

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE MATERIAIS CAMPUS DE**  
**BAURU**

**ANA BEATRIZ BACURAU MARTINS**

**INCORPORAÇÃO DE CINZA DE CALDEIRA EM MATRIZ CIMENTÍCIA PARA**  
**PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2022**

**ANA BEATRIZ BACURAU MARTINS**

**INCORPORAÇÃO DE CINZA DE CALDEIRA EM MATRIZ CIMENTÍCIA PARA  
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais, área de concentração Materiais Cerâmicos, sob a orientação do Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Agda Eunice de Souza.

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2022**

M386i	<p>Martins, Ana Beatriz Bacurau          Incorporação de cinza de caldeira em matriz cimentícia para produção de argamassa / Ana Beatriz Bacurau Martins. -- Presidente Prudente, 2022          84 f.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente          Orientadora: Agda Eunice de Souza</p> <p>1. Resíduo. 2. Biomassa. 3. Cinza. 4. Argamassa. I. Título.</p>
-------	---

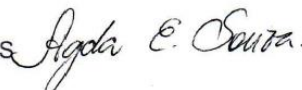
Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANA BEATRIZ BACURAU MARTINS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 01 dias do mês de novembro do ano de 2022, às 14:00 horas, no(a) Google Meet, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANA BEATRIZ BACURAU MARTINS, intitulada **INCORPORAÇÃO DE CINZA DE CALDEIRA EM MATRIZ CIMENTÍCIA PARA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente, Prof. Dr. AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO (Participação Virtual) do(a) Laboratório de Engenharia Civil / Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente UNESP. Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS



*Dedico este trabalho aos meus pais, minha  
irmã e meu marido, que me ajudaram a ser  
firme e persistir em meus objetivos,  
mostrando e auxiliando os caminhos e acima  
de tudo, acreditando na minha capacidade e  
crescimento.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por caminhar todos os dias ao meu lado, guiando e iluminando meu caminho, sustentando nos dias difíceis e mostrando que obstáculos são feitos para serem vencidos e superados.

À minha Família, meus pais Amador e Silvia, a minha irmã Laura e ao meu marido Bruno por todo apoio, cuidado, incentivo e amor me dado não só ao longo de toda minha formação acadêmica, mas também, ao longo de minha vida, sendo responsáveis pela pessoa que sou hoje.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Agda Eunice de Souza pela amizade e confiança, pelo auxílio, paciência e dedicação em me orientar nesta dissertação, onde enfrentamos tempos difíceis de pandemia.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCT UNESP e ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais – POSMAT, pelo amparo acadêmico durante todo o período de pós-graduação.

À Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, ao Coordenador do curso de Engenharia Civil Prof. Me. Guilherme Crepaldi Camarini, e ao técnico de laboratório Isac, pelo fornecimento do laboratório e auxílio para o desenvolvimento dos ensaios tecnológicos.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram e apoiaram durante a realização deste trabalho, muito obrigada.

## RESUMO

A reutilização de resíduos sólidos industriais como materiais substitutivos ou aditivos em matriz cimentícia, evidencia uma atividade ambientalmente amigável aliada a uma alternativa sustentável para as indústrias. O reaproveitamento desses resíduos pelo setor da construção civil pode melhorar as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material produzido, assim como reduzir o impacto ambiental de descarte irregular. A cinza de caldeira proveniente da queima do eucalipto é um resíduo comumente gerado em grandes quantidades por diversos setores industriais, que fazem uso da queima da madeira para produção de calor. Neste trabalho, a cinza proveniente da queima do eucalipto foi utilizada para ser incorporada, de formas distintas, à argamassa. A cinza, caracterizada por fluorescência de Raios X, consiste em uma mistura de elementos minerais oxidados e areia. Este resíduo foi incorporado à matriz cimentícia (argamassa) em duas etapas: (I) adicionada em proporções de 5, 10 e 15% em massa com variação do fator a/c e, (II) adição de 15%; substituição do cimento por 15% e substituição da areia por 15%, em massa da cinza, todos mantendo o fator a/c fixo em 0,48. Na primeira etapa, os corpos de prova foram caracterizados quanto à resistência à compressão nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias, enquanto na segunda etapa, foram caracterizados apenas aos 28 dias. Foram realizados ensaios físicos de massa específica real, absorção de água e índice de vazios para todas as amostras aos 28 dias de cura, de acordo com as normas brasileiras. Os resultados de resistência mecânica da primeira etapa mostraram um aumento com o tempo de cura e, a partir dos 28 dias, os valores encontrados para as amostras com a incorporação da cinza foram todos superiores à amostra padrão (sem cinza). Para as amostras da

segunda etapa, aos aos 28 dias, todos os valores de resistência dos corpos de prova contendo cinza foram ligeiramente maiores que aqueles apresentados pela a amostra de referência. Os resultados de massa específica real, absorção de água e índice de vazios aumentaram com o teor de cinza inserido à matriz, acompanhando o aumento do fator a/c das amostras da primeira etapa. Para as amostras preparadas na segunda etapa, somente a amostra com substituição do cimento pela cinza, apresentou valores de absorção e índice de vazio menores que aqueles apresentados pela referência. Os resultados deste trabalho mostraram que, embora a cinza utilizada não apresente atividade pozolânica, sua incorporação e/ou substituição de agregados em uma argamassa, pode ser realizado até o valor limite estudado – 15% em massa, tendo em vista que as propriedades fundamentais do material final não sofrem alterações significativas.

**Palavras chaves:** Resíduo, biomassa, cinza, argamassa.

## ABSTRACT

The reuse of industrial solid waste as substitute or additives materials in cement matrix, evidences an environmentally friendly activity combined with a sustainable alternative for industries. The reuse of these wastes by the civil construction sector can improve the physical, chemical and mechanical properties of the material produced, as well as reduce the environmental impact of irregular disposal. Boiler ash from the burning of eucalyptus is a waste commonly generated in large quantities by various industrial sectors, which use wood burning to produce heat. In this work, the ash from the burning of eucalyptus was used to be incorporated, in different ways, into the mortar. Ash, characterized by X-ray fluorescence, consists of mixed oxidized mineral elements and sand. This residue was incorporated into the cement matrix (mortar) in two stages: (I) added in proportions of 5, 10 and 15% by mass with variation of the w/c factor and, (II) addition of 15%; replacement of cement by 15% and replacement of sand by 15%, in mass of ash, all keeping the w/c factor fixed at 0.48. In the first stage, the specimens were characterized for compressive strength at the ages of 7, 14, 28 and 91 days, while in the second stage, they were characterized only at 28 days. Physical tests of real specific mass, water absorption and void index were carried out for all samples at 28 days of curing, according to Brazilian standards. The mechanical strength results, of the first stage, showed an increase with the curing time and, after 28 days, the values found for the samples with the incorporation of ash were all superior to the standard sample (without ash). For the samples from the second stage, at 28 days, all the resistance values of the specimens containing ash were slightly higher than those presented by the reference sample. The results of real density, water absorption and

void index increased with the ash content inserted into the matrix, following the w/c factor increase of the samples from the first stage. For the samples prepared in the second stage, only the sample with replacement of cement by ash, presented absorption values and void index lower than those presented by the reference. The results of this work showed that, although the ash used does not show pozzolanic activity, its incorporation and/or replacement of aggregates in a mortar can be carried out up to the limit value studied – 15% by mass, considering that the fundamental properties of the final material do not undergo significant changes.

**Keywords:** Residue, biomass, ash, mortar.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural durante o período de hidratação do cimento Portland. ....	8
Figura 3 - Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de $\text{Ca}^{2+}$ em solução (B) durante a hidratação do cimento Portland. ....	9
Figura 4 - Cinza de Caldeira.....	25
Figura 5 - Distribuição granulométrica da areia normal.....	27
Figura 6 - Moldes dos corpos de prova. ....	32
Figura 7 - Corpo de prova preenchido com argamassa. ....	33
Figura 8 - Cura inicial na câmara úmida. ....	33
Figura 9 - Corpos de prova desmoldados.....	34
Figura 10 - Equipamento de Difração de Raios X.....	35
Figura 11 - Equipamento de Fluorescência de Raios X. ....	36
Figura 12 - Prensa Mecânica utilizada.....	37
Figura 13 - Corpo de prova capeado com Neoprene centralizado na prensa hidráulica. ....	38
Figura 14 - Difratoograma de Raios X da cinza. ....	45
Figura 15 - Difratoograma de Raios X do cimento Portland (CP II F 32).....	46
Figura 16 - Sistema de classificação química da matéria inorgânica em cinzas. ....	49
Figura 17 - Distribuição do tamanho de partícula da cinza. ....	52
Figura 18 - Resistência à compressão axial das argamassas (Etapa I).....	54
Figura 19 - Resistência à compressão axial e relativa das argamassas (Etapa II).....	56
Figura 20 - Médias Equivalentes aos Ensaios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa I). ....	59
Figura 21 - Médias Equivalentes aos Ensaios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa II).....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações. ....	13
Tabela 2 - Propriedades dos principais componentes do cimento. ....	14
Tabela 3 - Requisitos químicos. ....	21
Tabela 4 -Requisitos físicos.....	22
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia Normal. ....	26
Tabela 6 -Quantidade de corpos de prova por ensaio – Etapa I. ....	28
Tabela 7 - Quantidade de materiais utilizados para a Etapa I.....	29
Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova por ensaio – Etapa II.....	30
Tabela 9 - Quantidade de materiais utilizados para a Etapa II.....	31
Tabela 10 - Quantidade de material, em massa, para realização do ensaio de IAP. ....	41
Tabela 11 - Análise química do cimento Portland e da cinza de eucalipto.....	47
Tabela 12 - Resistência à compressão axial da Argamassa A e B. ....	50
Tabela 13 - Distribuição granulométrica da cinza proveniente da queima do eucalipto .....	52
Tabela 14 - Valores médios da Resistência à Compressão dos corpos de prova da Etapa I. .....	53
Tabela 15 - Valores médios da Resistência à Compressão dos corpos de prova da Etapa II. .....	55
Tabela 16 - Valores Médios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa I).....	58
Tabela 17 - Valores Médios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa II).....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características das etapas da hidratação do cimento.....	10
Quadro 2 - Composição dos cimentos Portland comum e composto.....	12
Quadro 3 - Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos. ....	12
Quadro 4 - Publicações de pesquisas referentes a incorporação de resíduos em matriz cimentícia com análises de atividade pozolânica.....	24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**a/c** – Fator Água Cimento

**ABCP** – Associação Brasileira de Cimento Portland

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Aft** – Fase De Formação da Etringita

**Afm** – Fase De Formação de Monossulfato

**C-S-H** – Silicato De Cálcio Hidratado

**CH** – Hidróxido De Cálcio

**CP-II-F** – Cimento Portland Composto com Fíler

**DRX** – Difração de Raio X

**FCT** – Faculdade de Ciências e Tecnologia

**FRX** – Fluorescência de Raio X

**IAP** – Índice de Atividade Pozolânica

**LabCivil** – Laboratório de Engenharia Civil

**LCGRS** – Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos

**NBR** – Norma Brasileira

**SABESP** – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

**UNESP** – Universidade Estadual Paulista

**UNOESTE** – Universidade do Oeste Paulista

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	3
2.1 Objetivo Geral .....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1 Matriz Cimentícia.....	4
3.1.1 Cimento Portland.....	4
3.1.2 Hidratação do Cimento.....	7
3.1.3 Características do Cimento Portland com adição de material carbonático – Fíler .....	11
3.2 Resíduos sólidos e cinzas agroindustriais na construção civil .....	15
3.3 Indústria de papel e celulose.....	16
3.3.1 Resíduos da Indústria de papel e celulose.....	17
3.3.2 Cinza de caldeira proveniente do processamento do eucalipto .....	19
3.3.2.1 <i>Definição</i> .....	19
3.3.2.2 <i>Processamento e composição</i> .....	19
3.4 Atividade Pozolânica .....	21
3.4.1 Materiais residuais e atividade pozolânica .....	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
4.1 Materiais.....	25
4.1.1 Cinza de Caldeira.....	25
4.1.2 Cimento.....	25
4.1.3 Agregado miúdo .....	26

4.1.4 Outros materiais .....	27
4.2 Preparação dos corpos-de-prova .....	27
4.2.1 Mistura Mecânica .....	31
4.2.2 Moldagem dos corpos de prova .....	32
4.2.3 Cura e desmoldagem dos corpos de prova.....	33
4.3 Caracterizações Tecnológicas .....	34
4.3.1 Difração de Raios X.....	34
4.3.2 Fluorescência de Raio-X .....	36
4.4 Ensaio normatizados .....	36
4.4.1 Resistência a compressão axial .....	37
4.4.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica .....	39
4.4.3 Atividade Pozolânica – Cimento 28 dias .....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	44
5.1 Difração de Raio X – DRX.....	44
5.1.1 DRX da Cinza.....	44
5.1.2 DRX do Cimento Portland – CP II F 32 .....	45
5.2 Fluorescência de Raio X – FRX .....	46
5.2.1 FRX do Cimento Portland CP II F 32 e da Cinza .....	46
5.3 Atividade Pozolânica – Cimento aos 28 dias.....	49
5.4 Distribuição Granulométrica da Cinza .....	51
5.5 Resistência a Compressão Axial .....	52
5.6 Absorção de Água por Imersão.....	58
6 CONCLUSÃO .....	63
REFERÊNCIAS .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e social de uma nação está diretamente relacionado à ampliação dos setores industriais nos centros urbanos. Com isso, as indústrias também passam a ser responsáveis pela geração de diversos tipos de resíduos, classificados em resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo Marques et al (2014), durante décadas o setor industrial tem produzidos resíduos que tem se tornado nocivos ao meio ambiente. E, discussões sobre gerenciamento destes resíduos, sua destinação final, redução, reciclagem e reutilização, tem sido frequente, visto que interferem a curto, médio e longo prazo na sociedade.

