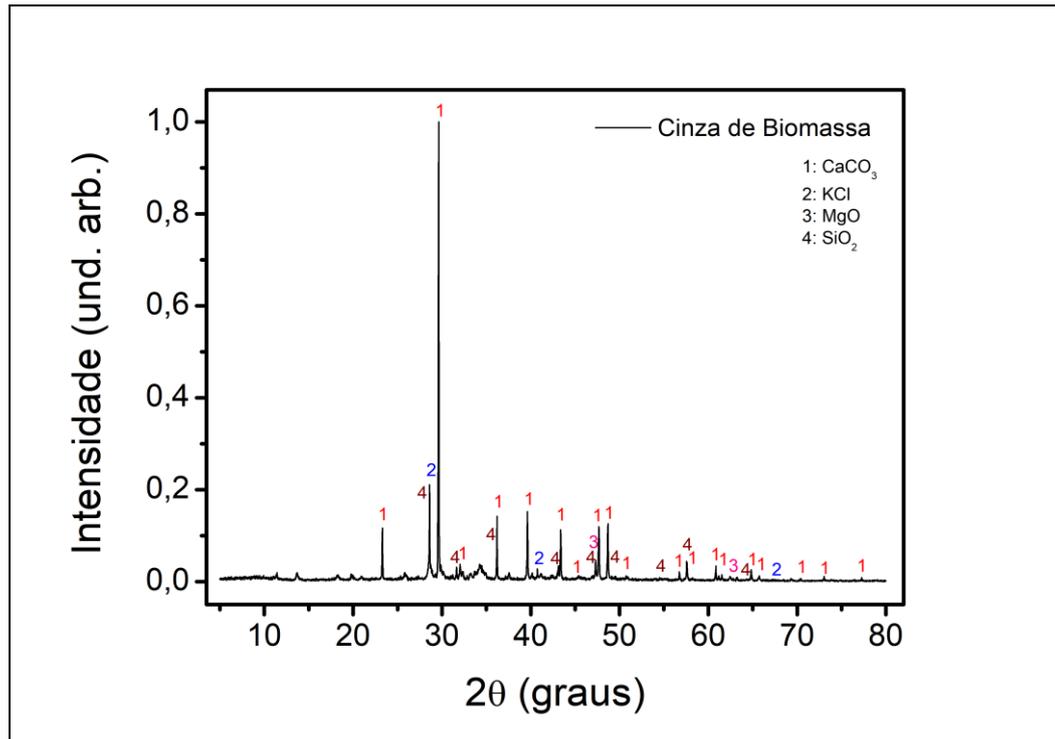
5.1.3 Determinação da composição mineralógica da cinza

Após a caracterização pelo método do DRX e a obtenção do difratograma, utilizou-se o *software* X'Pert HighScore Plus para determinação das fases mineralógicas presentes no resíduo, comparando o difratograma com padrões indexados no programa.

A partir do difratograma obtido e da comparação com os padrões encontrados no *software*, a maior parte dos picos de difração referentes à cinza de biomassa mista foi identificada conforme sua fase característica. A identificação dos picos pode ser observada na figura 30.

No gráfico, nota-se que a cinza de biomassa mista é um material com uma composição mineralógica multifásica, porém, destaca-se a grande quantidade de picos referentes à fase CaCO_3 , tendo como pico característico e de maior intensidade $2\theta = 29,6272^\circ$, além da presença considerável de SiO_2 , sendo uma fase representativa no material.

Figura 30 – Difrátograma da cinza de biomassa mista com identificação dos picos.



Fonte: O autor (2020).

Segundo Borlini *et al.* (2005), a presença de carbonato de cálcio em quantidade elevada está relacionada à quantidade de óxido de cálcio no material, enquanto a presença de óxido de silício está relacionada à fase cristalina da sílica, o quartzo, que reduz a atividade pozolânica do resíduo (MOURA *et al.*, 2012).

O padrão de difração encontrado coincide com o padrão obtido por Nascimento (2014), Pires (2016) e Lima (2019), que utilizaram a cinza da lenha de Algaroba em seus respectivos trabalhos.

Apesar da cinza utilizada nesse trabalho não ter sido puramente proveniente da lenha de Algaroba, devido à utilização de outras fontes energéticas pela lavanderia, o fato de a lenha de Algaroba ser responsável por 70% da alimentação da caldeira influenciou diretamente no tipo da cinza coletada, dada a semelhança mineralógica entre o resíduo utilizado nesse trabalho e o resíduo utilizado nos trabalhos citados.

No difratograma obtido por Nascimento (2014), além do CaCO_3 , foram observadas as fases cristalinas KCl e MgO, também encontradas no ensaio aqui relatado, ratificando a similaridade entre os resíduos.

A quantidade representativa de SiO_2 na cinza de biomassa mista pode estar atrelada à utilização do resíduo de movelaria e dos *pellets* de madeira na alimentação da caldeira, uma vez que a cinza proveniente apenas da lenha de Algaroba possui baixos teores do óxido de silício, conforme Melo (2012) e Leloup (2013).

Na tabela 11 é possível observar os teores dos óxidos contidos na cinza de Algaroba, determinados pelo método da fluorescência de raio-X (FDX). A comprovação do elevado teor de carbonato de cálcio na CBM confirma o resíduo como um potencial *filler* alternativo, como apontado por Melo (2012).

Tabela 11 – FDX da cinza da lenha de Algaroba.

Óxidos	Percentual (%)
CaO	77,85
K ₂ O	13,81
SiO ₂	4,09
Fe ₂ O ₃	2,14
SO ₃	1,60
Sc ₂ O ₃	0,27
MnO	0,12
ZnO	0,10
CuO	0,03

Fonte: Leloup (2013).

5.2 CARACTERIZAÇÕES DO CIMENTO PORTLAND

5.2.1 Determinação da massa específica do cimento

Conforme o ensaio descrito no item 4.2, a massa específica do cimento foi determinada utilizando o frasco de Le Chatelier, realizando duas leituras volumétricas: apenas com o xileno e com o xileno mais o cimento.

No ensaio, obteve-se os seguintes dados:

- Massa de cimento ensaiado (m): 60 g;
- Volume da primeira leitura (V_1): 1,10 cm³;
- Volume da segunda leitura (V_2): 20,60 cm³.

Aplicando os valores acima na equação 2, foi possível determinar a massa específica do cimento utilizado no trabalho:

$$\rho = \frac{60}{20,60 - 1,10} = 3,08 \text{ g/cm}^3$$

Na tabela 6, que apresenta as especificações físicas do cimento repassadas pelo fabricante, a massa específica média do cimento é de 3,02 g/cm³, valor bem próximo ao que foi obtido no ensaio para aferição realizado em laboratório.

Segundo Cunha (2020) o limite da massa específica para o cimento do tipo CP II-Z é de $2,8 \leq \rho \leq 3,2 \text{ g/cm}^3$, evidenciando que o valor obtido obedeceu aos parâmetros. Rodrigues (1995) complementa que a massa específica do cimento é importante para determinar o consumo de agregado miúdo no traço do concreto, justificando a sua utilização na dosagem.

5.2.2 Determinação da massa unitária do cimento

A massa unitária do cimento foi obtida conforme a metodologia explicitada no item 4.2, a partir da pesagem de uma proveta vazia e posteriormente contendo o cimento até a marca de 100 mL.

Os valores obtidos no ensaio foram:

- Massa da proveta vazia (m_1): 75,3448 g = 0,0753 Kg;
- Massa da proveta com o cimento (m_2): 197,3150 g = 0,1973 Kg;
- Volume da proveta (V): 100 mL = 0,0001 m³.

Aplicou-se os dados acima na equação 1, obtendo a massa unitária do cimento:

$$\rho = \frac{0,1973 - 0,0753}{0,0001} = 1220 \text{ Kg/m}^3$$

O valor obtido influenciou diretamente no cálculo da dosagem do concreto, além de que, segundo Cunha (2020), a partir dele é possível determinar o consumo de cimento no traço.

5.3 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO MIÚDO

5.3.1 Massa específica da areia

A determinação da massa específica da areia se deu a partir da metodologia descrita no item 4.3.1. Os valores obtidos no ensaio foram:

- Massa da amostra saturada superfície seca (m_s): 500 g;
- Massa da areia seca após estufa (m): 497 g;
- Massa do agregado + frasco (m_1): 690 g;
- Massa do agregado + frasco + água (m_2): 990 g.

Aplicando os dados na equação 4 foi possível obter o volume de água adicionada no Erlenmeyer:

$$V_a = \frac{990 - 690}{1} = 300 \text{ cm}^3$$

O dado acima calculado foi aplicado na equação 3, para determinação da massa específica do agregado seco:

$$d_1 = \frac{497}{500 - 300} = 2,48 \text{ g/cm}^3$$

Para o cálculo da massa específica do agregado saturado superfície seca foi utilizada a equação 5:

$$d_2 = \frac{500}{500 - 300} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

Já para o cálculo da massa específica aparente foi utilizada a equação 6:

$$d_3 = \frac{497}{(500 - 300) \times \frac{(500 - 497)}{1}} = 2,52 \text{ g/cm}^3$$

Meier (2011) e Metha e Monteiro (2014) afirmaram que a massa específica da areia varia entre 2500 Kg/m³ e 2700 Kg/m³. Convertendo o valor encontrado no presente trabalho, foi obtida uma massa específica aparente de 2520 Kg/m³, comprovando que a areia utilizada estava dentro das especificações.

5.3.2 Massa unitária da areia

Conforme o item 4.3.3, foi determinada a massa unitária da areia aplicando a metodologia definida pela NBR NM 45/2006.

Primeiramente, encheu-se o balde com água e registrou-se a massa do conjunto, bem como foi registrada a temperatura da água, obtendo os seguintes valores:

- Massa do balde + água (m): 12,805 Kg;
- Temperatura da água (T): 25°C.

Foi utilizada a tabela 7 para fazer a interpolação entre a temperatura registrada e os valores tabelados, onde foi determinada a massa específica de água, obtendo o valor de 997,033214 Kg/m³.

Para determinação do volume do balde, foi feita a relação entre a massa do conjunto balde + água e a massa específica de água:

$$V = \frac{12,805}{997,033214} = 0,0128431 \text{ m}^3$$

Foi registrada a massa do balde vazio e do balde com a areia, onde foram obtidos os seguintes valores:

- Massa do balde vazio (m_r): 0,360 Kg;
- Massa do balde + areia: 17,990 Kg;

Aplicando os valores acima na equação 10, foi determinada a massa unitária da areia:

$$\rho_{ap} = \frac{17,990 - 0,360}{0,0128431} = 1372,72 \text{ Kg/m}^3$$

Segundo Basílio (1995) a maioria dos agregados miúdos tem massa unitária girando em torno de 1500 Kg/m³. Agregados leves tem massa unitária menor que 1120 Kg/m³, enquanto os agregados pesados possuem massa unitária superior a 2080 Kg/m³ (SIQUEIRA, 2008). O valor obtido no presente trabalho se encontra na faixa intermediária entre agregados leves e pesados.

Conforme Meier (2011), a massa unitária da areia influencia diretamente no consumo do material no concreto.