Dentre os diversos resíduos gerados pelo setor industrial, estão as cinzas provenientes da queima de biomassa, como casca de arroz, palha de trigo, bagaço de cana de açúcar e madeira, para geração de energia em algumas indústrias. Nos últimos anos, devido às exigências de proteção ambiental, as madeiras utilizadas para a queima devem ser provenientes de área legalizada para este fim e, em geral, são utilizadas madeira de eucalipto. De acordo com Foelkel (2011), a cinza da madeira de eucalipto (biomassa) é um resíduo proveniente de atividades agroindustriais, retirado das caldeiras e podem ser utilizados na construção civil, e ser incorporadas como adição mineral em substituição parcial do cimento Portland em argamassas e concretos.

Em geral, a cinza da queima de eucalipto possui alto teor de  $\text{SiO}_2$  (quartzo) e, conseqüentemente, pode ser considerada uma matéria-prima renovável (PINEDA et al, 2012). As características qualitativa e quantitativa das cinzas dependem da

temperatura de queima, tipos de fornos e espécies de árvores, promovendo propriedades químicas e rendimentos diferentes (CHEAH; RAMLI, 2011).

O volume significativo de resíduo na forma de cinzas, não apresentam valor comercial e são desprezadas em aterros, resultando em um problema ambiental e de saúde humana. Sendo assim, o reaproveitamento deste resíduo em materiais destinados ao setor civil, pode se tornar vantajoso, pois reduz a utilização de matérias-primas não renováveis, além de ter potencial para produzir novos materiais de construção econômicos e sustentáveis. Neste trabalho, será mostrado, portanto, a influência da cinza da queima de eucalipto inserida à uma matriz cimentícia para produção de argamassa.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades da matriz cimentícia – argamassa – em função da inserção de cinza de caldeira de biomassa proveniente do processamento do eucalipto.

### **2.2 Objetivos Específicos**

No intuito de avaliar as características da argamassa, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- a) Caracterizar os materiais precursores Cimento Portland - CP II F 32 e Cinza de caldeira proveniente da queima do eucalipto, quanto à composição química e mineralógica;
- b) Avaliar a massa específica real, índice de vazios, absorção de água e resistência a compressão em função da adição de cinza e/ou substituição de agregados (cimento e areia) pela cinza;
- c) Avaliar o potencial de atividade pozolânica da cinza.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Matriz Cimentícia**

Segundo Silva et al (2012), as matrizes cimentícias são compostas de aglomerantes minerais, podendo conter agregados que dão origem a pastas, argamassas ou concretos. As matrizes mais utilizadas são à base de cimento Portland.

De acordo com Carasek (2010), argamassas são materiais com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais. Tezuka (1989) diz que a argamassa de cimento Portland é dotada de resistência a compressão, apresenta ruptura frágil, baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação.

Conforme a NBR 12655 (2015), o concreto é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, com ou sem a incorporação de aditivos químicos e/ou adições minerais, que desenvolvem suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).

#### **3.1.1 Cimento Portland**

O cimento Portland é composto por clínquer e adições que constituem um material capaz de unir agregados com o objetivo de formar um corpo sólido, que tem

propriedade aglutinante em sua composição. Quando ocorre contato com a água, a mistura endurece e permanece neste estado, a menos que sofra interferência mecânica (PFEIL, 1985).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o clínquer tem como matéria-prima o calcário e a argila que geralmente são extraídas de jazidas situadas próximas às fábricas de cimento. O processo do clínquer começa quando a rocha calcária é britada, depois moída e misturada em quantidades adequadas com argila moída. Esta mistura passa por um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna pode chegar até 1450°C. Este calor intenso transforma a mistura em clínquer (em formato de pelotas), que é bruscamente resfriado e moído, transformando-o em pó. O clínquer em pó possui características de desenvolver reações químicas em presença da água, que primeiramente torna pastoso e, em seguida, endurece proporcionando alta resistência e durabilidade, fazendo com que esta característica de ligante hidráulico resistente seja sua propriedade principal.

Matérias primas como o gesso, as escórias de alto forno, os materiais pozzolânicos e os materiais carbonáticos são adicionadas e misturadas ao clínquer em sua fase de moagem permitindo a fabricação de vários tipos de cimento Portland. Cada uma das matérias primas tem uma função. O gesso, por exemplo, controla a pega, ou seja, o início do endurecimento do clínquer moído quando misturado em água. Se o gesso não fosse adicionado em sua composição, o endurecimento da mistura (água e cimento - pasta) seria quase imediata e esta característica não seria viável para as obras. No entanto, o gesso se faz presente em todos os tipos de cimento. A quantidade utilizada em relação ao clínquer é pequena, em geral 97 % de

clínquer e 3% de gesso, em massa (ABCP, 2002).

No que diz respeito às escórias, a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002) expõe que as escórias de alto forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas. Essas escórias possuem propriedade de ligante hidráulico, desenvolvendo características aglomerantes, possibilitando atender usos mais comuns e apresentam maior durabilidade e maior resistência final.

Já os materiais pozolânicos quando em partículas finíssimas, apresentam característica de ligante hidráulico, porém, de forma diferente, visto que não basta somente colocá-lo em presença de água. Para que estes materiais adquiram a propriedade pozolânica, é necessário coloca-los na presença de mais algum material, como o clínquer, que libera hidróxido de cálcio (cal) que tem reação com a pozolana. Como resultado, pode haver maior impermeabilidade das argamassas e concretos.

Por último, os materiais carbonáticos possuem carbonato de cálcio em sua composição e fazem com que os concretos e argamassas tenham maiores trabalhabilidades devido às partículas moídas desses materiais possuírem dimensões adequadas para se alojar entre as partículas dos demais componentes do cimento, popularmente conhecido como filer calcário.

Existem vários tipos de cimento, de acordo com as características especiais de aplicação. Dentre eles, podem ser citados: o cimento Portland de alta resistência, o cimento Portland resistente aos sulfatos, o cimento Portland branco, o cimento de baixo calor de hidratação e o cimento para poços petrolíferos. Todos os cimentos atualmente comercializados, atendem às normas da ABNT (ABCP, 2002).

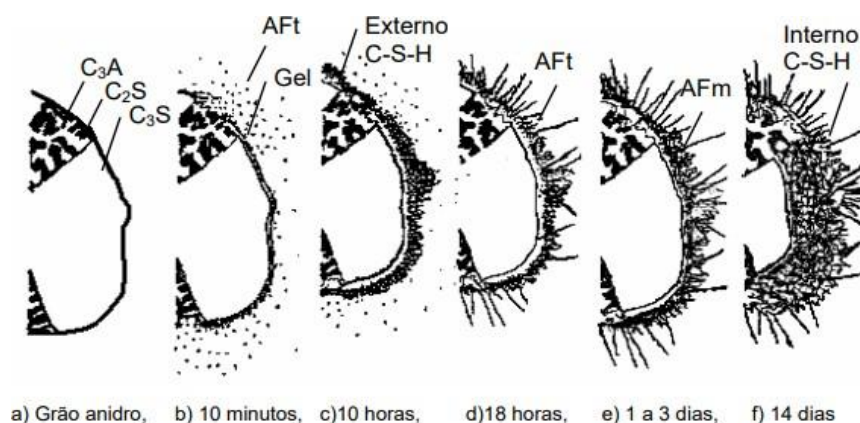
### 3.1.2 Hidratação do Cimento

A hidratação do cimento consiste em várias mudanças que ocorrem quando o cimento anidro ou uma de suas fases constituintes entram em contato ou são misturados com a água. Este fato é complexo, pois abrangem reações químicas que superam a simples conversão de espécies químicas anidras em hidratos correspondentes (TAYLOR, 1998).

De acordo com Jawed et al (1983), no momento em que ocorre o contato do cimento com a água, começa o processo de trocas iônicas entre os sólidos e a fase líquida. Durante o processo de hidratação, alguns elementos existentes no clínquer têm alta solubilidade, os quais são responsáveis por um rápido aumento na concentração de aluminatos, sulfatos e álcalis (sódio, potássio e cálcio) na fase líquida. Na dissolução das fases anidras do clínquer ocorre a formação de compostos com solubilidade menor, fazendo com que aconteça a precipitação de hidratos, que constituem a pasta endurecida.

Paula (2006) descreve o período de hidratação do cimento Portland pelo desenvolvimento estrutural, pela microscopia, em algumas etapas, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural durante o período de hidratação do cimento Portland.



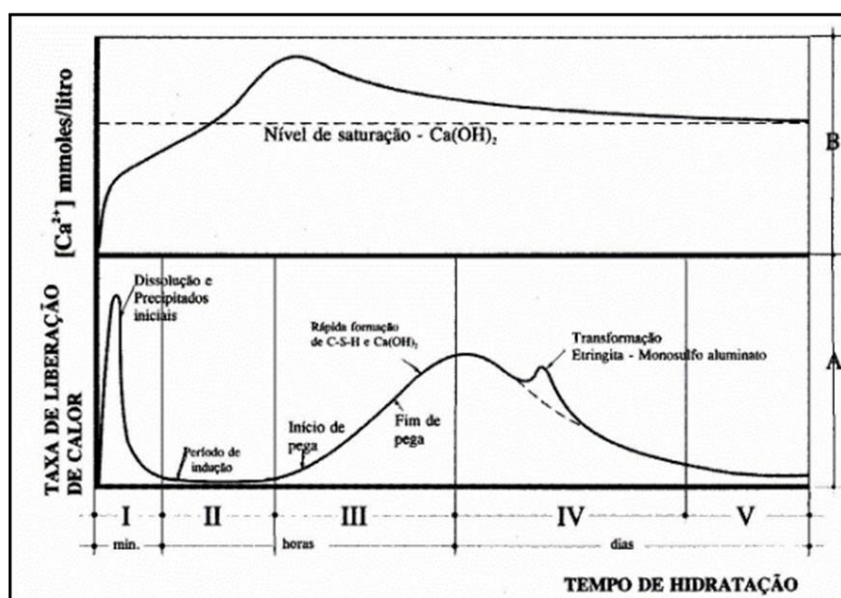
Fonte: Freitas (2001).

De acordo com o esquema mostrado na Figura 1, no primeiro momento (a), é o contato de uma seção de grão anidro de cimento Portland com a água de hidratação; na seção (b), inicia-se o aumento da concentração de íons, formando lâminas de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na superfície do  $C_3S$  e um gel amorfo rico em aluminato na superfície do  $C_3A$ , onde aparece a nucleação de pequenas agulhas de Aft (fase de formação da etringita) e após aproximadamente uma hora, são formados pequenos bastões e agulhas de etringita; na etapa (c), ocorre o período de aceleração, onde ocorre um rápido crescimento do C-S-H e CH, que é a reação do  $C_3S$  para produzir C-S-H externo sobre a malha de Aft, deixando  $1 \mu m$  entre a superfície do grão e a “carapaça” ou “casca” hidratada. O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) tem morfologia laminar e o hidróxido de cálcio (CH) precipita nos poros saturados como

placas hexagonais; na etapa (d) tem-se a continuação da hidratação do  $C_3S$  e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) forma-se no interior da carapaça hidratada, ocorrendo ainda, o crescimento secundário da Aft; na seção (e), devido a hidratação do  $C_3S$  com Aft, é formado discos hexagonais de Afm (fase de formação de monossulfato) e a formação dos produtos internos reduz a separação/espaco entre os grãos anidros e a concha hidratada; na etapa (f) é preenchido o espaco entre os grãos e a carapaça. As etapas (e) e (f) mostram a ocorrência da hidratação nas idades mais avançadas (quando os poros estão bem reduzidos).

A Figura 2 ilustra esse mecanismo de hidratação do cimento, dividindo-o em cinco etapas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final ou período de reação lenta (V). O Quadro 1 resume as características de cada uma destas etapas.

Figura 2 - Representação esquemática da liberação de calor (A) e a concentração de  $Ca^{2+}$  em solução (B) durante a hidratação do cimento Portland.



Fonte: (QUARCIONI, 2008).

Quadro 1 - Características das etapas da hidratação do cimento.

Estágio de hidratação		Características
I	Estágio inicial ou pré-indução	O pico de início é resultado de uma combinação exotérmica de molhagem das partículas, reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos, liberação de íons $K^+$ , $Na^+$ e $SO_4^{2-}$ , dissolução de sulfato de cálcio até a saturação e a liberação de íons de $Ca^{2+}$ e $SO_4^{2-}$ (QUARCIONI, 2008).
II	Período de indução	Formação de uma barreira entre fases anidras e a solução aquosa, resultado de uma camada de gel depositada sobre os grãos anidros de cimento. O gel amorfo é consequência da precipitação inicial da etringita, em menor escala, de C-S-H, sendo rico em sílica e alumínio e também dos íons de cálcio e sulfato (KADRI e DUVAL, 2002). A concentração de íons de cálcio na fase aquosa atinge a saturação e começa a decair, este período, também denominado de dormência, possui duração média entre 30 minutos e 3 horas, que finaliza quando a camada de gel depositada sobre os grãos de clínquer é destruída ou se torna mais permeável a difusão iônica (QUARCIONI, 2008).
III	Período de aceleração	É predominada a dissolução-precipitação, com consequente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que faz controlar a taxa de hidratação. Os silicatos, principalmente a alita ( $C_3S$ ) passam a se hidratar rápido até que atinge a taxa máxima de hidratação, o final desse período é o que corresponde ao máximo calor liberado. Ocorre também a precipitação da etringita (QUARCIONI, 2008).
IV	Período de desaceleração	Início da diminuição gradual da taxa da evolução do calor, ou seja, à redução gradual na concentração de íons em solução, em razão da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras (KADRI e DUVAL, 2002). Depois de aproximadamente 24 horas tem-se a continuação das reações lentas que dão origem também a silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). Neste período as reações passam a ser controlada por difusão iônica ou reação topoquímica, alguns cimentos com $C_3A$ em geral, maior que 12% exibem um ombro característico na curva de calor de hidratação, em aproximadamente 16h, e está associado a uma nova formação de etringita (fase Aft)(QUARCIONI, 2008).

V	Estágio final ou período de reação lenta	São preenchidos gradativamente os espaços ocupados inicialmente pelo excesso de água de mistura, com densificação da pasta, e as reações de hidratação prosseguem por mecanismo topoquímico, consequência do crescimento dos produtos de hidratação (TAYLOR, 1998).
---	--	---

### 3.1.3 Características do Cimento Portland com adição de material carbonático – Fíler

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o cimento Portland com adição de material carbonático (fíler), por possuir carbonato de cálcio, tem como característica a maior trabalhabilidade já que as partículas de carbonato de cálcio têm dimensões adequadas para se alojar entre as partículas dos demais componentes do cimento.

A maioria dos cimentos encontrados no mercado, com aproximadamente 75% da produção brasileira, são os cimentos Portland compostos, que são utilizados para aplicações comuns (ABCP, 2002). No Quadro 2, pode-se analisar a composição, em massa, dos tipos de cimentos, comuns e compostos, em relação às adições (clínquer + gesso, escória de alto forno, material pozolânico e material carbonático).

É possível observar, no Quadro 2, que a adição de material carbonático (fíler), no cimento CP II-F varia entre 6 a 10% em massa, e o restante 90 a 94% constitui-se de clínquer e gesso. Sabendo que as dosagens e os tipos de aditivos resultam em várias aplicabilidades, o CP II-F pode ser utilizado para diversas funções como argamassa de revestimento, assentamento de tijolos, blocos, azulejos e ladrilhos, concreto sem armadura, concreto magro, concreto armado, concreto protendido e entre outros (ABCP, 2002).

Quadro 2 - Composição dos cimentos Portland comum e composto.

Tipos de Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória Granulada de Alto-Forno (Sigla E)	Material Pozolânico (Sigla Z)	Material Carbonático (Sigla F)	
Comum	CP I	100				NBR 5732
	CP I - S	99 - 95			1 - 5.	
Composto	CP II - E	94 - 56	6 - 34.		0 - 10.	NBR 11578
	CP II - Z	94 - 76		6 - 14.	0 - 10.	
	CP II - F	94 - 90			6 - 10.	

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

A Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), mostra qual a influência dos variados tipos de cimentos em relação a algumas propriedades, como pode-se observar no Quadro 3.

Quadro 3 - Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos.

Propriedade	Tipo de Cimento Portland						
	Comum e Composto	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistência Inicial	Resistência aos Sulfatos	Branco Estrutural	Baixo Calor de Hidratação
Resistência à Compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura

<b>Calor Gerado na Reação do Cimento com a Água</b>	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
<b>Impermeabilidade</b>	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
<b>Resistência aos agentes agressivos (água do mar e de esgotos)</b>	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
<b>Durabilidade</b>	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: Adaptado de ABCP (2002)

Conforme Peruzzi (2002), os constituintes do cimento Portland são a cal (CaO), a sílica (SiO<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), uma quantidade de magnésio (MgO) e uma pequena porção de anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>), o qual é adicionado depois da calcinação para retardar a pega. Em menor quantidade é possível encontrar óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O), óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e outras substâncias, sabendo que o óxido de potássio e sódio são denominados de álcalis do cimento. Mehta e Monteiro (1994), mostra através da Tabela 1, os óxidos compostos do clínquer e suas abreviações.

Tabela 1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações.

<b>Óxido</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Compostos</b>	<b>Abreviação</b>
<b>CaO</b>	C	3 CaO. SiO <sub>2</sub>	<b>C<sub>3</sub>S</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	S	2 CaO. SiO <sub>2</sub>	<b>C<sub>2</sub>S</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	A	3 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>C<sub>3</sub>A</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	F	4 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>C<sub>4</sub>AF</b>
<b>MgO</b>	M	4 CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	S	3 CaO. 2SiO <sub>2</sub> . 3H <sub>2</sub> O	<b>C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub></b>
<b>H<sub>2</sub>O</b>	H	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	<b>CSH<sub>2</sub></b>

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (1994).

Conforme Neville (1997) e Peruzzi (2002), o silicato tricálcico ( $C_3S$ ), conhecido como alita, corresponde a praticamente 60 a 67% na composição do cimento. A hidratação da alita inicia-se em poucas horas e é o maior responsável pela resistência mecânica nas primeiras idades nos concretos e argamassas. O betasilicato dicálcico ( $\beta C_2S$ ), conhecido como belita, aparece na composição do cimento Portland na variação de 17 a 25%. Sua hidratação acontece lentamente e é responsável pela resistência mecânica em idades mais avançadas. O aluminato de cálcio ( $C_3A$ ), conhecido como aluminato, corresponde de 3 a 8% na composição do cimento Portland e sua hidratação é extremamente rápida, contribuindo com a resistência mecânica no primeiro dia. O ferroaluminato de cálcio ( $C_4AF$ ), popularmente conhecido como ferrita aparece entre 0,5 a 0,6% na composição do cimento Portland, sua hidratação é rápida e contribui muito pouco na resistência mecânica nas primeiras idades. A Tabela 2 resume as propriedades dos principais compósitos do cimento Portland, de acordo com Kattar e Almeida (1999) e Neville (1997).

Tabela 2 - Propriedades dos principais componentes do cimento.

Propriedades	$C_3S$ (alita)	$C_2S$ (belita)	$C_3A$ (aluminato de cálcio)	$C_4AF$ (ferroaluminato de cálcio)
Resistência em pequenas idades	Alta	Fraca	Boa	Fraca
Resistência em idades posteriores	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Velocidade de hidratação	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Liberação de calor durante a hidratação	Média	Pequena	Grande	Média

Fonte: Adaptado de Kattar e Almeida (1999) e Neville (1997).

### **3.2 Resíduos sólidos e cinzas agroindustriais na construção civil**

De acordo com a NBR 10004 (2004) – Resíduos Sólidos – Classificação, os resíduos sólidos são resíduos que se encontram na forma sólida ou semissólida, provenientes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e varrições. Quando o resíduo não tem a gestão adequada, pode haver periculosidade (característica em função das propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas) e toxicidade (efeito adverso em consequência da interação com o organismo: inalação, ingestão ou absorção), apresentando riscos à saúde pública e riscos ao meio ambiente

A NBR 10004 (2004) relata que os resíduos sólidos são classificados em duas partes, os perigosos e não perigosos, e este último pode ser inertes ou não inertes. Os resíduos perigosos podem colocar em risco a saúde pública e o ecossistema. Suas principais características são toxicidade, combustibilidade, explosividade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade química, patogenicidade, radioatividade, entre outros. Os resíduos não perigosos e não inertes são aqueles que não oferecem riscos de perigo à população, mas que sofrem biodegradação, liberam gases de odor, apresentam solubilidade em água e, portanto, liberam chorume. Os não perigosos e inertes, não excedem os limites estabelecidos, como exemplo as pedras, rochas, vidros, plásticos, borrachas, pneus, sucatas, entre outros.

No Brasil, os resíduos industriais precisam passar por ensaios de composição,

lixiviação, toxicologia e periculosidade, para então, possuir sua classificação e, assim, serem estabelecidos programas de disposição, compostagem, reutilização, aplicação em solos agrícolas ou florestais (FOELKEL, 2011).

A busca e a necessidade da redução de custo na construção civil, a grande porcentagem de recursos naturais que são consumidas e a preocupação com o esgotamento de fontes/reservas naturais, fazem dos resíduos agroindustriais um forte potencial para obtenção de novos materiais para construção civil (CINCOTTO, 1988).

De acordo com Cincotto (1988), as cinzas tomam um lugar privilegiado entre os resíduos agroindustriais. Em outras palavras, há uma maior preocupação com estes resíduos provenientes de processos de geração de energia e secagem pois apresentam a problemáticas em relação ao armazenamento, impactando o ambiente.

Em relação as implicações ambientais, o uso de cinzas agroindustriais na construção civil, em substituição parcial do cimento Portland se faz satisfatória, já que resulta em uma economia de relevância de energia e custo (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Segundo John et al (2003), pode ser utilizada como adição mineral, qualquer cinza vegetal que for, predominantemente, siliciosa e possuir finura adequada, além de ser produzida no estado amorfo. Vale lembrar que a composição química da cinza é um ponto ímpar, já que depende da matriz (produto) que foi gerada, o solo que foi cultivado e o processo de produção.