5.3.3 Composição granulométrica da areia

Conforme o item 4.3.4, foi utilizada a norma NBR NM 248/2003 para determinar a composição granulométrica da areia.

Após peneirar 300 g de areia reservada para o ensaio e pesar o conteúdo retido de cada peneira, foram obtidos os valores apresentados na tabela 12.

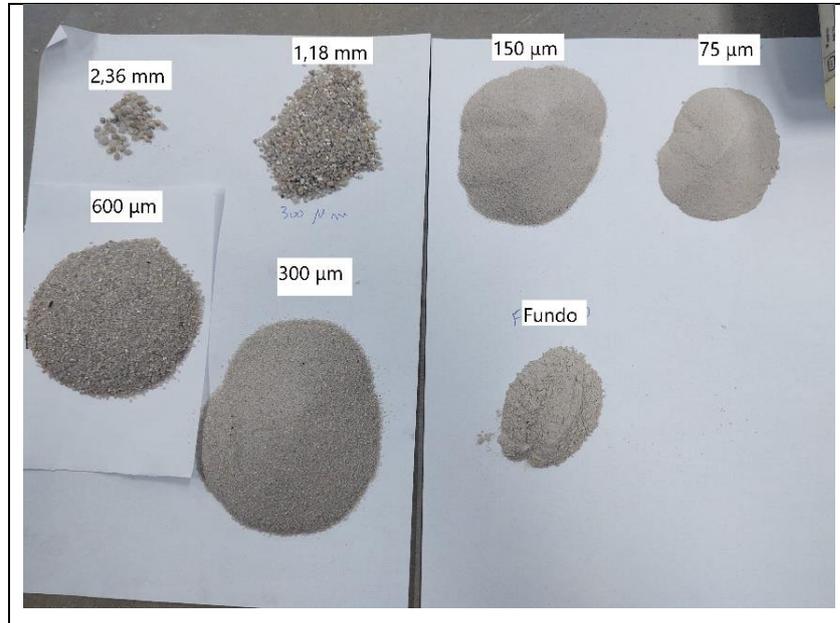
Tabela 12 – Composição granulométrica da areia.

Abertura das Peneiras	Massa Retida (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante (%)
4,75 mm	0	0	0	100
2,36 mm	3,60	1,2	1,2	98,8
1,18 mm	22,20	7,4	8,6	91,4
600 µm	66,10	22	30,6	69,4
300 µm	108,90	36,3	66,8	33,2
150 µm	62,80	20,9	87,7	12,3
75 µm	26,40	8,8	96,5	3,5
Fundo	10,40	3,5	100	0

Fonte: O autor (2020).

Na figura 31 é possível observar o agregado peneirado, separado por granulometria.

Figura 31 – Areia peneirada para determinação granulométrica.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Com as porcentagens retidas acumuladas, apresentadas na tabela 12, foi possível calcular o módulo de finura da areia, a partir do somatório do percentual retido em cada peneira da série normal, dividido por 100:

$$MF = \frac{0 + 1,2 + 8,6 + 30,6 + 66,8 + 87,7}{100} = 1,95$$

Conforme Hagemann (2011), a areia é considerada fina quando possui módulo de finura entre 1,71 e 2,85, faixa que representa o módulo de finura obtido da areia utilizada no trabalho.

A dimensão máxima característica da areia ensaia foi definida conforme a peneira onde o agregado ficou retido acumulado ligeiramente inferior ou igual a 5% (ABNT, 2003). Observando a tabela 12, notou-se que a dimensão máxima característica correspondeu a 2,36 mm.

A tabela 13 mostra os limites de distribuição granulométrica para o agregado miúdo.

Tabela 13 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Abertura de Malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

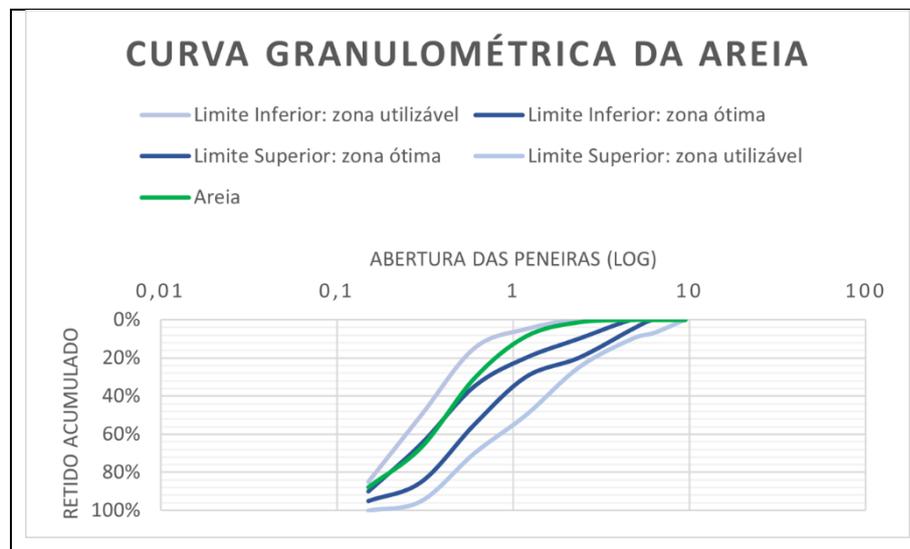
O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90;

O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20;

O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: Adaptada de ABNT (2019).

Confrontando as tabelas 12 e 13 foi possível classificar a areia como fina, conforme sua curva granulométrica, ilustrada na figura 32, que ficou entre as zonas ótima e utilizável dos limites inferiores e com módulo de finura compatível aos limites da zona.

Figura 32 – Curva granulométrica da areia.

Fonte: O autor (2020).

5.3.4 Teor de umidade da areia

O teor de umidade da areia foi determinado a partir da metodologia especificada pela norma NBR 9775/2012. Conforme o item 4.3.5, foi realizada a leitura do volume de areia inserida no frasco de Chapman e este valor foi utilizado para essa determinação, juntamente com a densidade saturada de superfície seca da areia.

Os valores obtidos foram:

- Volume de areia no frasco de Chapman (V): 406 mL;
- Densidade saturada de superfície seca da areia (g/mL): $2,5 \text{ g/cm}^3 = 2,5 \text{ g/mL}$.

Com os referidos valores aplicados na equação 11, determinou-se o teor de umidade da areia:

$$h = \frac{[500 - (406 - 200) \times 2,5]}{(406 - 700) \times 2,5} \times 100 = \frac{-15}{-735} \times 100 = 2\%$$

Conforme Cunha (2020), o teor de umidade indica a quantidade de água presente na amostra, interferindo diretamente no traço. Esse valor foi descontado no cálculo da dosagem do concreto, evitando prejuízo ao compósito por excesso de água.

5.4 CARACTERIZAÇÕES DO AGREGADO GRAÚDO

5.4.1 Massa específica da brita

Aplicando a metodologia descrita na norma NBR NM 53/2009, conforme o item 4.3.2, foi possível obter os seguintes valores para determinação da massa específica da brita:

- Massa do agregado seco (m): 2,995 Kg = 2995 g;
- Massa do agregado em água (m_a): 1,885 Kg = 1885 g;
- Massa do agregado na condição saturada superfície seca (m_s): 3,005 Kg = 3005 g.

A massa específica do agregado seco foi obtida aplicando os valores acima mencionados na equação 7:

$$d = \frac{2995}{2995 - 1885} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

Para a massa específica da brita na condição saturada superfície seca, os valores foram aplicados na equação 8:

$$d_s = \frac{3005}{3005 - 1885} = 2,68 \text{ g/cm}^3$$

Já para a determinação da massa específica aparente, os valores foram aplicados na equação 9:

$$d_a = \frac{2995}{3005 - 1885} = 2,67 \text{ g/cm}^3$$

A massa específica da brita obtida no trabalho foi semelhante à massa específica da brita granítica obtida por Silva Júnior e Martinelli (2014), sendo esta de 2,64 g/cm³. Cunha (2020) afirma ainda que a massa específica da brita gira em torno de 2,70 g/cm³, onde se encaixa o valor obtido.

5.4.2 Massa unitária da brita

De acordo com a norma NBR NM 45/2006, foi obtida a massa unitária da brita a partir da metodologia exposta no item 4.3.3. Como a metodologia foi a mesma empregada para a areia, a massa do balde + água e a temperatura da água foram reaproveitadas, onde foi determinado o volume do balde.

Os valores obtidos no ensaio foram:

- Volume do balde (V): 0,0128431 m³;
- Massa do balde vazio (m_r): 0,360 Kg;
- Massa do balde + brita (m_{ar}): 19,410 Kg.

Aplicando os valores na equação 10, foi obtida a massa unitária da brita:

$$\rho_{ap} = \frac{19,410 - 0,360}{0,0128431} = 1483,30 \text{ Kg/m}^3$$

O valor obtido no ensaio de massa unitária da brita foi próximo aos 1510 Kg/m³, valor determinado por Silva Júnior e Martinelli (2014). E valor obtido nesse trabalho foi utilizado na dosagem do concreto e na determinação do consumo de brita no traço.

5.4.3 Composição granulométrica da brita

A partir da metodologia determinada pela norma NBR NM 248/2003, descrita no item 4.3.4, a brita foi peneirada através da série de peneiras ABNT estabelecidas. Na tabela 14 observa-se os valores obtidos no ensaio.

Tabela 14 – Composição granulométrica da brita.

Abertura das Peneiras	Massa Retida (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Percentual Passante (%)
31,5 mm	0	0	0	100
25 mm	0	0	0	100
19 mm	515	10,3	10,3	89,7
12,5 mm	3970	79,4	89,7	10,3
9,5 mm	460	9,2	98,9	1,1
6,3 mm	50	1	99,9	0,1
4,75 mm	0	0	99,9	0,1
2,36 mm	0	0	99,9	0,1
1,18 mm	0	0	99,9	0,1
600 µm	0	0	99,9	0,1
300 µm	0	0	99,9	0,1
150 µm	0	0	99,9	0,1
Fundo	5	0,1	100	0

Fonte: O autor (2020).

A figura 33 corresponde ao material ensaiado, separado conforme sua granulometria.

Figura 33 – Brita peneirada para determinação granulométrica.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Com as porcentagens retidas acumuladas, apresentadas na tabela 14, foi possível calcular o módulo de finura da brita a partir do somatório do percentual retido em cada peneira da série normal, dividido por 100:

$$MF = \frac{10,3 + 98,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9 + 99,9}{100} = 7,09$$

A dimensão máxima característica da brita foi determinada pela peneira onde o agregado ficou retido acumulado ligeiramente inferior ou igual a 5% (ABNT, 2003), correspondendo a 25 mm.

Confrontando a tabela 14 com a tabela 15, a brita utilizada nesse trabalho possui zona granulométrica de 9,5/25, sendo classificada como brita tipo 2 (ABNT, 2019), por seus percentuais retidos acumulados coincidirem com os limites estabelecidos pela norma vigente.

Segundo Senna e Resende (2009), a brita tipo 2 é a mais utilizada em obras que exijam uma maior resistência do concreto, sobretudo nas aplicações em formas pesadas.

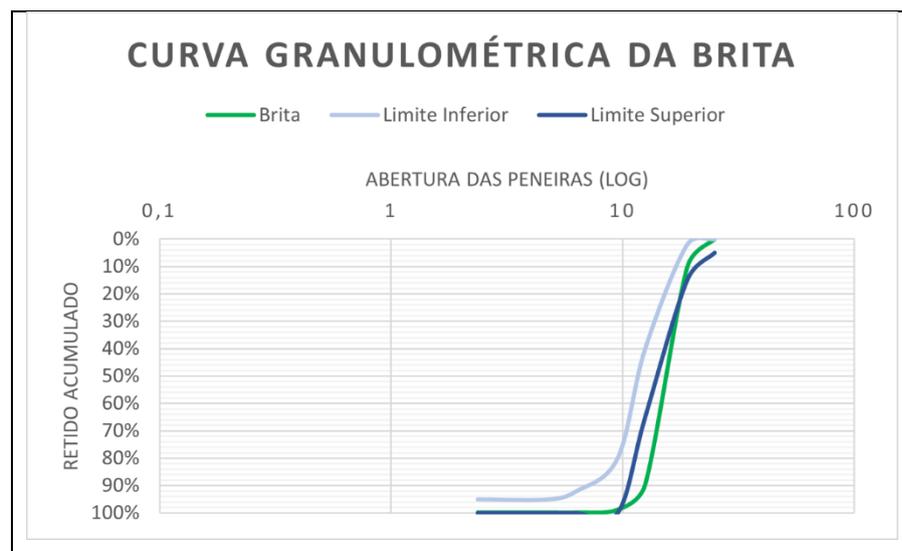
Tabela 15 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Abertura de Malha	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona Granulométrica				
	d/D				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	–	–	–	–	0-5
63 mm	–	–	–	–	5-30
50 mm	–	–	–	0-5	75-100
37,5 mm	–	–	–	5-30	90-100
31,5 mm	–	–	0-5	75-100	95-100
25 mm	–	0-5	5-25	87-100	–
19 mm	–	2-15	65-95	95-100	–
12,5 mm	0-5	40-65	92-100	–	–
9,5 mm	2-15	80-100	95-100	–	–
6,3 mm	40-65	92-100	–	–	–
4,75 mm	80-100	95-100	–	–	–
2,36 mm	95-100	–	–	–	–

Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

Fonte: Adaptada de ABNT (2019).

Com os valores acima mencionados, foi possível obter a curva granulométrica da brita, conforme a figura 34, conferindo que a brita ensaiada corresponde aos limites da brita tipo 2, com um desvio previsto em norma.

Figura 34 – Curva granulométrica da brita.

Fonte: O autor (2020).

5.5 ANÁLISES DOS CONCRETOS DESENVOLVIDOS

5.5.1 Determinação do consumo de água (C_a)

O consumo de água foi determinado a partir da metodologia expressa por Rodrigues (1995), fazendo uso da tabela 16:

Tabela 16 – Consumo de água aproximado (L/m^3).

Abatimento do 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: Adaptada de Rodrigues (1995).

Conforme o item 4.4.3, a classe de consistência para o concreto foi definida em S50, onde o abatimento do tronco de cone ficou estabelecido em 50 mm. Já no item 5.4.3, a dimensão máxima característica da brita foi determinada em 25 mm.

Diante desses valores, utilizando a tabela 16, foi possível determinar o consumo de água aproximado em $190 L/m^3$.

5.5.2 Determinação do consumo de cimento (C)

O consumo de cimento foi determinado pela equação 20, presente nos parâmetros de dosagem de Rodrigues (1995):

$$C = \frac{C_a}{a/c} \quad (20)$$

Onde,

C_a : Consumo de água;

a/c : Relação água/cimento.

Conforme o item 4.4.1, a relação a/c, obtida pelo método da curva de Abrams, foi de 0,45. Aplicando os valores conhecidos na equação 20, foi obtido o consumo de cimento:

$$C = \frac{190}{0,45} = 422,22 \text{ Kg/m}^3$$

5.5.3 Determinação do consumo de agregado miúdo (C_m) e agregado graúdo (C_b)

Segundo Rodrigues (1995), o teor ótimo de brita é definido pela relação entre a dimensão máxima característica do agregado graúdo e o módulo de finura do agregado miúdo; já o consumo de areia é definido em função dos teores de pasta de cimento e agregado graúdo no concreto.

Para a determinação do C_b foi necessário determinar o volume de brita no concreto, conforme a tabela 17.

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

MF (areia)	$D_{\text{máx. da Brita}}$ (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	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	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: Adaptada de Rodrigues (1995).

No item 5.3.3, o módulo de finura da areia foi calculado em 1,95, mas por não haver valor correspondente na tabela, foi utilizado MF = 2. Já a dimensão máxima característica da brita foi de 25 mm. Correlacionando os valores na tabela 17, o volume de brita no concreto foi de 0,775.

O consumo da brita foi calculado pela equação 21:

$$C_b = V_c \times M_c \quad (21)$$

Onde,

V_c : Volume compactado seco do agregado graúdo por m^3 de concreto;

M_c : Massa unitária compactada do agregado graúdo.

A massa unitária da brita foi determinada no item 5.4.2. Aplicando os valores conhecidos na equação 21, foi obtido o consumo de brita:

$$C_b = 0,775 \times 1483,30 = 1149,56 \text{ Kg}/m^3$$

Para o consumo de areia, primeiramente foi calculado o volume de areia em um metro cúbico de concreto, sendo este a soma da relação entre o consumo dos demais componentes e suas respectivas massas específicas. A equação 22 foi utilizada para essa determinação:

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (22)$$

Onde,

ρ_c : Massa específica do cimento (Kg/m^3);

ρ_b : Massa específica da brita (Kg/m^3);

ρ_a : Massa específica da água ($1000 \text{ Kg}/m^3$).

Aplicando a massa específica do cimento (item 5.2.1) e a massa específica da brita (item 5.4.1) na equação 22, bem como os demais dados necessários, foi determinado o volume de areia no concreto:

$$V_m = 1 - \left(\frac{422,22}{3080} + \frac{1149,56}{2670} + \frac{190}{1000} \right) = 0,242$$

O C_m foi calculado pela equação 23, sendo esta a multiplicação entre o volume de areia no concreto e a massa específica da areia:

$$C_m = V_m \times \rho_m \quad (23)$$

Onde,

V_m : volume de areia em um m^3 de concreto;

ρ_m : Massa específica da areia (Kg/m^3).

A massa específica da areia foi determinada no item 5.3.1 e aplicada na equação 23 para a obtenção do consumo de areia no concreto:

$$C_m = 0,242 \times 2520 = 609,84 \text{ Kg}/m^3$$

5.5.4 Determinação do traço

Pelo método ABCP, a determinação do traço se dá através da equação 24, onde o "1" representa a proporção de cimento (RODRIGUES, 1995):

$$1: \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : \frac{C_a}{C} \quad (24)$$

Aplicando os valores dos consumos de areia (C_m), brita (C_b) e água (C_a) numa relação com o consumo de cimento (C), foi obtido o traço padrão para o concreto:

$$1: \frac{609,84}{422,22} : \frac{1149,56}{422,22} : \frac{190}{422,22} = 1: 1,44: 2,72: 0,45$$

Para um saco comercial comum de cimento (50 Kg), o traço em massa é definido pela multiplicação do traço obtido pelo estudo de dosagem e a massa do cimento, sendo então:

$$50: 72: 136: 22,5$$

Os dados obtidos foram organizados na tabela 18 para melhor visualização.

Tabela 18 – Dados da dosagem do concreto padrão.

Componente	Consumo (Kg/m³)	Traço Unitário	Traço em Massa (Kg)
Cimento	422,22	1	50
Areia	609,84	1,44	72
Brita	1149,56	2,72	136
Água	190	0,45	22,5

Fonte: O autor (2020).

Dos valores do traço em massa, foi calculado o volume real do concreto para um saco de cimento de 50 Kg, fazendo uma relação entre a massa dos componentes e suas respectivas massas específicas. Na tabela 19 é possível observar os dados.

Tabela 19 – Volume real para um saco de cimento.

Componente	Volume Real (m³)
Cimento	0,0162
Areia	0,0286
Brita	0,0509
Água	0,0225
Total	0,1182

Fonte: O autor (2020).

Como foi definido o molde de corpo de prova do tipo 10 x 20, foi necessário calcular o volume do molde através da equação 25:

$$V_{CP} = \frac{(\pi \cdot b^2)}{4} x h \quad (25)$$

Onde,

b: Diâmetro do molde (m);

h: Altura do molde (m).

Sabendo que o diâmetro do molde era de 0,1 m e a altura de 0,2 m, o volume do molde foi obtido pela aplicação da equação 25, onde $V_{cp} = 0,0016 \text{ m}^3$.

Ao multiplicar o volume real de cada componente para um saco de cimento pelo volume do molde e dividir o resultado individual pelo volume real total, foi obtido o volume real de cada componente no corpo de prova.

Multiplicando o volume real de cada componente no corpo de prova por sua respectiva massa específica, foi obtida a massa necessária de cada componente para moldar um corpo de prova. Os dados estão apresentados na tabela 20.

Tabela 20 – Volume real e massa de cada componente para moldagem de um corpo de prova.

Componente	Volume Real (m³)	Massa (Kg)
Cimento	0,00022	0,6776
Areia	0,00038	0,9576
Brita	0,00068	1,8156
Água	0,00030	0,30

Fonte: O autor (2020).

Multiplicando o valor da massa de cimento para a moldagem de um corpo de prova pelo número total definido de CPs por traço (26), foi obtido o valor de 17,6176 Kg de cimento. Por segurança, considerando a perda de material na moldagem, foi definido utilizar o valor de referência de 20 Kg de cimento para o traço, aumentando proporcionalmente a quantidade, em massa, dos demais componentes.

Para o compósito com a substituição volumétrica do cimento pela cinza, foi feita uma relação entre a massa de referência de cimento para o traço (20 Kg) e a massa unitária do aglomerante. O resultado foi multiplicado por cada porcentagem de substituição (10%, 20% e 40%), obtendo o volume de cimento para cada traço.

Os respectivos volumes foram multiplicados pela massa unitária da cinza, obtendo a massa necessária de cinza para cada traço. Já a massa de cimento para cada traço foi obtida pela multiplicação da massa de referência pelo percentual volumétrico restante, descontado o percentual de cinza (90%, 80% e 60%).

Subtraindo os 2% de umidade da areia da massa de água de amassamento de cada traço, a tabela 21 apresenta os traços desenvolvidos.

Tabela 21 – Dosagem para a produção de 26 CPs cilíndricos de concretos por traço.

Traço	Teor de Cinza (%)	Quantidade dos Componentes (Kg)				
		Cimento	Areia	Brita	Cinza	Água
T0	0	20	28,8	54,4	0	8,82
T10	10	18	28,8	54,4	1,33	8,82
T20	20	16	28,8	54,4	2,65	8,82
T40	40	12	28,8	54,4	5,30	8,82

Fonte: O autor (2020).