### **3.3 Indústria de papel e celulose**

### 3.3.1 Resíduos da Indústria de papel e celulose

De acordo com Foelkel (2011), existem alguns resíduos sólidos comuns em uma indústria de papel e celulose, como a lama de cal, “dregs”, lodos das estações de tratamento de água e efluentes e o “grits”. Dependendo da indústria, podem existir também, a lama de bário, areia de caldeira de leite fluidizado, sesquisulfato ácido de sódio, cinza de caldeira de biomassa, dentre outros resíduos gerados durante todo o processo de fabricação do papel.

Pode-se de modo geral, classificar os resíduos sólidos da indústria de papel e celulose como, orgânicos, que compreendem os lodos industriais, a casca suja e aqueles gerados pelas pessoas; os resíduos inorgânicos (minerais), como as cinzas, “dregs”, “grits”, lama de cal, cal virgem, sesquisulfato de sódio, lama de bário, areia de caldeira de leite fluidizado e etc.; e também os resíduos perigosos, que são as graxas e óleos, resíduos radioativos, substâncias altamente corrosivas ou tóxicas que, embora gerados pela indústria, ficam entre 0,05 a 0,15 kg/tonelada seca ao ar de celulose (FOELKEL, 2011).

A cinza da caldeira de biomassa é um resíduo de qualidade muito variável, pois pode ser obtida do fundo (cinza de fundo), do precipitador de coleta de particulados (cinza leve e volante) e dos gases de exaustão da caldeira alimentada em base de biomassa energética (madeira e/ou casca de árvores). Sua coloração pode ser preta quando tem altos índices de carbono, ou ter coloração cinza clara com poucas quantidades de carbono. Sua consistência também pode ser extremamente variada, dependendo se são recolhidas secas (de 95 a quase 100%) ou úmidas (de 50 a 60%), por essas diferenças, a geração pode resultar de 5 a 40kg de cinza/tonelada seca ao ar de celulose produzida. A cinza volante é produzida em maior quantidade (70 –

85%), sendo o restante de cinzas de fundo de fornalha.

Foelkel (2011) traz algumas definições e características importantes destes resíduos. A lama de cal, por exemplo, é um resíduo liberado como purga de alimentação do forno de cal, que se constitui quase totalmente em carbonato de cálcio e uma pequena fração inerte entre 5 a 15% de óxidos de magnésio, silicatos, fosfatos, dentre outros. Sua consistência pode variar de acordo com sua geração, entre 2 e 20 kg secos/tonelada seca ao ar de polpa.

Outro exemplo destacado por Foelkel (2011) é a areia de leite fluidizado. Este resíduo é gerado pela combustão em leite fluidizado e sua aparência é seca e acinzentada. Dependendo da demanda energética, obtém-se uma geração de 1 a 4 kg/tonelada seca ao ar de polpa.

Os “dregs” é um material pastoso e de cor escura, um pouco granular, que é removido da clarificação do licor verde kraft, resultando da queima incompleta do licor preto na caldeira de recuperação e da precipitação de elementos minerais não processuais, como Al, Mg, Mn, Fe, Co, P, Si e Ca. A consistência é variada e são gerados, aproximadamente, de 7 a 15 kg secos/tonelada seca ao ar de polpa.

Os “grits” são resíduos provenientes do processo de hidratação da cal virgem para cal apagada, ou seja, é cal virgem extremamente queimada, com carbonatos e inertes não hidratados. Sua consistência é variada, chegando a gerar de 1 a 4 kg secos/tonelada seca ao ar polpa.

### 3.3.2 Cinza de caldeira proveniente do processamento do eucalipto

#### 3.3.2.1 *Definição*

A CME é uma biomassa retirada das caldeiras e consiste em uma mistura de minerais oxidados, sílica e carbono orgânico não totalmente queimado. Sua composição pode apresentar características pozolânicas (FOELKEL, 2011).

#### 3.3.2.2 *Processamento e composição*

De acordo com Foelkel (2011), nas indústrias de papel e celulose, as caldeiras de força atuam como termoelétricas em sistemas de cogeração de vapor e energia elétrica para alimentar o processo produtivo. Estas caldeiras são alimentadas por biomassa, como por exemplo, a madeira proveniente do eucalipto.

As cascas e madeiras quando são queimadas e tem o carbono oxidado para geração da energia, formam um resíduo na forma de cinzas e contaminantes minerais. Parte desta cinza acompanha os gases de exaustão (muito finas – “fly ash”), que são capturadas pelos filtros e ciclones lavadores de gases ou pelos precipitadores eletrostáticos. A outra parcela de cinza, que possui pedras, materiais vitrificados, pedaços de madeira e cascas que não foram queimadas (cinzas de fundo – “bottom ash”), são mais grosseiras, irregulares e contaminadas quando comparada às “fly ash”. Esta cinza é retirada pela parte de baixo da caldeira, na limpeza das fornalhas.

Muitas indústrias misturam os dois tipos de cinzas (de caldeira e de filtro), outras as processam e reciclam separadamente, depende das diferenças em qualidade e em geração entre essas duas frações de cinzas, como para correção de solos, fonte auxiliar de nutrientes, compostagem, misturas asfálticas e emargamassas

de cimento Portland. Existe diferença entre a quantidade de cinza resultante da combustão da lenha (madeira pura – 0,3 a 0,6 % base seu peso seco) e da casca (entre 3 - 8% base peso seco). Em geral, a cinza das caldeiras de biomassa é um dos mais abundantes resíduos gerados nas fábricas de celulose e kraft. Estas consistem em uma mistura de elementos minerais oxidados, areia e carbono orgânico não totalmente queimado. Possuem altos índices de cálcio, potássio, magnésio e fósforo e baixos índices de nitrogênio. A composição química da cinza de biomassa é muito variável e isso se deve a alguns fatores como, por exemplo, a temperatura de combustão. A temperatura ideal para a queima da biomassa deve estar acima de 800-900°C e, quanto maior a temperatura estiver acima dos 800-900°C, maior será a dissociação dos carbonatos em óxidos e maior a volatilização de potássio, enxofre, cobre, boro, sódio e nitrogênio. Inclusive, as temperaturas muito altas podem ter como consequência a sinterização (adensamento e vitrificação) das cinzas. Vale lembrar que as caldeiras não devem trabalhar sobrecarregadas, pois aumenta a geração de cinzas provenientes de uma combustão incompleta. Também, a biomassa utilizada deve possuir a umidade mínima possível, para que não ocorra combustão incompleta, perda de eficiência do combustível e aumento da geração de cinzas. Para destruir a matéria orgânica durante a queima da biomassa, é necessário que o tempo de retenção entre as partículas e o fogo seja acima de 1,5 segundos, lembrando que a qualidade e o tipo da matéria prima (biomassa) têm interferência nas dimensões das partículas, contaminações, misturas, etc. (FOELKEL, 2011).

Diversos fatores influenciam em aspectos qualitativos e quantitativos da cinza de madeira, como a temperatura de queima, tipos de fornos e as espécies de árvores, visto que fornos e incineradores podem possuir temperatura de conversão

térmica diferentes, proporcionando em variadas propriedades químicas, como também, rendimento das cinzas (CHEAH; RAMLI, 2011).

### **3.4 Atividade Pozolânica**

Os materiais pozolânicos, segundo a norma NBR 12653 (2014), são materiais silicosos ou silico-aluminosos, que quando moídos e misturados com água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com capacidade de se aglomerar. Porém, sem a presença de água esses materiais possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante.

A NBR 12653 (2014) classifica as pozolanas em três classes: classe N – pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos químicos e físicos dispostos na própria norma; classe C – cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que obedecem aos requisitos da norma; e classe E – pozolanas não contempladas na classe N nem na classe C, mas que também obedecem aos requisitos específicos da norma.

Para que o material seja classificado como pozolânico, é necessário que esteja de acordo com os requisitos físicos e químicos conforme sua classe, ou seja, é avaliado a composição química, o teor de umidade, a perda ao fogo, os álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O}$ , a quantidade de material retido na peneira 45  $\mu\text{m}$ , o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e o índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias, como apresentado na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Requisitos químicos.

Valores em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25
(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.				

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

Tabela 4 -Requisitos físicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3 (*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 Mpa	≥ 6 Mpa	≥ 6 Mpa	ABNT NBR 5751
(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.				

Fonte: ABNT NBR 12653 (2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a atividade pozolânica em cimentos Portland, ou seja, entre a pozolana e o hidróxido de cálcio resulta em três reações características. Primeiramente ocorre o retardo da reação, assim como a diminuição da taxa de liberação de calor e o aumento da resistência. Em segundo, o ganho de

durabilidade da pasta hidratada frente a ambientes ácidos, devido ao consumo do CH na reação. E por último, devido a eficiência no refinamento de poros e tamanho do grão, preenchendo espaços capilares, tem como consequência direta a melhoria da resistência e impermeabilidade do sistema. O mesmo autor relata que os materiais pozolânicos podem ser utilizados como adição mineral ou suplementação em materiais cimentícios.

#### 3.4.1 Materiais residuais e atividade pozolânica

Estudos a respeito da utilização de resíduos na construção civil tornam se crescentes, com foco em duas questões, como substituição parcial do cimento Portland ou como substituição parcial do agregado miúdo. Ou seja, o emprego destes materiais residuais em matriz cimentícia visa obter um destino adequado aos mesmos, desenvolvendo alternativas de incorporação de resíduos ambientais contribuindo no desempenho do composto cimentício ao qual o resíduo é incorporado.

O resíduo deve apresentar características que o classifiquem como um material pozolânico para ser utilizado em substituição parcial do cimento Portland, isto é, a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio formando compostos aglomerantes. Desse modo, pode-se dizer que as pozolanas são alternativas com potencial de elevar a eficiência dos concretos e argamassas

Diversos estudos são realizados para avaliar a incorporação de resíduos em matriz cimentícia, sobretudo na substituição do cimento, como podemos observar no Quadro 4.

Quadro 4 - Publicações de pesquisas referentes a incorporação de resíduos em matriz cimentícia com análises de atividade pozolânica.

<b>Título</b>	<b>Autor</b>	<b>Ano</b>
<b>Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria</b>	Romualdo R. Menezes, Gelmires A. Neves, Jozilene Souza, Weyne A. Melo, Heber S. Ferreira, Heber C. Ferreira	2009
<b>Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos</b>	Marcela Correia de Araújo Vasconcelos	2013
<b>Utilização da cinzada madeira de eucalipto na substituição parcial do cimentoportland em Argamassa</b>	Adriana Cristina Gluitzdaiana Marafão	2013
<b>Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de lã de rocha, fibra de vidro e lã de vidro</b>	Keoma Defáveri do Carmo e Silva	2016
<b>Atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana de açúcar submetidas à diferentes tratamentos</b>	Julia Rezende Mota	2020

Fonte: O autor (2022).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

#### 4.1.1 Cinza de Caldeira

A cinza de caldeira foi fornecida pela empresa brasileira Fibria, produtora de papel e celulose com fibra de eucalipto, localizada na cidade de Três Lagoas - MS. A Figura 3 mostra a cinza fornecida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 3 - Cinza de Caldeira



Fonte: O autor (2022).

#### 4.1.2 Cimento

O cimento Portland utilizado para a produção de argamassas e pastas de cimento foi o cimento composto com Fíler (CP II – F 32) da marca Votoran. Este

cimento possui, em adição ao clínquer, de 6 a 10% de material carbonático. O cimento foi adquirido no mercado comum de produtos e insumos da construção civil.

#### 4.1.3 Agregado miúdo

Foi adquirido, como agregado miúdo, uma areia siliciosa fornecida pelo Porto de Areia - Beira Rio de Presidente Epitácio. Este material foi peneirado a fim de separar as quatro frações de areia, conforme a NBR 7215 (2019). Tais frações correspondem à areia grossa, média grossa, média fina e fina, como mostra na Tabela 5.