5.5.5 Análise da consistência dos concretos

Conforme o item 4.4.3, seguindo as determinações da NBR NM 67/1998, para o presente trabalho foi estabelecido o limite de 50 ± 10 mm para o abatimento do concreto, cujos CPs só foram moldados após conformidade com essa condição.

Observou-se que conforme foi adicionada cinza em detrimento do cimento, a consistência do concreto no estado plástico foi reduzida, não atendendo aos limites definidos de abatimento. Optou-se por adicionar água na mistura, a fim de conferir maior fluidez e não modificar o balanceamento volumétrico entre cimento e cinza.

Na tabela 22 é possível observar a relação entre o adensamento e o teor de água adicionado.

Tabela 22 – Teor de água adicionada para alcance do adensamento estabelecido.

Traço	Abatimento (mm)	Água adicionada (%)	Relação a/c
T0	50	0	0,45
T10	45	5,42	0,52
T20	50	6,53	0,59
T40	40	8,03	0,79

Fonte: O autor (2020).

Tutikian e Helene (2011) citam o método de dosagem IBRACON, que relaciona a interferência do teor de cimento na proporção total dos materiais com a consistência do concreto. Essa observação pode explicar o fato de que a redução do teor de cimento nos traços T10, T20 e T40 provocou a produção de concretos menos fluidos.

Nascimento *et al.* (2016) observaram que o acréscimo de cinza de Algaroba no concreto diminuiu a fluidez do material no estado fresco, devido ao acréscimo de finos no sistema. Também observaram que o aumento do tempo de mistura provocou um abatimento dentro dos limites estabelecidos.

Bauer (2008) cita ainda que o principal fator de influência na consistência do concreto é a relação água/mistura seca, a relação percentual entre o teor de massa de água e massa de cimento e agregados. Como observado na tabela 22, o acréscimo de água foi essencial para que o concreto fosse enquadrado dentro dos limites escolhidos, confirmando a observação do referido autor.

5.5.6 Determinação da resistência à compressão dos concretos desenvolvidos e análise estatística dos resultados

Nos apêndices A, B, C e D é possível observar os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão dos compósitos T0, T10, T20 e T40, respectivamente, calculados com base na equação 12. Pelo número total de CPs rompidos por concreto (22), foram utilizados 11 exemplares, isto é, 11 pares de CPs, para as determinações abaixo descritas.

Conforme a NBR 12655/2015, para a resistência característica de cada exemplar foi considerado o maior valor de resistência entre o par de CPs. Na tabela 23 estão organizados os dados da resistência característica dos exemplares de cada traço.

Tabela 23 – Resistência característica por exemplar (MPa).

Exemplar	Traço			
	T0	T10	T20	T40
1	36,0199	30,4814	26,7635	12,2486
2	31,2172	28,9957	26,8526	13,0819
3	33,7536	32,1238	27,5402	12,6687
4	32,0602	28,4569	25,3247	12,6815
5	31,9706	29,6453	26,0598	12,8215
6	34,1369	28,3932	25,4521	14,1471
7	34,5430	27,2983	26,1303	14,6168
8	36,3096	27,6930	25,7831	14,0542
9	38,8558	27,7439	25,0319	14,9396
10	37,7646	29,1126	26,4235	15,7840
11	38,8033	26,5852	25,3629	13,2304

Fonte: O autor (2020).

A mesma norma estabelece que para o cálculo da resistência característica à compressão estimada do traço, os valores de resistência característica por exemplar devem ser organizados de forma crescente, porém, caso o número de exemplares seja ímpar, deve-se desconsiderar o exemplar de maior resistência.

A partir disso, foram calculados os valores de resistência característica à compressão estimada de cada compósito, aplicando os valores da tabela 23 na equação 13, onde o número de exemplares considerados (n) foi igual a 10.

No traço T0, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{31,2172 + 31,9706 + 32,0602 + 33,7536}{5 - 1} \right] - 34,1369 = 30,3639MPa$$

No traço T10, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{26,5852 + 27,2983 + 27,6930 + 27,7439}{4} \right] - 28,3932 = 26,2670MPa$$

No traço T20, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{25,0319 + 25,3247 + 25,3629 + 25,4521}{4} \right] - 25,7831 = 24,8027MPa$$

No traço T40, o $f_{ck,est}$ foi:

$$f_{ck,est} = 2 \left[\frac{12,2486 + 12,6687 + 12,6815 + 12,8215}{4} \right] - 13,0819 = 12,1282MPa$$

Para uma melhor compreensão dos dados, foi organizada a tabela 24 a partir do cálculo das medidas estatísticas, sendo os quartis calculados pela equação 14.

Tabela 24 – Estatística descritiva dos traços.

Traço	Menor f_c (MPa)	Maior f_c (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Q_1 (MPa)	Mediana (MPa)	Q_2 (MPa)	$f_{ck,est}$ (MPa)
T0	31,22	38,85	35,04	2,73	32,06	34,54	37,76	30,36
T10	26,58	32,12	28,77	1,56	27,69	28,46	29,64	26,27
T20	25,03	27,54	26,06	0,77	25,36	26,06	26,76	24,80
T40	12,25	15,78	13,66	1,12	12,68	13,23	14,62	12,13

Fonte: O autor (2020).

Com base na resistência característica estimada do concreto padrão, o T10 teve uma redução de 13,47% de resistência à compressão, enquanto o T20 reduziu em 18,31% a sua resistência e o T40 em 60,05%.

Gluitz e Marafão (2013) atribuem essa redução de resistência através da substituição volumétrica do cimento pela cinza à redução de silicatos no sistema, uma vez que as cinzas possuem baixo teor de óxido de silício em relação ao cimento e os silicatos são responsáveis por atribuir resistência ao material ao longo da cura, por terem uma hidratação lenta. Desta feita, quanto maior a proporção de cinza em substituição ao cimento, menor será a resistência do material.

Resende (2013) concluiu que a substituição do cimento pela cinza *in natura* do cavaco de eucalipto obteve melhor resultado de resistência com a proporção de 5% de cinza, enquanto as substituições em 10% e 15% diminuíram a resistência.

Nascimento *et al.* (2016) produziram concreto com adição de cinza de lenha de Algaroba, em relação à massa do cimento, nas proporções de 5%, 10% e 15%, sendo utilizado um cimento do tipo CP II-Z 32. Os autores observaram que a adição de 5% provocou um aumento de 19,3% de resistência em relação ao concreto padrão, enquanto as demais proporções reduziram a resistência em 18,3% e 12,3%, respectivamente.

Para Dal Molin (2005), esse incremento se explica pelo aumento da resistência na zona de transição do concreto com adição mineral, em função de um refinamento da porosidade.

Lima (2019) destacou que a cinza da lenha de Algaroba, dada a sua característica inerte, tem grande eficiência como adição, podendo até substituir o *filler* calcário do concreto autoadensável em até 50%.

Observando a NBR 8953/2015, a resistência característica à compressão do concreto desenvolvido pelo traço T10, sendo esta igual a 26,27 MPa, configura o concreto como um material intermediário entre as classes de compressão C25 e C30; já o concreto do traço T20, de $f_{ck,est}$ igual a 24,59 MPa, estaria classificado na intermediação entre as classes C20 e C25.

Contudo, os dois traços produziram concretos que podem ser utilizados para fins estruturais, uma vez que a norma estabelece resistência característica mínima de 20 MPa para esse fim. Esse fato também foi observado por Vieira (2017), quando substituiu o cimento por 10% de cinza de lenha de Eucalipto no concreto.

A resistência média do concreto produzido pelo traço T40 foi de 13,66 MPa, assemelhando-se aos 13,33 MPa de resistência média de um concreto convencional produzido em uma obra de pequeno porte, avaliado por Barboza e Bastos [s.d]. Segundo os autores, esse valor de resistência denota a desqualificação do material.

Na pesquisa citada, o baixo valor foi atribuído aos traços tradicionais executados por pedreiros em pequenas obras, cujas proporções dos componentes não são racionais; no caso da presente pesquisa, o valor pode ser atribuído ao excesso de cinza em detrimento de um maior volume de cimento.

Realizada a ANOVA com um nível de significância (α) de 0,05, obteve-se um valor-P igual a $1,71 \times 10^{-27}$, denotando que há diferença significativa entre pelo menos uma média com as demais médias dos traços. Verifica-se os valores da ANOVA na tabela 25.

Tabela 25 – Análise de Variância para os traços.

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre os grupos	2657,72	3	885,907	301,7	$1,71 \times 10^{-27}$	2,838745
Dentro dos grupos	117,445	40	2,93611			
Total	2775,17	43				

Fonte: O autor (2020).

A fim de determinar quais médias diferiram entre si, foi aplicado o teste de Tukey, com nível de significância de 5%. As médias obtidas estão organizadas na tabela 26.

Tabela 26 – Teste de Tukey entre os traços.

Comparação entre Médias				
	T0	T10	T20	T40
T0		0,000163	0,000163	0,000163
T10	12,12		0,003512	0,000163
T20	17,37	5,244		0,000163
T40	41,38	29,25	24,01	

Fonte: O autor (2020).

Comprovou-se que o tratamento T40 diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, bem como os tratamentos T10 e T20 diferiram estatisticamente do T0, porém, o tratamento T20 diferiu estatisticamente do T10. Com isso, confirma-se que os traços dos concretos contendo cinza não se mostraram eficientes em relação ao concreto desenvolvido com o traço padrão.

5.5.7 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos

Conforme a norma NBR 9778/2009, os indicadores foram determinados por meio das equações 15, 16, 17, 18 e 19 e expressos com duas casas decimais. Na tabela 27 estão organizados os valores obtidos para os CPs de cada traço, onde M_s é a massa seca; M_i é a massa saturada imersa; M_{sat} é a massa saturada após imersão; ρ_s é a massa específica seca; ρ_{sat} é a massa específica saturada; e ρ_r é a massa específica real.

A norma estabelece que os valores devem ser apresentados através de suas médias para efeito de análise. Na tabela 28 é possível observar a média e o desvio padrão (DP) dos valores obtidos.

A norma NBR 8953/2015 estabelece que todo concreto com massa específica seca compreendida entre 2000 Kg/m^3 e 2800 Kg/m^3 é classificado como concreto normal, abaixo de 2000 Kg/m^3 é concreto leve e acima de 2800 Kg/m^3 é concreto pesado.

Tabela 27 – Valores de absorção, índice de vazios e massa específica obtidos por indivíduos.

Traço	M _s (Kg)	M _i (Kg)	M _{sat} (Kg)	Absorção (%)	Vazios (%)	ρ _s (Kg/m ³)	ρ _{sat} (Kg/m ³)	ρ _r (Kg/m ³)
T0	3,58	2,17	3,72	3,81	8,81	2307,39	2395,49	2530,32
	3,55	2,16	3,69	3,94	9,15	2320,26	2411,76	2553,95
	3,59	2,17	3,73	3,66	8,48	2313,82	2398,71	2528,46
	3,56	2,15	3,69	3,67	8,50	2314,28	2399,35	2529,45
T10	3,53	2,13	3,69	4,52	10,25	2266,02	2368,58	2525,00
	3,48	2,11	3,66	5,02	11,32	2255,66	2368,93	2543,79
	3,50	2,12	3,67	4,86	10,96	2258,06	2367,74	2536,23
	3,50	2,11	3,67	4,70	10,61	2254,01	2360,12	2521,58
T20	3,55	2,15	3,71	4,64	10,54	2268,37	2373,80	2535,71
	3,53	2,14	3,71	4,95	11,18	2258,78	2370,60	2543,16
	3,57	2,16	3,73	4,47	10,15	2269,84	2371,42	2526,50
	3,54	2,15	3,72	5,08	11,46	2254,77	2369,42	2546,76
T40	3,45	2,11	3,65	5,94	13,26	2233,00	2365,69	2574,62
	3,48	2,13	3,69	6,03	13,46	2230,76	2365,38	2577,77
	3,50	2,15	3,73	6,71	14,82	2208,20	2356,46	2592,59
	3,46	2,12	3,69	6,64	14,64	2203,82	2350,31	2582,08

Fonte: O autor (2020).

Tabela 28 – Valores médios de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos.

Indicadores	T0		T10		T20		T40	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Absorção (%)	3,77	0,13	4,77	0,21	4,78	0,28	6,33	0,40
Vazios (%)	8,73	0,31	10,78	0,46	10,83	0,60	14,04	0,80
ρ _s (Kg/m ³)	2313,94	5,26	2258,44	5,32	2262,94	7,33	2218,94	15,07
ρ _{sat} (Kg/m ³)	2401,33	7,16	2366,34	4,18	2371,31	1,85	2359,46	7,45
ρ _r (Kg/m ³)	2535,54	12,29	2531,65	10,23	2538,03	8,96	2581,76	7,84

Fonte: O autor (2020).

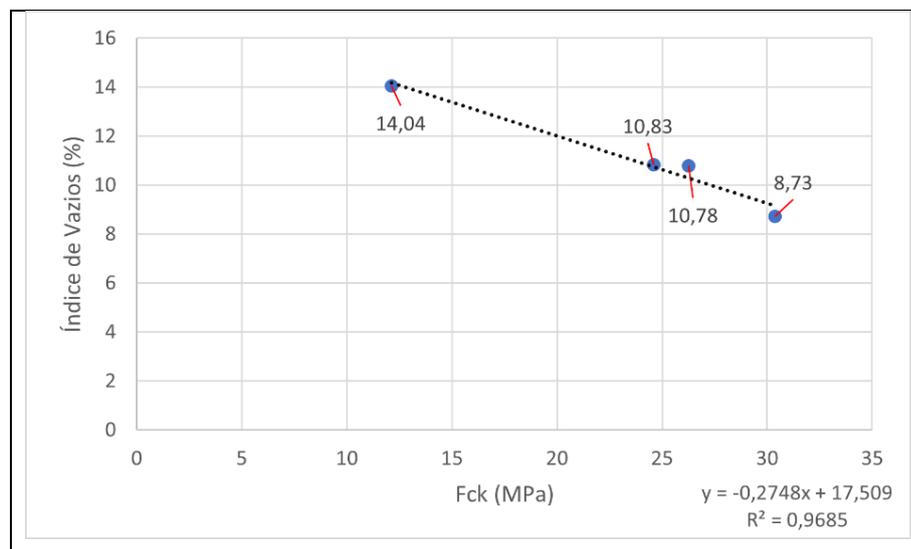
Conforme os valores obtidos de massa específica seca no ensaio descrito, os concretos desenvolvidos a partir dos traços T0, T10, T20 e T40 foram classificados como concreto normal.

Observou-se um acréscimo de porosidade e absorção diante das adições de cinza em relação ao concreto de referência (T0). O traço T10 apresentou um acréscimo de 23,48% de vazios e 26,52% de absorção; o traço T20 teve um aumento de 24,05% de vazios e 26,79% de absorção; já o traço T40 foi acrescido de 60,82% de vazios e 67,90% de absorção.

Mehta e Monteiro (2014) destacaram que a porosidade da pasta e dos agregados influencia diretamente na porosidade do concreto, que tem uma relação inversamente proporcional à resistência mecânica. Esse fato pode ser observado nos valores aqui obtidos, uma vez que, conforme aumentou a proporção de cinza no concreto, aumentou a porosidade e diminuiu a resistência característica do material.

Na figura 35, é possível observar pelo gráfico de dispersão que há uma forte correlação negativa entre a resistência e o índice de vazios, que caracteriza a porosidade. Ao passo que aumentou o índice de vazios, diminuiu a resistência à compressão do concreto.

Figura 35 – Correlação entre a resistência e o índice de vazios.

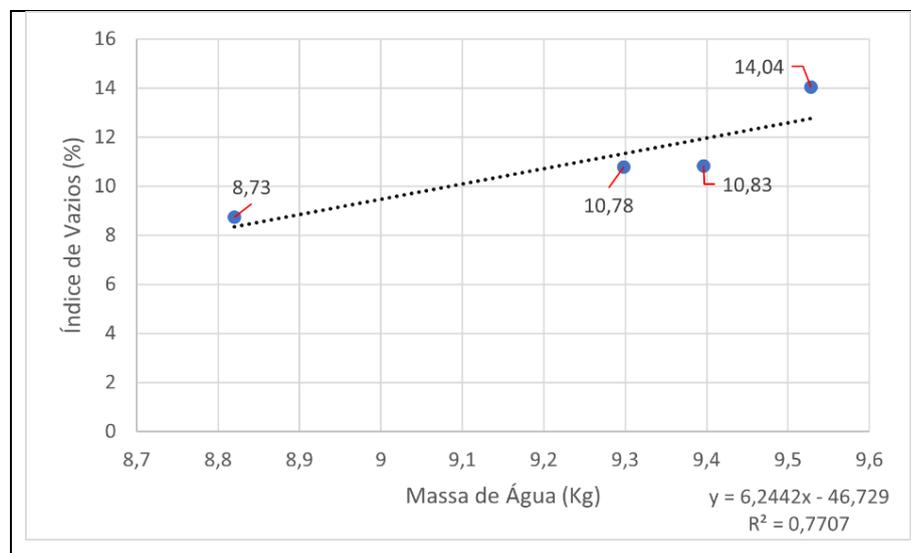


Fonte: O autor (2020).

Festugato (2017) cita ainda que a porosidade no concreto está relacionada ao teor de cimento e a quantidade de água na mistura. Essa constatação também pode ser observada no presente trabalho, dada a redução do volume de cimento, conforme a substituição por cinza, e a necessidade de adição de água para alcançar o abatimento desejado do concreto.

Na figura 36, observa-se que há uma forte correlação positiva entre a massa de água do traço e o índice de vazios. Conforme foi adicionada água no traço, aumentou proporcionalmente a porosidade do concreto.

Figura 36 – Correlação entre a quantidade de água no traço e o índice de vazios.



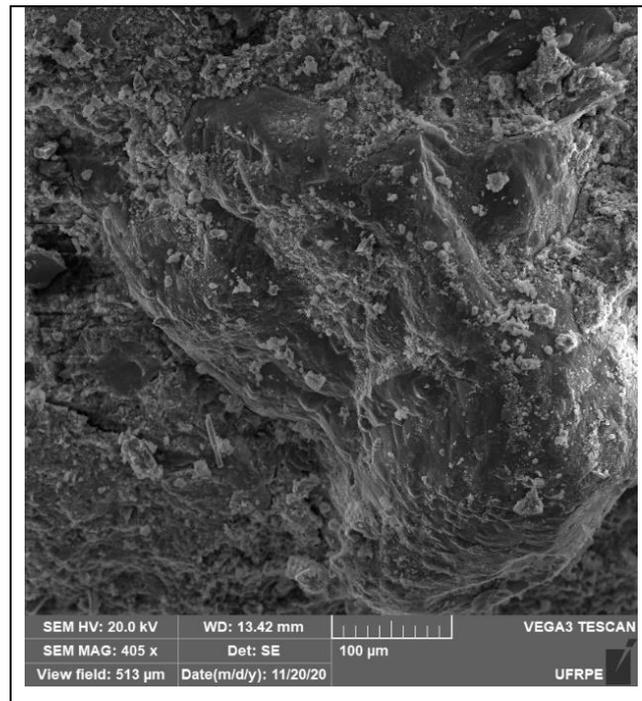
Fonte: O autor (2020).

5.5.8 Análise microestrutural do concreto com CBM

Nas figuras 37, 38 e 39, observa-se as micrografias das partículas da pasta do concreto dos traços T10, T20 e T40 obtidas pela aplicação do MEV. Destaca-se a visualização da mistura dos materiais para cada traço, visto uma maior presença de material granular entre os traços na pasta de cimento endurecida.

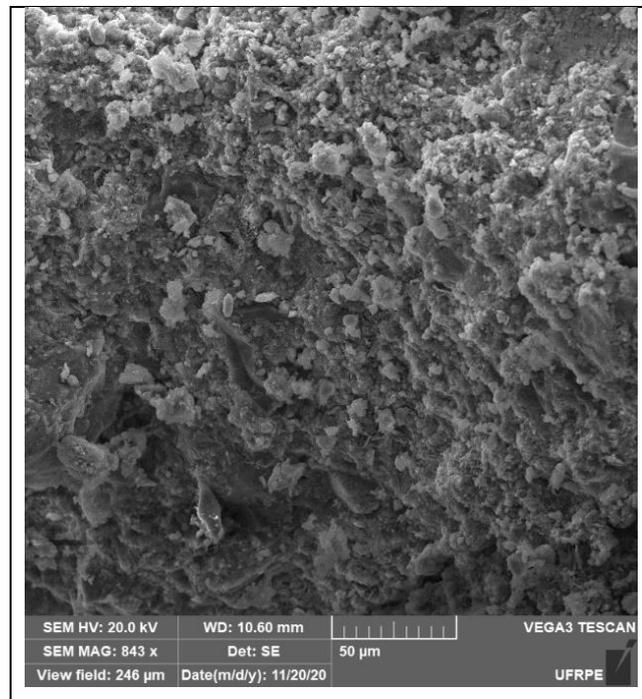
Nascimento *et al.* (2019) atribuem essa boa interação física entre cinza e cimento à área superficial específica da cinza, que gira em torno de 4400 cm²/g, isto é, um valor próximo à área superficial específica do cimento utilizado nessa pesquisa que foi de 4546 cm²/g.

Figura 37 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T10, com resolução de 100 μm .