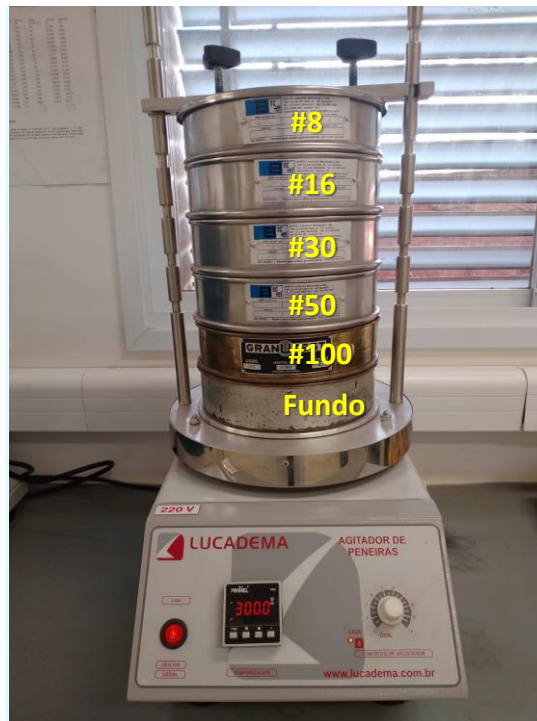
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da areia Normal.

<b>Denominação da Fração</b>	<b>Intervalo de abertura Nominal de Malha das Peneiras (mm)</b>	<b>Porcentagem Retida em Massa de Material nas Peneiras (%)</b>
<b>Grossa</b>	2,4 – 1,2	25 +/- 5
<b>Média Grossa</b>	1,2 – 0,6	50 +/- 5
<b>Média Fina</b>	0,6 – 0,3	75 +/- 5
<b>Fina</b>	0,3 – 0,15	97 +/- 3

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 7215 (2019).

Para a distribuição granulométrica de acordo com a NBR 7215 (2019), foram utilizadas peneiras com abertura de 8 mm (descartada), 16 mm (fração de areia grossa), 30 mm (fração de areia média grossa), 50 mm (fração de areia média fina), 100 mm (fração de areia fina) e o fundo (descartado). Este processo de peneiramento para obtenção da areia normal foi realizado no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos da UNESP - LCGRS, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Distribuição granulométrica da areia normal.



Fonte: O autor (2021).

#### 4.1.4 Outros materiais

Os outros materiais utilizados para obtenção da parte prática da pesquisa, são materiais auxiliares para confecção dos corpos de prova de argamassas e o desenvolvimento de ensaios ou caracterizações. Foram utilizados suportes de aço com Neoprene para o nivelamento dos corpos-de-provas utilizados nos ensaios mecânicos. Também, foram utilizados desmoldante sintéticos para produção dos corpos de prova, água e cal para o processo de cura submersa.

#### 4.2 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos de prova foram preparados e caracterizados em duas etapas: Etapa I - Avaliação do percentual de cinza adicionada e Etapa II - Avaliação da substituição de cimento ou areia por cinza. Cada etapa é descrita, a seguir, com detalhes.

*Etapa I – Avaliação do percentual de cinza adicionada à matriz cimentícia:*

A matriz cimentícia de argamassa foi preparada adicionando-se a cinza em teores de 5, 10 e 15% em massa, tomando como base a massa de cimento proposta pela NBR 7215 (2019). Todos os corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) da FCT/UNESP. No total, foram produzidos 100 corpos de prova cilíndricos com dimensão 5 x 10 (cm), sendo 20 deles, destinados ao ensaio de absorção de água aos 28 dias de cura. O restante, 80 corpos de prova, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial aos 7, 14, 28 e 91 dias de cura. Para todos os ensaios, foram produzidos uma repetição de 5 corpos de prova, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6 -Quantidade de corpos de prova por ensaio – Etapa I.

CORPO DE PROVA	Ensaio	Idade (dias)	Concentração de cinza de caldeira (%)	Quantidade de corpos de prova por concentração	Total de amostras	
	Resistência a compressão axial -NBR 7215 (2019)	7	0-5-10-15	5	20	80
		14	0-5-10-15	5	20	
		28	0-5-10-15	5	20	
		91	0-5-10-15	5	20	

<b>Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica - NBR 9878 (2005)</b>	28	0-5-10-15	5	20	<b>20</b>	<b>100</b>
--	----	-----------	---	----	-----------	------------

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 7 mostra a quantidade de materiais utilizados para produção dos corpos de prova da Etapa I, bem como o fator a/c calculado de acordo com a soma das quantidades de cimento e cinza. Vale lembrar que a quantidade de cimento, água e areia, misturados para preparar o traço piloto de uma masseira, está de acordo com a NBR 7215 (2019). Para os demais traços, a massa de água foi variada para aumentar o fator a/c destas amostras. Este procedimento foi realizado, esperando-se uma reação pozolânica da cinza na matriz, que por sua vez, deve consumir mais água durante a reação.

Tabela 7 - Quantidade de materiais utilizados para a Etapa I.

<b>ADIÇÃO DE CINZA INICIAL</b>						
<b>Traços</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Cinza (g)</b>	<b>Cimento + Cinza (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Areia normal (g)</b>	<b>Fator água/cimento (a/c)</b>
<b>0%</b>	624	0	624	300	1872	0,48
<b>5%</b>	624	31,2	655,2	315	1872	0,50
<b>10%</b>	624	62,4	686,4	330	1872	0,53
<b>15%</b>	624	93,6	717,6	345	1872	0,55

Fonte: O autor (2022).

*Etapa II – Avaliação da substituição de cimento ou areia por cinza*

Após a execução da Etapa I, o percentual de 15% foi selecionado para avaliar outros parâmetros em relação à matriz cimentícia. Inicialmente, foram preparados corpos de prova com a adição de 15% de cinza à matriz, porém corrigindo o fator a/c para 0,48. Em seguida, foram preparados corpos de prova com a substituição de 15% de areia pela cinza e, também, a substituição de 15% do cimento por cinza, todos mantendo o fator a/c de 0,48. Nesta Etapa II, foram produzidos 35 corpos de prova os quais foram caracterizados quanto à resistência à compressão e à absorção de água aos 28 dias de cura (apenas), como propõe as normas brasileiras. Também, foi realizado o ensaio de pozolanicidade da cinza, de acordo com a NBR 5752 (2014). A Tabela 8 resume os ensaios realizados, bem como a quantidade de corpos de prova utilizado para cada uma.

Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova por ensaio – Etapa II.

Ensaio	Corpos de Prova	Idade (dias)	Concentração de cinza de caldeira (%)	Quantidade de corpos de prova por concentração	Total de amostras		
<b>Resistência a compressão axial - NBR 7215 (2019)</b>	ADIÇÃO CINZA - A/C - 0,48	28	15	5	5	15	35
	SUBST. CIMENTO/CINZA	28	15	5	5		
	SUBST. AREIA/CINZA	28	15	5	5		
<b>Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica - NBR 9878(2005)</b>	ADIÇÃO CINZA - A/C - 0,48	28	15	5	5	15	
	SUBST. CIMENTO/CINZA	28	15	5	5		
	SUBST. AREIA/CINZA	28	15	5	5		
<b>Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias</b>	SUBST. CIMENTO/CINZA	28	25	5	5	5	

Fonte: O autor (2022).

A quantidade de material utilizada para preparar os corpos de prova desta Etapa II é mostrada na Tabela 9. Para estes casos, o fator a/c foi mantido constante em 0,48, desconsiderando, portanto, a participação da cinza como material potencial de atividade pozolânica na matriz.

Tabela 9 - Quantidade de materiais utilizados para a Etapa II.

	<b>Cimento (g)</b>	<b>Cinza (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Areia normal (g)</b>	<b>Fator água/cimento(a/c)</b>
<b>Adição de 15%cinza</b>	624	93,6	300	1872	0,48
<b>Substituição cimento/15%cinza</b>	530,4	93,6	254,6	1872	0,48
<b>Substituição areia/15%cinza</b>	624	280,8	300	1591,2	0,48

Fonte: O autor (2022).

#### 4.2.1 Mistura Mecânica

Foi utilizado um misturador mecânico adaptado para realizar a mistura dos materiais para a confecção da argamassa com cinza de caldeira. Primeiramente foi colocada toda a água e, então, adicionando o cimento e a cinza. No momento em que o cimento entrou em contato com a água, o cronômetro foi ligado para controlar um tempo de mistura de 30 segundos. Logo em seguida, foi colocada toda a areia e misturou-se por mais 30 segundos. Passado este tempo, o misturador foi desligado por 90 segundos e por fim ligado novamente e deixado misturar por 60 segundos. Este procedimento é descrito no item 3.5.2.2 da NBR 7215 (2019) e foi utilizado em ambas as etapas de preparação dos corpos de prova.

#### 4.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Imediatamente após a argamassa ser devidamente misturada, foi realizada a moldagem dos corpos de prova, colocando a argamassa nos moldes cilíndricos, em quatro camadas de alturas relativamente iguais. Para cada camada, foram realizados 30 golpes com o soquete para a argamassa ser homogeneamente distribuída e adensada. A Figura 5 mostra os moldes dos corpos de prova na dimensão de 5 x 10 (cm) e a Figura 6 identifica como fica a argamassa devidamente colocada e adensada no molde.

Figura 5 - Moldes dos corpos de prova.



Fonte: O autor (2021).

Figura 6 - Corpo de prova preenchido com argamassa.



Fonte: O autor (2021).

#### 4.2.3 Cura e desmoldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova ainda nos moldes foram colocados na câmara úmida (com adaptações no ambiente) para cura inicial, onde permaneceram 24 horas, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Cura inicial na câmara úmida.



Fonte: O autor (2021).

Após o período de cura inicial, os corpos de prova foram retirados dos moldes e identificados, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Corpos de prova desmoldados.



Fonte: O autor (2021).

Posteriormente, foram imersos água saturada com cal, onde permaneceram até o momento de ruptura.

A cura inicial, o desmolde e a cura submersa dos corpos de prova, foram realizadas de acordo com a NBR 7215 (2019).

### **4.3 Caracterizações Tecnológicas**

#### **4.3.1 Difração de Raios X**

A difração de Raios X é uma técnica de caracterização de materiais, utilizada na identificação e monitoramento da formação de fases cristalinas. Esta técnica advém da interação de uma radiação eletromagnética monocromática e a estrutura cristalina da matéria, onde foi utilizada para caracterização da cinza e do cimento. Para essa caracterização, o equipamento utilizado foi o Shimadzu, modelo DRX- 6000, radiação Cu  $\kappa\alpha_1$  ( $\lambda = 1,5406\text{\AA}$ ) e Cu  $\kappa\alpha_2$  ( $\lambda = 1,5444\text{\AA}$ ), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA, pertencente ao Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos - LCGRS, FCT/Unesp (Figura 9). As amostras de cinza e cimento foram analisadas na forma de pó em uma porta amostra de alumínio. Os resultados foram analisados mediante o software pertencente ao equipamento.

Figura 9 - Equipamento de Difração de Raios X.



Fonte: O autor (2022).

#### 4.3.2 Fluorescência de Raio-X

A fluorescência de Raios X é uma técnica não destrutiva que permite diferenciar os elementos químicos presentes em uma amostra (análise qualitativa), assim como estabelecer a proporção (concentração) destes elementos. Esta análise foi feita em um equipamento Shimadzu, (modelo FRX-7000), pertencente ao LCGRS, da FCT/Unesp (Figura 10). A FRX foi realizada em vácuo, no modo qualitativo-quantitativo, nas amostras de cinza de eucalipto e o cimento.

Figura 10 - Equipamento de Fluorescência de Raios X.



Fonte: O autor (2022).

#### 4.4 Ensaaios normatizados

Os corpos de provas foram analisados após a cura submersa, no seu estado endurecido, quanto à propriedade mecânica (resistência a compressão axial) e

propriedades físicas (massa específica real, absorção de água e índice de vazios), os quais foram utilizados 5 corpos de prova para cada idade e concentração.

#### 4.4.1 Resistência a compressão axial

Para a realização do ensaio de resistência a compressão axial conforme a NBR 7215 (2019), os corpos de prova após a cura submersa, foram separados e pesados. Para nivelar as bases do corpo de prova (capear), foi utilizado o Neoprene. O ensaio de ruptura foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil e o equipamento utilizado foi a prensa universal mecânica Pavitest, modelo Contenco UMC, com velocidade de carregamento da máquina equivalente a 0,25 MPa/s, com carga máxima de 20 toneladas. A Figura 11 mostra o equipamento utilizado para o ensaio e a Figura 12 mostra o corpo de prova posicionado para o ensaio de ruptura à compressão.