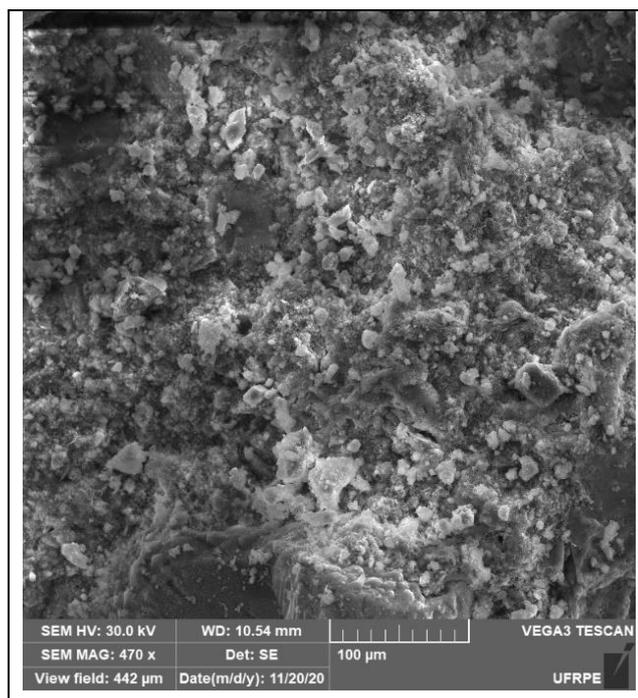
Fonte: Arquivo do autor (2020).

Figura 38 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T20, com resolução de 50 μm .



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Figura 39 – Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T40, com resolução de 100 μm .



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Na figura 40, vê-se o resultado da espectrometria por energia dispersiva, obtido através do EDS, para os três traços desenvolvidos. Após o oxigênio, presente em todos os óxidos, notou-se que o cálcio é o elemento mais abundante nos três concretos, confirmando o acréscimo do elemento através da cinza, que tende a ser um *filler* calcário alternativo.

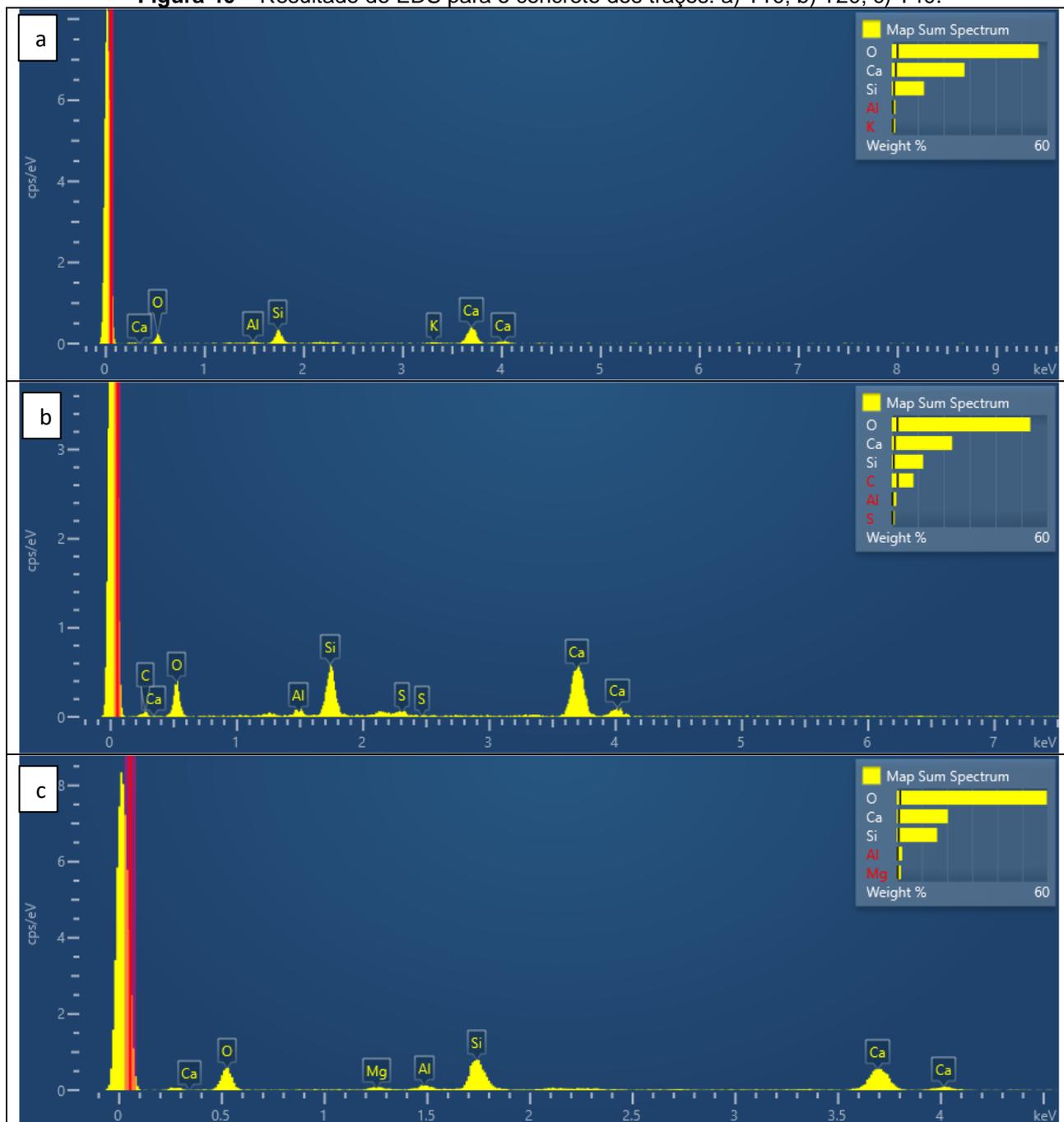
Também foram identificados outros elementos, tais como Si, Al, K, C, S, e Mg, sendo o Si mais relevante, presente na cinza e nos agregados. O aparecimento do Mg no traço com 40% de cinza confirma a observação feita por Nascimento *et al.* (2019), que desenvolveram cimentos substituindo parcialmente o clínquer pela cinza de Algaroba e obtiveram maiores teores de Mg conforme a proporção de cinza no sistema aumentou.

Conforme as figuras 41, 42 e 43, foi identificada a presença da fase etringita tardia nos três concretos desenvolvidos.

Segundo Katsioti *et al.* (2011), a etringita é um mineral que possui aspecto acicular, formado por sulfoaluminato de cálcio nas primeiras horas da hidratação, a partir da reação entre o gesso e o aluminato de cálcio.

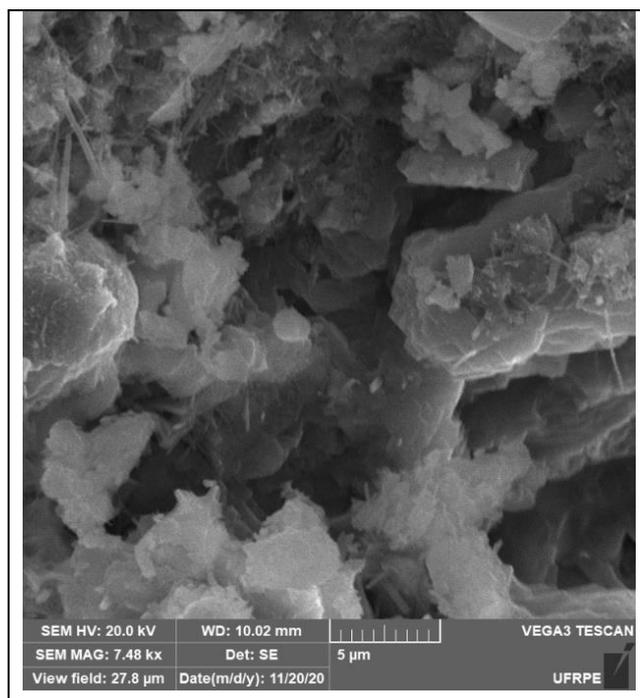
Ainda segundo os autores, a etringita tardia é um caso especial de recristalização da etringita, cuja formação é normalmente associada aos ataques de sulfato do próprio cimento ao concreto, em ambientes de cura de alta umidade e temperatura acima de 70°C (SILVA *et al.*, 2017) ou com elevado calor de hidratação (NEVILLE, 2016).

Figura 40 – Resultado do EDS para o concreto dos traços: a) T10; b) T20; c) T40.



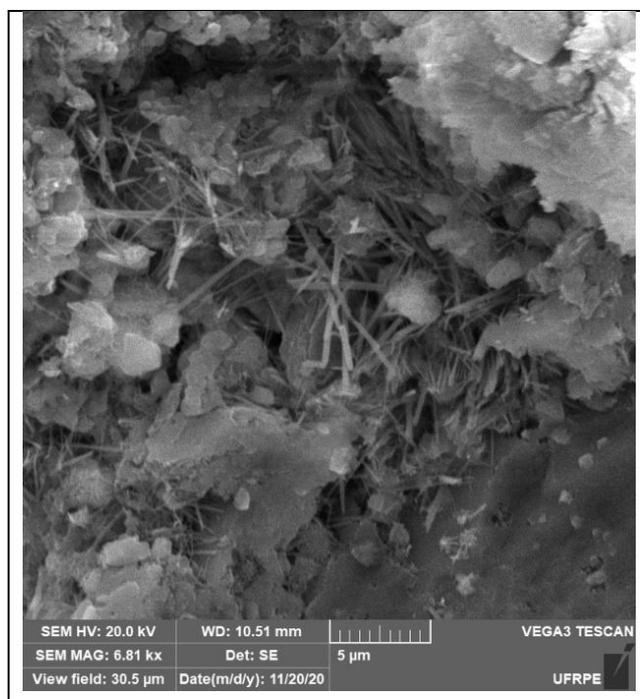
Fonte: Arquivo do autor (2020).

Figura 41 – Etringita presente no concreto do traço T10.



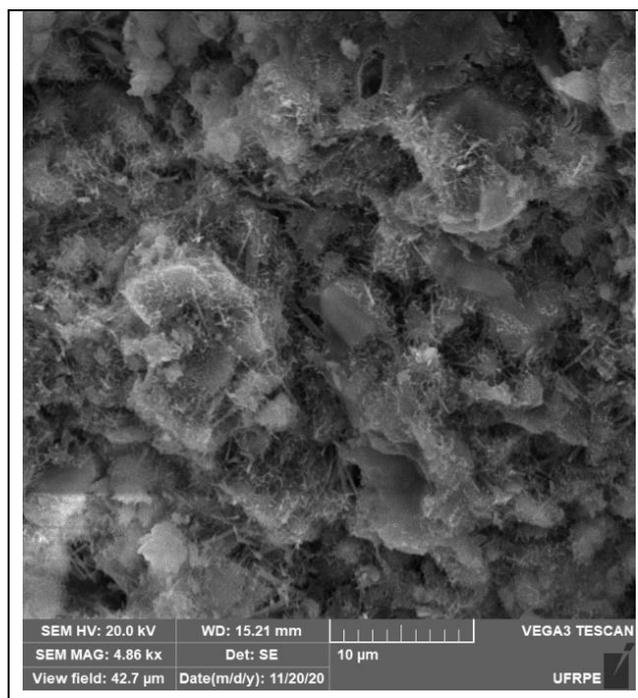
Fonte: Arquivo do autor (2020).

Figura 42 – Etringita presente no concreto do traço T20.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Figura 43 – Etringita presente no concreto do traço T40.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

Apesar dos poucos relatos em literatura e do entendimento pouco consistente sobre os mecanismos de formação da etringita tardia, o surgimento dessa fase cristalina normalmente está associado a problemas mecânicos no material, como expansão do concreto e fissuras pelas tensões na microestrutura (TORRES e ANDRADE, 2016).