Figura 11 - Prensa Mecânica utilizada.



Fonte: O autor (2021).

Figura 12 - Corpo de prova capeado com Neoprene centralizado na prensa hidráulica.



Fonte: O autor (2022).

Para que o cálculo da resistência à compressão ( $f_c$ ) fosse realizado, foi preciso dividir a força de ruptura pela área nominal da seção do corpo de prova e então a resistência foi determinada em megapascals (MPa), conforme a Equação 1.

$$f_c = \frac{F \times 9,81}{A} \quad (1)$$

Na equação (1),  $f_c$  = Resistência à compressão (MPa),  $F$  = Força (Kgf),  $9,81$  = Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $A$  = Área da seção ( $mm^2$ ).

#### 4.4.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Para que fosse determinado a absorção de água por imersão, foram moldados 5 corpos de prova para cada concentração, totalizando 20 corpos de prova. O procedimento para determinação das propriedades físicas é amparado pela NBR 9778 (2009) - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Após o tempo estimado para cura submersa, os corpos de prova foram limpos, retirando a cal presente em sua superfície e colocado em estufa, mantendo a temperatura de  $105 \pm 5$  °C por um período de 72 horas. Após este período, foram registradas a massa seca das amostras ( $m_s$ ).

Os corpos de prova foram submersos em água, novamente, em temperatura ambiente e mantidos durante 72 horas nesta condição. Após este período foram determinadas as massas imersas com auxílio da balança hidrostática ( $m_i$ ) e também a massa saturada da amostrada ( $m_{sat}$ ).

De acordo com a NBR 9778 (2009), a absorção de água é a capacidade que um corpo de prova tem de absorver água por meio de seus poros permeáveis. A absorção de água por imersão (A) de cada corpo de prova, em porcentagem, foi determinada pela Equação 2.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Na equação 2, A é a absorção de água por imersão (%),  $m_{sat}$  é a massa da amostra saturada (g) após imersão por 72 horas e  $m_s$  é a massa da amostra seca (g).

Conforme a NBR 9778 (2009), o índice de vazios, representa a relação entre

o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Para que fosse calculado o índice de vazios ( $I_v$ ), em porcentagem, utilizou-se a Equação 3.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad (3)$$

Nesta equação,  $I_v$  representa o índice de vazios (%) e  $m_i$ , a massa da amostra saturada imersa (em balança hidrostática).

Ainda segundo a NBR 9778 (2009), a massa específica da amostra seca, é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. A Equação 4 mostra o cálculo para a determinação da massa específica seca da amostra ( $\rho_s$ ).

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

A NBR 9778 (2009) ainda prevê a determinação da massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ) que corresponde à relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. Para que fosse determinada a massa específica da amostra saturada, foi utilizada a Equação 5.

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (5)$$

Por fim, a NBR 9778 (2009) descreve que a massa específica real da amostra

( $\rho_r$ ), é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. O cálculo para a determinação da massa específica real da amostra, foi descrito pela Equação 6.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (6)$$

#### 4.4.3 Atividade Pozolânica – Cimento 28 dias

Para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) da cinza de caldeira proveniente do processamento do eucalipto quando inserido em matriz cimentícia - argamassa, realizou-se o ensaio conforme NBR 5752 (2014).

A Tabela 10 mostra a quantidade, em massa, de material utilizado para determinação da do índice de atividade pozolânica (IAP) da cinza, conforme as recomendações da NBR 5752 (2014). De acordo com esta NBR, a quantidade de materiais utilizados para o ensaio, compõem duas amostras de argamassa (A e B), que se diferenciam da seguinte forma: a argamassa A corresponde à amostra piloto, sem adição de cinza e a argamassa B, substituindo 25% da massa do cimento pela cinza.

Tabela 10 - Quantidade de material, em massa, para realização do ensaio de IAP.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
<b>Cimento CP-II-F32</b>	624	468
<b>Cinza de caldeira</b>	0	156
<b>Areia normal</b>	1872	1872
<b>Água</b>	300	300

Fonte: Adaptado da NBR 5752 (2014).

Para este ensaio, foram confeccionados 5 corpos de provas de referência (os mesmos utilizados para realização da resistência a compressão axial) e 5 corpos de prova com substituição parcial do cimento por cinza de caldeira, em 25% em massa.

Para o ensaio, foi realizada a mistura mecânica da argamassa, moldagem dos corpos de prova e permanência em cura submersa por 28 dias, após este período, os corpos de prova foram separados, pesados e nivelados (capeados) com Neoprene e então, submetidos ao ensaio de ruptura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unoeste – LabCivil. O Equipamento utilizado foi prensa universal mecânica Pavitest, modelo Contenco UMC, com carga máxima de 20 toneladas.

O cálculo da resistência à compressão ( $f_c$ ), em megapascals (MPa), de cada corpo de prova, foi obtido dividindo a força de ruptura pela área nominal da seção do corpo de prova, conforme a Equação 7.

$$f_c = \frac{F \times 9,81}{A} \quad (7)$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão (MPa);

F = Força (Kgf);

9,81 = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

A = Área da seção (mm<sup>2</sup>).

E o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi calculado pela Equação 8:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

$I_{\text{cimento}}$  = é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%);

$f_{cB}$  = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25 % de material pozolânico (argamassa B em MPa);

$f_{cA}$  = é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A em MPa).

De acordo com a NBR 12.653 (2014), o desempenho de uma argamassa produzida com substituição de 25% do cimento Portland por material pozolânico comparado com o de uma argamassa piloto (sem substituição), deve alcançar resistência mínima de 90% da resistência à compressão da argamassa de referência.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

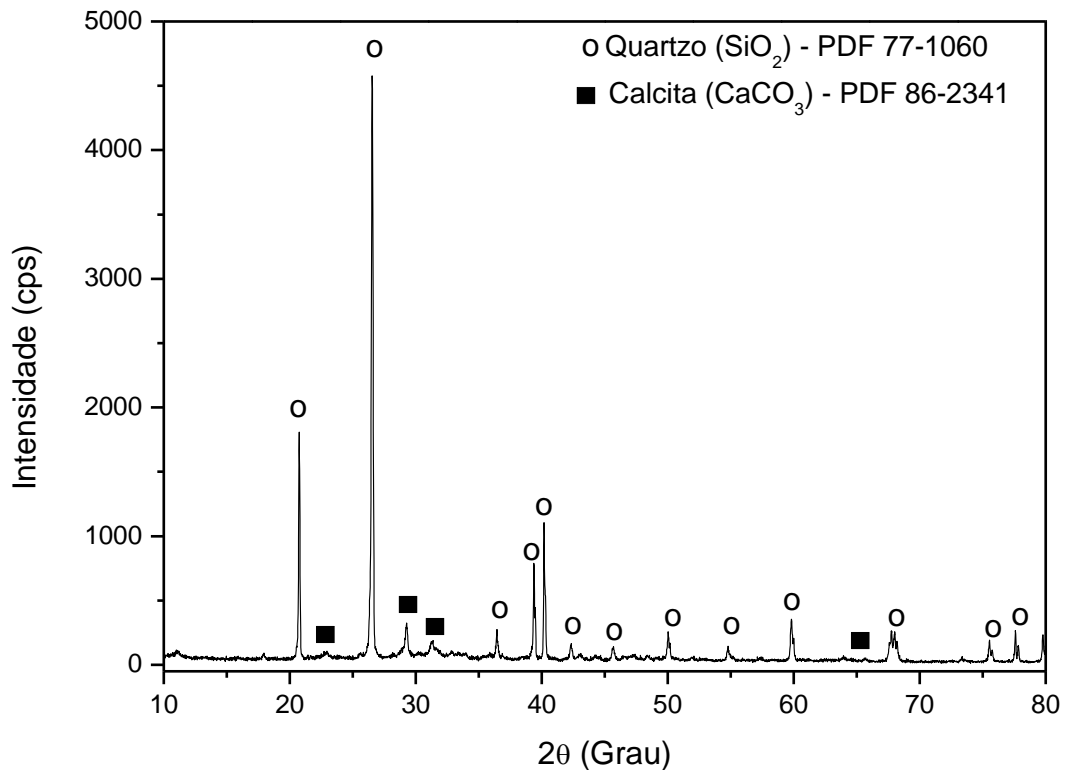
### 5.1 Difração de Raio X – DRX

#### 5.1.1 DRX da Cinza

A Figura 13 mostra o difratograma de Raios X da cinza. Foram encontradas duas fases cristalinas: o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) identificado com picos bem definidos, caracterizando uma alta cristalinidade e a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), como fase secundária. Essa composição mineralógica já é bem conhecida na literatura. França (2016) e Resende (2013), também identificaram, na cinza de eucalipto, a predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Bonfim e Paula (2021), encontraram, na cinza do bagaço da cana, o quartzo e, na cinza do eucalipto, a calcita, como fase cristalina principal.

As fases cristalinas presentes nestas cinzas estão relacionadas à temperatura e tempo de queima. Normalmente, quando a temperatura de queima é maior que  $900^\circ\text{C}$ , a sílica amorfa presente nos resíduos é transformada em sílica cristalina (Le Blond, et al., 2010).

Figura 13 - Difratoograma de Raios X da cinza.

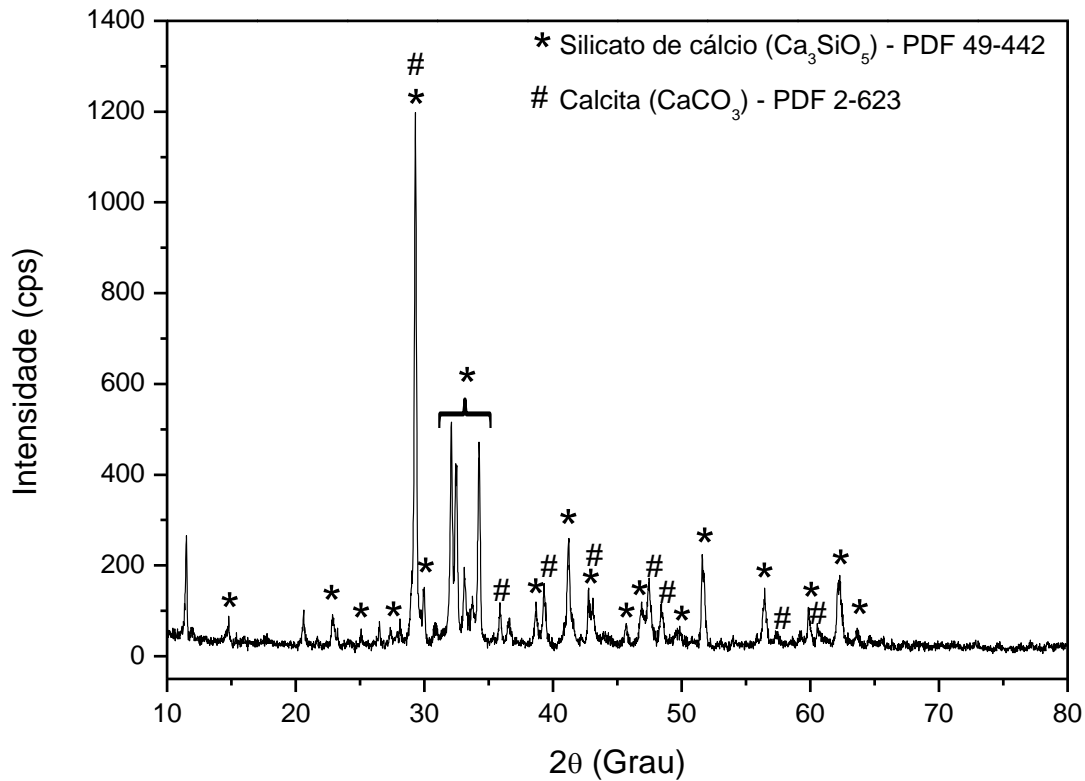


Fonte: O autor (2022)

### 5.1.2 DRX do Cimento Portland – CP II F 32

No ensaio de DRX do Cimento Portland – CP II F 32, foram encontradas algumas fases cristalinas distintas, como mostra a Figura 14. Os picos cristalinos indicam a presença da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e um silicato de cálcio, a alita (silicato tricálcico –  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  –  $\text{C}_3\text{S}$ ). As fases identificadas estão em concordância com o tipo de cimento analisado (CP II F 32). Outros trabalhos da literatura, mostram que o clínquer que compõe o cimento Portland caracteriza-se pela presença das fases alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ), podendo conter ainda, em sua composição, a ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), como fase menos cristalizada, uma fase intersticial amorfa, o aluminato ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e a calcita ( $\text{CaCO}$ ) (Pasquel, 1996; Nascimento (2019); Simões, 2020).

Figura 14 - Difratoograma de Raios X do cimento Portland (CP II F 32).



Fonte: O autor (2022)

## 5.2 Fluorescência de Raio X – FRX

### 5.2.1 FRX do Cimento Portland CP II F 32 e da Cinza

A Tabela 11 mostra os resultados de análise química por fluorescência de Raios X (FRX) das amostras de cimento Portland e da cinza.

Observa-se na composição química do cimento uma predominância de CaO (79,79%), seguida pela quantidade de SiO<sub>2</sub> (7,76%). Também são identificados 4,15% de SO<sub>3</sub>, 4,13% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,18% de K<sub>2</sub>O e 1,07% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dentre os óxidos minoritários. Outros elementos são encontrados em concentrações inferiores, concordando com resultados de outros trabalhos da literatura (Duarte, 2013).

Já a cinza é composta predominantemente de  $\text{SiO}_2$  (óxido de silício), cerca de 71%, que está associado à presença do quartzo, identificado no DRX desta amostra. O segundo composto de maior percentual identificado, está o  $\text{CaO}$ , com ~17%, que, por sua vez, pode estar associado à calcita, também identificado no DRX desta amostra. Com quantidades inferiores, porém significativas, encontram-se 3,65% de  $\text{SO}_3$  (trióxido de enxofre), 2,92% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido de ferro) e 2,87% de  $\text{K}_2\text{O}$  (óxido de potássio). Existe, ainda, a presença de outros óxidos, porém, com concentrações desprezíveis, inferiores a 1% em peso da amostra. Esta composição, ou seja, a predominância de óxido de silício e óxido de cálcio em cinza de diferentes biomassas, já foram relatadas em outros trabalhos da literatura, como no trabalho de Bonfim e Paula (2021), que avaliaram a cinza da casca de arroz e França (2016) cujo trabalho também envolveu a cinza da queima do eucalipto.

Tabela 11 - Análise química do cimento Portland e da cinza de eucalipto.

Composição química do cimento Portland CP II F 32		Composição química da cinza	
Óxidos	% (em peso)	Óxidos	% (em peso)
$\text{SiO}_2$	7,76	$\text{SiO}_2$	71,26
$\text{CaO}$	79,79	$\text{CaO}$	17,47
$\text{SO}_3$	4,15	$\text{SO}_3$	3,65
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,13	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,92
$\text{K}_2\text{O}$	1,18	$\text{K}_2\text{O}$	2,87
$\text{TiO}_2$	0,37	$\text{TiO}_2$	0,67
$\text{MnO}$	0,38	$\text{MnO}$	0,57
$\text{MgO}$	0,84	$\text{P}_2\text{O}_5$	0,35
$\text{SrO}$	0,13	$\text{SrO}$	0,12
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,07	$\text{ZrO}_2$	0,03

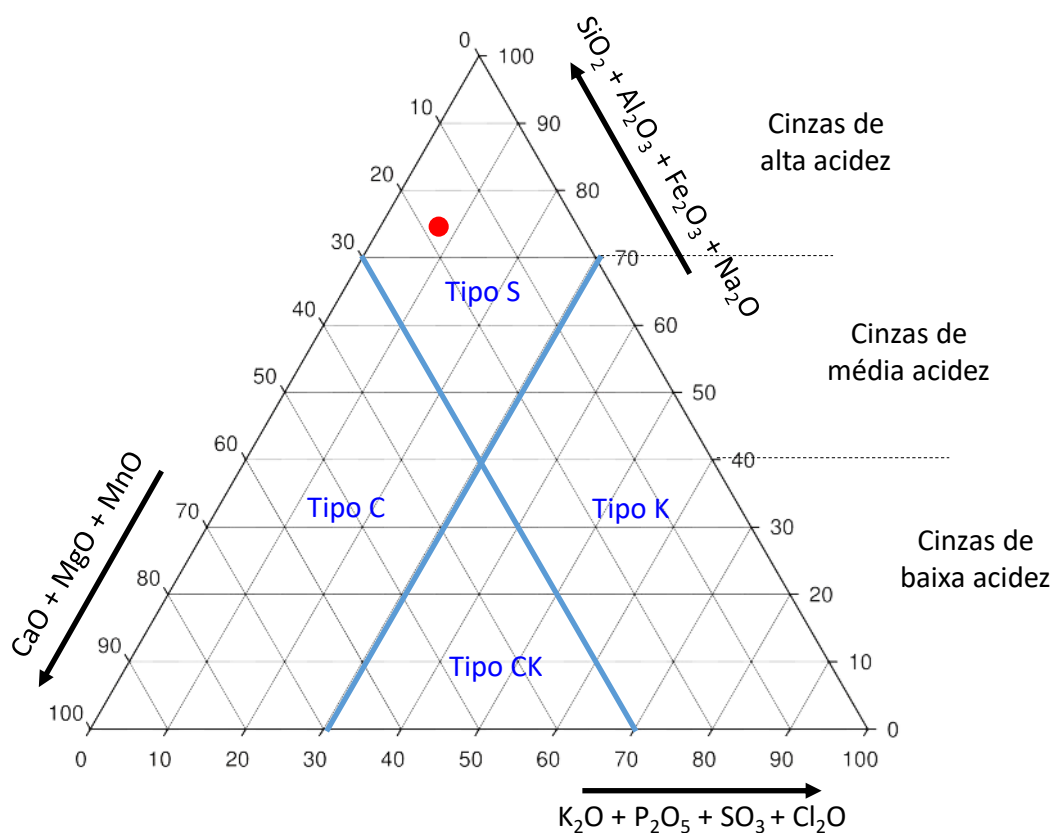
<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,03	<b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,03
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,03	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,02
<b>ZnO</b>	0,05	<b>ZnO</b>	0,02
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0,01	<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0,01
<b>CuO</b>	0,05	<b>Br</b>	0,01
<b>Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,02		
<b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01		
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,02		

Fonte: O autor (2022).

Uma abordagem bastante interessante sobre as propriedades de cinzas de biomassa e seu efeito sobre materiais de matriz cimentícia foi feita por Silva (2015). Naquele trabalho, os autores avaliaram o potencial de substituição de cimento por cinzas produzidas na agroindústria do cacau e abordam que as propriedades das cinzas são fortemente influenciadas pelo tipo de biomassa e as características da queima. Com isso, baseando-se em outros trabalhos da literatura (Vassilev, 2010), os autores mostram um diagrama em que se pode classificar diferentes tipos de cinzas, baseando-se apenas em sua composição química, estabelecido por normas europeias. Eles mostram, então, quatro tipos de cinzas (em termos químicos): S, K, C e CK, que dependem da quantidade de determinados elementos presentes em sua composição química. Essas classificações, bem como o conjunto de compostos químicos correlacionados a serem considerados, são mostrados na Figura 15. Segundo Vassilev (2010), um diagrama deste tipo, pode ser usado como sistema de classificação química inicial e preliminar para a matéria inorgânica da biomassa, bem como para determinar previamente sua aplicação. As cinzas de biomassa do tipo C ou S, por exemplo, são potenciais para serem utilizadas pela construção civil, sendo aquelas do tipo S, potenciais de apresentarem atividade pozolânica.

De acordo com essa abordagem, a cinza proveniente da queima de eucalipto utilizada neste trabalho, apresenta composição química que pode classificá-la como sendo do tipo S, indicada pelo círculo vermelho no diagrama da Figura 15. Com isso, pode-se prever que este resíduo pode ser utilizado em componentes de matriz cimentícia (Silva, 2015). A forma como este resíduo será incorporado à matriz dependerá de ensaios preliminares, os quais iremos discutir adiante.

Figura 15 - Sistema de classificação química da matéria inorgânica em cinzas.



Fonte: Adaptado de Silva (2015) e Vassilev (2010).

### 5.3 Atividade Pozolânica – Cimento aos 28 dias

A Tabela 12 mostra os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova preparados para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) da cinza. De acordo com os resultados verifica-se que a resistência a compressão axial média referente a argamassa A (piloto) é 20,4 MPa e a resistência a compressão axial média da argamassa B (substituindo 25% do cimento pela cinza) é de 11,71 Mpa.

Tabela 12 - Resistência à compressão axial da Argamassa A e B.

<b>NBR 7215: 2019 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão – valores médios</b>		
<b>Argamassa</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Arg amassa A</b>	20,40	1,49
<b>Arg amassa B</b>	11,71	1,01

Fonte: O autor (2022).

A NBR 12653 (2014) determina que, para um material ser classificado como pozolânico, o IAP deve ser superior ou igual à 90%.

No entanto, utilizando a equação citada na norma, o resultado do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, foi de 57,40%, isto é, a incorporação de 25% de cinza de caldeira em substituição a massa de cimento, proporcionou uma diminuição de 42,6% na resistência à compressão axial em comparação ao traço piloto. Portanto, a cinza de caldeira proveniente do processamento do eucalipto, avaliada neste trabalho, não possui atividade pozolânica, de acordo com a norma.

Outros trabalhos da literatura apresentaram resultados similares. Gluitz e Marafão (2013), por exemplo, também utilizando a cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa, encontrou um IAP de 26,09%

e Vaske (2012), também usando cinza de eucalipto, encontrou IAP igual a 44,4%.

Embora a cinza da queima do eucalipto utilizada neste trabalho tenha apresentado composição química que a classificasse como potencial de desenvolver atividade pozolânica (discutida no item 5.2), é sabido que a ação pozolânica das cinzas depende, não só de sua composição química, mas também da estrutura mineralógica que seus componentes se apresentam. Se a estrutura mineralógica for cristalina, a cinza deve apresentar reatividade limitada. Além disso, a finura (granulometria) tem importante influência neste processo, ou seja, para que a cinza tenha potencial atividade pozolânica, mais de 34% da cinza deve ter tamanho de partícula menor que 45  $\mu\text{m}$  (Silva, 2015).

#### **5.4 Distribuição Granulométrica da Cinza**

É sabido que a ação pozolânica das cinzas depende, não só de sua composição química, mas também da estrutura mineralógica que seus componentes se apresentam. Se a estrutura mineralógica for cristalina, como verificada para o nosso material, a cinza deve apresentar reatividade limitada. Além disso, a finura (granulometria) também tem importante influência neste processo, ou seja, para que a cinza tenha potencial atividade pozolânica, é desejável que mais de 66% da cinza deva ter tamanho de partícula menor que 45  $\mu\text{m}$  (Silva, 2015).

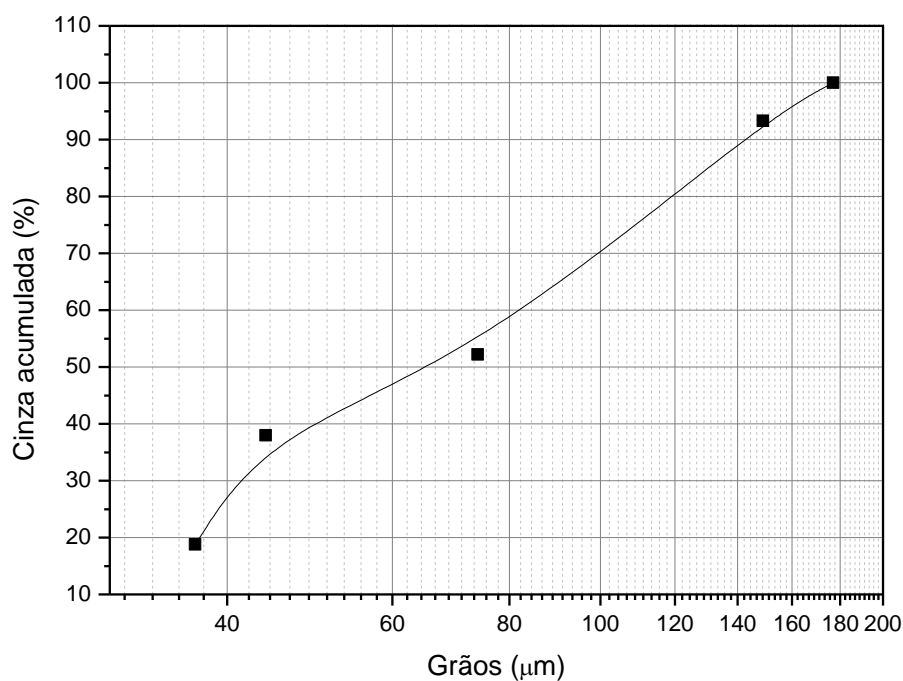
Os resultados de distribuição do tamanho de partícula da cinza (Tabela 13 e Figura 16) mostram que apenas 38% da cinza tem tamanho de partículas menor que 45 $\mu\text{m}$ , que contribui para concluir a deficiência de reatividade pozolânica deste resíduo.