Destaca-se que o aspecto visual da etringita tardia encontrada no concreto do traço T20 é semelhante ao que Melo (2010) chamou de etringita neoformada em cavidade de pasta.

Nos experimentos realizados por Torres e Andrade (2016), os cimentos dos tipos CP II-E e CP II-F apresentaram teor de SO_3 maior que 3% e se mostraram favoráveis ao desencadeamento de etringita tardia e, conseqüentemente, expansão dos sistemas cimentícios.

O cimento do tipo CP II-Z utilizado nessa pesquisa apresentou teor de SO_3 de 3,23% e, diante das figuras 42, 43 e 44, a grande presença de etringita tardia coincidiu com o aumento da proporção de cinza no sistema. Possivelmente, essas condições favoreceram o desenvolvimento dessa fase cristalina, além das condições de cura.

6 CONCLUSÕES

A cinza de biomassa mista proveniente da caldeira da lavanderia é um material rico em CaCO_3 , contendo também outros óxidos, sendo, portanto, compatível com a composição química do cimento. Também é um material menos denso que o cimento, porém, de granulometria semelhante, quando considerado apenas o resíduo pulverulento.

Diante da sua composição química e dos estudos já desenvolvidos até aqui, o resíduo tem melhor aproveitamento como *filler*, quando tem função de adição mineral em sistemas cimentícios e tende a melhor preencher os espaços vazios dos materiais, reforçando as propriedades mecânicas destes.

A realização da caracterização dos componentes do concreto se mostrou uma etapa fundamental para a determinação da dosagem do concreto de modo racional, utilizando valores obtidos na prática e corrigindo teores conforme as condições observadas.

A adição da cinza no compósito reduziu a consistência do concreto, provocando a necessidade de ajustes nos traços, onde optou-se pelo acréscimo de água na mistura. Quanto maior o teor de cinza adicionado, menor foi o volume de cimento utilizado, tornando o concreto menos trabalhável pelo menor teor de cimento na proporção total da mistura seca. Uma vez que essa cinza pode ser caracterizada como um material não aglomerante e de finura próxima ao do cimento Portland, ocasionando no aprisionamento da água que seria necessária para a mistura, e conseqüentemente na perda de plasticidade da massa.

O acréscimo de água no traço ocasionou uma maior porosidade no compósito, que por sua vez ocasionou uma redução na resistência mecânica do material e uma maior absorção de água.

Os compósitos T10 e T20 alcançaram resistências próximas e suficientes para serem classificados como concretos estruturais perante a norma técnica brasileira, podendo ser aplicados em pavimentos, conforme a classe de consistência adotada. Contudo, os concretos com a cinza apresentaram menor resistência característica à compressão que o traço padrão.

No entanto, o traço T40 não apresentou resistência mecânica mínima que justificasse a sua aplicação, sendo, portanto, considerado um material desqualificado.

A etringita tardia identificada pela microscopia, bem como sua maior ocorrência conforme aumento do teor de cinza, para além das condições de cura, pode estar relacionada à presença do resíduo e o tipo de cimento utilizado na produção do concreto. O referido mineral é normalmente associado a problemas estruturais em compósitos de matriz cimentícia, causando expansão e favorecendo fissuras.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a investigação do comportamento mecânico de concretos com a substituição do cimento por menores teores de cinza de biomassa, preferivelmente abaixo de 20% em relação ao volume. E, devido ao conhecimento limitado sobre a formação da etringita tardia, recomenda-se investigar a influência da cinza de biomassa na formação dos referidos cristais.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. M.; JÚNIOR, J. B. A.; AZEVEDO, P. F.; MANSOUR, R. C.; MACHADO, W. R.; SILVA, M. H. P. Análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) do resíduo de tiro. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 34, n. 3, 2017.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Revista Cerâmica**, v. 48, n. 305, 2002.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

ANDRADE, R. M.; JAQUES, N. G.; SOUSA, J.; DUTRA, R. P. S.; MACEDO, D. A.; CAMPOS, L. F. A. Preparation of low-cost ceramic membranes for microfiltration using sugarcane bagasse ash as a pore-forming agent. **Revista Cerâmica**. São Paulo, v. 65, n. 376, out./dec., 2019.

ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. Efeito da adição de cinza da biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto auto-adensável. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2010. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/marcosanjos/artigos-publicados/efeito-da-adicao-de-cinza-da-biomassa-da-cana-de-acucar-como-finos-no-concreto-auto-adensavel/view>. Acesso em: 15 de jan. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: preparação de concreto em laboratório – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9775**: agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. **Traços de concreto para obras de pequeno porte**. Disponível em: https://www.feb.unesp.br/pbastos/site_paulo/Artigo%20Tracos%20Concreto-Paulo%20Bastos.pdf. Acesso em: 10 jan. 2021.

BASÍLIO, E. S. **Agregados para concreto**: ET 41. São Paulo: ABCP, 1995.

BASTOS, S. R. B. **Uso da areia artificial balsáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais**. 2002. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84274/212200.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 de jan. 2021.

BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 52, 2010, Fortaleza/CE. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5 ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BEZERRA, A. S.; FREITAS, L. S. Avaliação das atividades de uma lavanderia industrial à luz da produção mais limpa no polo de confecções de Santa Cruz do Capibaribe – PE. *In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO*, 16, 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2013. Disponível em: <http://sistema.semead.com.br/16semead/resultado/trabalhosPDF/97.pdf>. Acesso em: 11 de jan. 2021.

BORLINI M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. Cinza da Lenha para Aplicação em Cerâmica Vermelha – Características da Cinza. **SciELO**. São Paulo, v. 51, n. 319, jul./set. 2005.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Visão da indústria brasileira sobre a gestão de resíduos sólidos**. 2014. Disponível em: http://www.fiepr.org.br/paraempresas/conselhos/moveleira/uploadAddress/Visao_da_Industria_Residuos_Solidos%5B61297%5D.pdf. Acesso: 07 de jan. 2021.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química nova**, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

CORDEIRO, L. N. P.; PAES, I. N. L.; SOUZA, P. S. L.; AZEVEDO, C. M. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, 2019.

CORRÊA, A. C. A. **Estudo do desempenho dos aditivos plastificantes e polifuncionais em concretos de cimento Portland tipo CP-III-40**. 2010. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <http://poscivil.sites.uff.br/wp-content/uploads/sites/461/2018/10/definitivaabduche.pdf>. Acesso em: 16 de jan. 2021.

COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/29896/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Lawrence%20Francisco%20Costa.pdf>. Acesso em: 19 de jan. 2021.

CUNHA, A. L. X. **Reciclagem dos rejeitos da atividade de mariscagem: uso na indústria de blocos pré-moldados de concreto**. 2020. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concretos estruturais. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

FABRO, F.; GAVA, G. P.; GRIGOLI, H. B.; MENEGHETTI, L. C. Influence of fine aggregates particle shape in the concrete properties. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 4, n. 2, p. 191-212, 2011.

FESTUGATO, N. L. **Avaliação fator vazios/cimento na estimativa da resistência à compressão simples e tração por compressão diametral de concretos convencionais**. 2017. 69p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14510/1/PB_COECI_2017_1_17.pdf. Acesso em: 25 de jan. 2021.

GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPPITELLI, J.; ZERBINO, R. High strength concretes incorporating different course aggregates. **Materials journal**, v. 89, n. 3, 2020.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa**. 2013. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1994/1/PB_COQUI_2013_1_03.pdf. Acesso em: 25 de jan. 2021.

GOBBO, Luciano de Andrade. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland**. 2009. 273p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44137/tde-23072009-144653/publico/LAG.pdf>. Acesso em: 19 de jan. 2021.

GÓES, P. B. B. **Análise da pozolanicidade por meio da difração de raio-X em pastas de cimento Portland com substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/20407/1/Disseta%20a7%20a3o.Pablo.final.pdf>. Acesso em: 18 de jan. 2021.

GUIMARÃES, L. B.; MALAGÓN, L. A. G.; SILVA, J.; BARAÚNA, O. S.; MARQUES, J. J. S. Potencial de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água nas lavanderias industriais do APL de confecções do agreste de Pernambuco. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 7, 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: ABENS, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/457/457>. Acesso em: 05 de jan. 2021.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de materiais de construção básicos**. 2011. Disponível em: http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf. Acesso em: 14 de jan. 2021.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento Portland. *In: ISAIA, G. C (org.). Materiais de construção civil e princípios da ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010.

JEWETT JUNIOR, J. W.; SERWAY, R. A. **Princípios da física: óptica e física moderna**. São Paulo: Cengage Learning, 2005.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. *In: Tecnologias e materiais alternativos de construção [s.n.]*, 2003.

KANNING, R. C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland**. 2013. 192p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/30448/R%20-%20T%20-%20RODRIGO%20CEZAR%20KANNING.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 de fev. 2021.

KATSIOTI, M.; PATSIKAS, N.; PIPILIKAKI, P.; KATSIOTIS, N.; MIKEDI, K.; CHANIOTAKIS, M. Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 900–905, 2011.

LELOUP, W. A. **Efeito da adição de lodo têxtil e cinzas de lenha gerados no APL de confecções pernambucano em argamassas de cimento Portland**. 2013. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10529/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Wilma%20de%20Albuquerque%20Leloup.pdf>. Acesso em: 18 de jan. 2021.

LIMA, R. A. P. **Concretos auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira da algaroba como fíler alternativo**. 2019. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/34213/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Rodrigo%20Ara%c3%baixo%20Pereira%20Lima.pdf>. Acesso em: 16 de jan. 2021.

LOPES, A. N. M. **Avaliação comparativa de concretos com ou sem sílica ativa para resistências entre 50 e 60 MPa**. 1999. 170p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/37904>. Acesso em: 18 de fev. 2021.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em agronegócio e meio ambiente**. Maringá, v. 1, n. 3, p. 405-418, set./dez., 2008.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Apostila. Disponível em: <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2020.

MARTINS, M. E. G. Quartis. **Revista de Ciência Elementar**. Lisboa, v. 2, n. 4, 2014.
MARTINS, P. B. M. **Influência da granulometria do agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. 2008. 93p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana. Disponível em: <https://pdf4pro.com/download/influ-202-ncia-da-granulometria-agregado-2ba55a.html>. Acesso em: 15 de jan. 2021.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIER, D. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e região metropolitana**. 2011. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Concreto) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1402/1/CT_TCC_2011_2_04.pdf. Acesso em: 15 de jan. 2021.

MELO, F. C. A. C. **Análise de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinza residual de lenha de algaroba**. 2012. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14842/1/FellipeCACM DISSERT.pdf>. Acesso em: 15 de jan. 2021.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. 2012. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/10407/1/dissertacao%20marcio.pdf>. Acesso em: 23 de jan. 2021.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/4464>. Acesso em: 22 de jan. 2021.

MORAES, L. M. B. **Utilização da técnica de fluorescência de raio-X por dispersão em energia (EDXRF) na avaliação do material particulado em suspensão na cidade de Limeira-SP**. 2009. 119p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-15042010-105123/publico/Doutorado_Liz.pdf. Acesso em: 15 de jan. 2021.

MORO, L.; GOLÇALVES, J. L. M. Efeitos da “cinza” de biomassa florestal sobre a produtividade de povoamentos puros de *Eucalyptus grandis* e avaliação financeira. **IPEF**, n. 48/49, p. 18-27, 1995.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (*Prosopis juliflora*) moldado sobre pressão**. 2014. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/11311/1/Disserta%20Marcos%20Mota.pdf>. Acesso em: 58 de jan. 2021.

MOURA, L. S.; NÓBREGA, A. C. V.; MELO, M. C. S.; BARBOSA, A. A. S.; MARINHO, E. P. Caracterização da atividade pozolânica das cinzas de algaroba produzidas sob diferentes temperaturas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20, 2012, Joinville. **Anais...** Joinville, 2012.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 2014. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/11306/1/DISSERTA%20J%20Elim%20Maciel.pdf>. Acesso em: 15 de nov. 2020.

NASCIMENTO, J. E. M. F.; SANTOS, H. M. M.; SOARES NETO, M. F.; SILVA JÚNIOR, J. C. C. Avaliação das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido após a adição de cinza de madeira. **Cientefico**, Fortaleza, v. 16, n. 34, jul./dez., 2016.

NASCIMENTO, J. E. F.; NÓBREGA, A. C. V.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 65, p. 85-91, 2019.

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

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução. **Revista gestão & produção**. São Carlos, v. 21, n. 2, p. 447-460, 2014.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de algaroba geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções de Pernambuco**. 2016. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/17150/1/Disserta%20Dann%20Ribeiro%20Pires%20%28PPGECA%20M_CAA%29.pdf. Acesso em: 23 de jan. 2021.

POMPEU NETO, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho, e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Revista matéria**, v. 16, n. 2, p. 690-702, 2011.

RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2013. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/4411/1/TESE_EstudoEfeitoIncorpora%20a7%20a3o.pdf. Acesso em: 10 de fev. 2021.

RIBEIRO, V. A. S.; TAVARES, C. R. G. Análise do reuso de efluente de lavanderia de jeans tratado por fotocatalise heterogênea. **Brazilian journal of animal and environmental research**. Curitiba, v. 1, n. 2, p. 395-404, out./dez., 2018.

RODRIGUES, F. A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de Malva**. 2015. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1995.

SANTOS, N. A. **Incorporação do resíduo de lã de vidro para produção de placas cimentícias**. 2015. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concretos. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 1, p. 233-260.

SEBRAE. **Estudo econômico do arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. 2013. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/Estudo%20Economico%20do%20APL%20de%20Confeccoes%20do%20Agreste%20-%202007%20de%20MAIO%202013%20%20docx.pdf>. Acesso em: 03 de jan. 2021.

SEBRAE. **Estudo econômico das indústrias de confecções de Toritama/PE**. 2019. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/PE/Anexos/RELATORIO-TORITAMA-FINAL.pdf>. Acesso em: 03 de jan. 2021.

SENGER, R. **Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras**. 2015. 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6518/1/PG_DAMEC_2015_12.pdf. Acesso em: 15 de fev. 2021.

SENNÁ, H. A.; RESENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. Sumário mineral/DNPM, p. 602-635, 2009.

SILVA, D. L.; FONSECA, J. M. M.; BENTO, A. J.; MONTEIRO, E. C. B. Considerações sobre a formação de etringita tardia (DEF). **Revista Construindo**, v. 9, n. 2, p. 36-46, 2017.

SILVA, M. V. A.; SILVA, A. L.; BRITO, D. J. M.; BRANCO, D. K. S.; FERREIRA, M. O. A questão ambiental no polo de confecções de Caruaru: um primeiro ensaio à luz dos instrumentos econômicos de proteção ambiental. **Revista Estudos do CEPE**, Santa Cruz do Sul, n. 35, p. 108-132, jan./jun., 2012.

SILVA, R. A. J. **Modelo de gestão ambiental para reuso de lavanderias do agreste de Pernambuco**. 2016. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/bitstream/tede2/7721/2/Rivaldo%20Antonio%20Jeronimo%20da%20Silva.pdf>. Acesso em: 15 de out. 2020.

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

SILVA JÚNIOR, F. A.; MARTINELLI, A. E. Análise das propriedades do agregado graúdo: brita de origem calcária, proveniente do rejeito da fabricação de cimentos, para compósitos cimentícios. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21, 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/204-093.pdf>. Acesso em: 08 de jan. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2019**. 2020. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em: 11 de jan. 2021.

SIQUEIRA, L. V. M. Laboratório de materiais de construção – II 1ª Parte – **Agregados**: apostila de ensaios tecnológicos da UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2008. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/DandaEDF/ensaios-tecnologicos-agregados>. Acesso em: 09 de jan. 2021.

SURYANARAYANA, C. **Experimental techniques in materials and mechanics**. [S.l.] Taylor & Francis, 2011.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife – PE – Brasil. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 3, p. 357-394, 2016.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração dos cloretos**. 2011. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7764/TRINDADE%2c%20GUILHERME%20HOEHR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 de jan. 2021.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C (org.). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/17103/1/Marcela%20%20Disserta%c3%a7%c3%a3o.final.pdf%20certa.pdf>. Acesso em: 04 de jan. 2021.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75712/000883246.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. acesso em: 06 de jan. 2021.

VIEIRA, S. P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. 2017. 141p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/24021/1/2017_SheillaPereiraVieira.pdf. Acesso em: 07 de jan. 2021.

APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T0

		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				 <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	26.920,00	10,00	21,00	34,2756
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	28.290,00	10,00	20,00	36,0199
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	24.030,00	9,90	20,00	31,2172
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	24.740,00	10,10	20,00	30,8793
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	24.780,00	10,00	20,00	31,5509
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	26.510,00	10,00	21,00	33,7536
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	24.030,00	10,10	20,00	29,9931
T0	1	10/08/2020	07/09/2020	25.180,00	10,00	19,00	32,0602
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	24.610,00	9,90	20,00	31,9706
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	24.860,00	10,00	20,00	31,6527
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	27.350,00	10,10	19,00	34,1369
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	25.440,00	10,00	20,00	32,3912
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	25.820,00	10,00	20,00	32,8750
T0	2	10/08/2020	07/09/2020	27.130,00	10,00	20,00	34,5430
T0	3	11/08/2020	08/09/2020	27.830,00	10,00	20,00	35,4343
T0	3	11/08/2020	08/09/2020	27.950,00	9,90	20,00	36,3096
T0	3	11/08/2020	08/09/2020	28.540,00	9,90	20,00	37,0761
T0	4	11/08/2020	08/09/2020	29.910,00	9,90	20,00	38,8558
T0	4	11/08/2020	08/09/2020	29.070,00	9,90	20,00	37,7646
T0	5	17/08/2020	14/09/2020	29.110,00	10,00	20,00	37,0640
T0	5	17/08/2020	14/09/2020	26.350,00	10,00	20,00	33,5499
T0	5	17/08/2020	14/09/2020	30.480,00	10,00	20,00	38,8083

APÊNDICE B – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T10

 UFRPE		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				CITAR <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.840,00	10,00	20,00	29,0808
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	23.940,00	10,00	20,00	30,4814
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.110,00	9,90	20,00	28,7229
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.320,00	9,90	20,00	28,9957
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.720,00	9,90	20,00	29,5154
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	25.230,00	10,00	20,00	32,1238
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.350,00	10,00	20,00	28,4569
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	21.740,00	9,90	20,00	28,2422
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.820,00	9,90	20,00	29,6453
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	21.410,00	10,00	20,00	27,2601
T10	1	27/08/2020	24/09/2020	22.300,00	10,00	20,00	28,3932
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.670,00	9,90	20,00	28,1513
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.440,00	10,00	20,00	27,2983
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	20.790,00	9,90	20,00	27,0081
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.550,00	10,00	20,00	27,4383
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.750,00	10,00	20,00	27,6930
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.790,00	10,00	20,00	27,7439
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.400,00	10,00	20,00	27,2473
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	22.410,00	9,90	20,00	29,1126
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	21.290,00	9,90	20,00	27,6577
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	20.880,00	10,00	20,00	26,5852
T10	2	27/08/2020	24/09/2020	20.090,00	9,90	20,00	26,0987

APÊNDICE C – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T20

		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				 <small>CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS</small>	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	21.020,00	10,00	20,00	26,7635
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	19.760,00	10,00	20,00	25,1592
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	21.090,00	10,00	20,00	26,8526
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	19.050,00	10,00	20,00	24,2552
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	21.630,00	10,00	20,00	27,5402
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	21.030,00	10,10	20,00	26,2486
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	19.890,00	10,00	20,00	25,3247
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	20.940,00	10,00	20,00	26,6616
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	17.710,00	9,80	20,00	23,4788
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	20.060,00	9,90	20,00	26,0598
T20	1	03/09/2020	01/10/2020	19.990,00	10,00	20,00	25,4521
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	17.730,00	9,90	20,00	23,0329
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	18.910,00	9,90	20,00	24,5658
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	19.710,00	9,80	20,00	26,1303
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	20.250,00	10,00	20,00	25,7831
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	20.050,00	10,00	20,00	25,5285
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	19.660,00	10,00	20,00	25,0319
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	19.320,00	10,00	20,00	24,5990
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	20.340,00	9,90	20,00	26,4235
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	18.500,00	10,00	20,00	23,5549
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	18.890,00	9,90	20,00	24,5398
T20	2	03/09/2020	01/10/2020	19.920,00	10,00	20,00	25,3629

APÊNDICE D – RESULTADO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO TRAÇO T40

 UFRPE		CONTROLE DE ENSAIO RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				 CITAR CENTRO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA APLICADA AOS RECURSOS NATURAIS	
Traço	Betonada	Data de moldagem	Data de Rompimento	Força (kg)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Resistência à compressão (MPa)
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.590,00	10,10	20,00	11,9698
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.620,00	10,00	20,00	12,2486
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	10.070,00	9,90	20,00	13,0819
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.410,00	10,00	20,00	11,9812
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.640,00	10,00	20,00	12,2740
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.950,00	10,00	20,00	12,6687
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.160,00	10,00	20,00	11,6629
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	9.960,00	10,00	20,00	12,6815
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	10.070,00	10,00	20,00	12,8215
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	10.040,00	10,00	20,00	12,7833
T40	1	03/09/2020	01/10/2020	10.060,00	10,00	20,00	12,8088
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	10.890,00	9,90	20,00	14,1471
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	10.910,00	9,90	20,00	14,1731
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	11.480,00	10,00	20,00	14,6168
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	11.260,00	10,10	20,00	14,0542
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	10.840,00	10,00	20,00	13,8019
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	11.210,00	9,90	20,00	14,5628
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	11.500,00	9,90	20,00	14,9396
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	12.150,00	9,90	20,00	15,7840
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	11.710,00	10,00	20,00	14,9096
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	9.540,00	10,00	20,00	12,1467
T40	2	03/09/2020	01/10/2020	10.600,00	10,10	20,00	13,2304