Tabela 13 - Distribuição granulométrica da cinza proveniente da queima do eucalipto

Abertura da Peneira (Mesh)	Abertura da peneira ( $\mu\text{m}$ )	Percentual retido (%)	Percentual passante acumulado (%)
80	177	0	100
100	149	6,7	93,3
200	74	41,1	52,2
325	45	14,2	38,0
400	37	19,2	18,8
Fundo		18,8	0

Fonte: O autor

Figura 16 - Distribuição do tamanho de partícula da cinza.



Fonte: O autor

### 5.5 Resistência a Compressão Axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa com 0, 5, 10 e 15% (em massa) de adição de cinza com

fatores a/c variáveis, da Etapa I (0,48, 0,50, 0,53 e 0,55, respectivamente) são mostrados na Tabela 14. Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 7, 14, 28 e 91 dias e os valores médios apresentados foram obtidos para 5 corpos de prova.

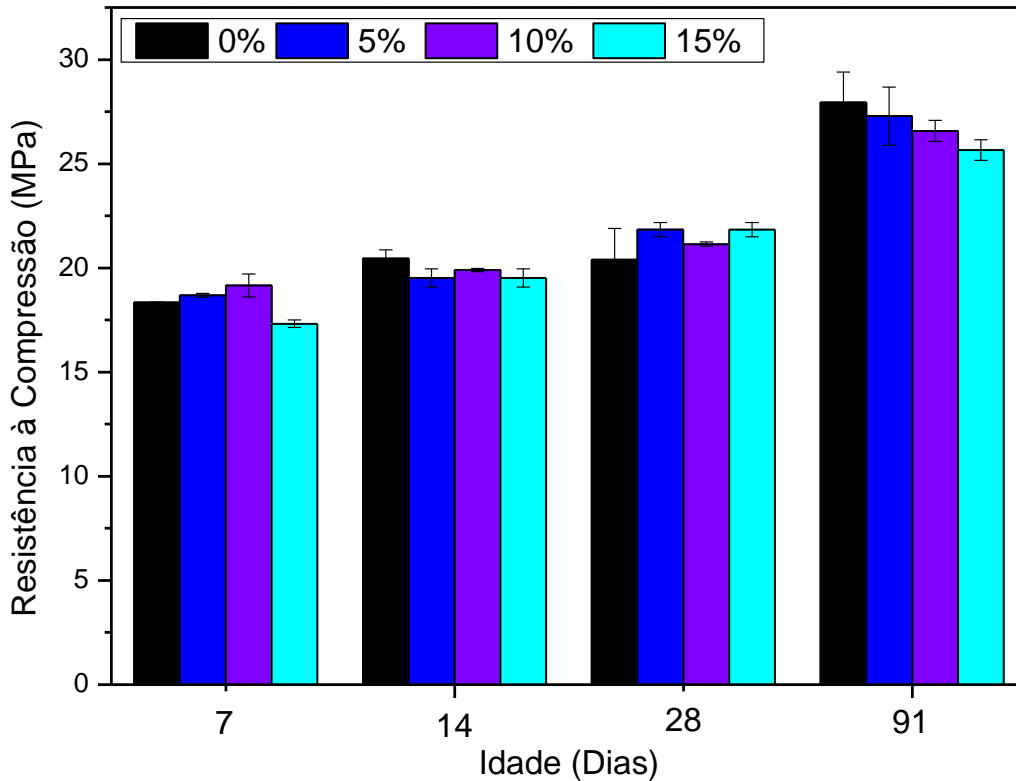
Tabela 14 - Valores médios da Resistência à Compressão dos corpos de prova da Etapa I.

<b>NBR 7215:2019 - CIMENTO PORTLAND - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - VALORES MÉDIOS</b>								
<b>Amostras</b>	<b>IDADES (Dias)</b>							
	<b>7</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>14</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>28</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>91</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>0%</b>	19,33	0,02	20,45	0,41	20,40	1,49	27,94	1,46
<b>5%</b>	18,68	0,10	19,89	0,33	21,92	0,81	27,29	1,40
<b>10%</b>	19,16	0,55	19,90	0,08	21,14	0,11	26,58	0,51
<b>15%</b>	17,32	0,18	19,52	0,44	21,83	0,34	25,66	0,49

Fonte: O autor (2022).

De acordo com os resultados da Tabela 14, é possível verificar que o aumento de resistência é proporcional à idade do corpo de prova, ou seja, os corpos de prova com mesma quantidade de aditivo obtiveram uma resistência maior com a idade de cura. Entretanto, observa-se que essa relação não ocorre para corpos de prova em uma mesma idade, contendo diferentes concentrações de cinza. Estes comportamentos podem ser melhor ilustrados na Figura 17, que mostra graficamente os resultados de resistência à compressão dos corpos de provas nas idades de ruptura analisadas (7, 14, 28 e 91 dias).

Figura 17 - Resistência à compressão axial das argamassas (Etapa I).



Fonte: O autor (2022).

A Tabela 15 mostra os valores médios da resistência à compressão dos corpos de prova preparados na Etapa II. Para fins de comparação, foram incluídos os resultados da amostra com adição de 15% de cinza e fator a/c 0,55 (preparado na Etapa I).

Tabela 15 - Valores médios da Resistência à Compressão dos corpos de prova da Etapa II.

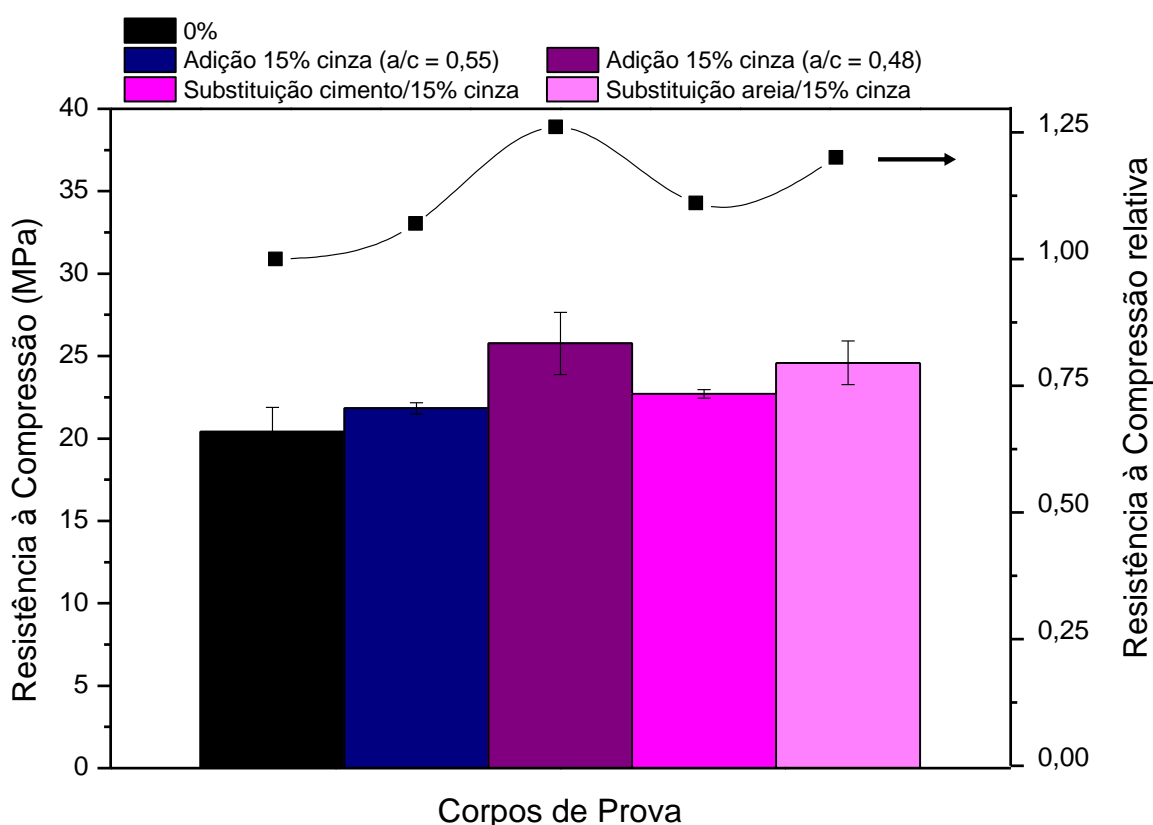
<b>NBR 7215:2019 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão aos 28 dias de cura – Valores médios</b>		
<b>Corpos de prova</b>	<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>0%</b>	20,40	1,49
<b>Adição de 15%cinza (a/c = 0,55)</b>	21,83	0,34
<b>Adição de 15%cinza (a/c = 0,48)</b>	25,77	1,89
<b>Substituição cimento/15%cinza</b>	22,70	0,26
<b>Substituição areia/15%cinza</b>	24,59	1,32

Fonte: O autor (2022).

Os resultados mostram que há um aumento no valor de resistência à compressão (~18%) para a amostra contendo a adição de 15% de cinza, com a diminuição do fator a/c de 0,55 para 0,48. Este resultado mostra a influência do fator a/c na resistência do material. A quantidade de água retida na matriz deve ser suficiente para promover as reações de hidratação do cimento e um ganho de resistência. Se este processo de hidratação não for completo, devido à falta de água suficiente, o cimento pode apresentar apenas o efeito filler, ao invés de desenvolver sua pozolanicidade e completar o processo de hidratação. Por outro lado, um excesso de água, pode provocar uma retenção na matriz, que impede a hidratação completa do cimento (Silva e Brito, 2007). Também, pode-se observar que os resultados obtidos para todas as amostras contendo cinza são maiores quando comparados à amostra padrão (0% cinza na mesma idade de cura), ou seja, a resistência à compressão relativa é superior em todos os casos, tomando-se como referência a amostra padrão. Em relação às substituições de cimento ou areia pela cinza, observa-se que substituição da areia parece ser mais adequada, já que a resistência à compressão

desta amostra (substituição areia/15%cinza - 24,98 Mpa) é maior quando comparada à anterior (substituição cimento/15%cinza - 22,70 Mpa). A Figura 18, mostra graficamente os resultados apresentados na Tabela 15 (gráfico de barras), bem como os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova em relação à amostra padrão (0%), indicados pelo gráfico de linha.

Figura 18 - Resistência à compressão axial e relativa das argamassas (Etapa II).



Fonte: O autor (2022)

Na literatura, há vários trabalhos que mostram uma diminuição da resistência à compressão de matrizes cimentícias contendo cinza (concreto ou argamassa), seja adicionada à matriz, seja na substituição de algum componente (cimento ou agregado). Silva (2015), por exemplo, em um estudo de argamassa contendo cinza de eucalipto

e de casca de amêndoa de cacau, obteve resultados de resistência à compressão axial, aos 28 dias sem cinza, de 25,25 Mpa. Ao substituir 5% em massa do cimento pelos resíduos (dois tipos de cinzas), os resultados de resistência diminuíram para 21,37 MPa e 20,47 Mpa, de acordo com a cinza utilizada. Udoeyo e Dashibil (2002) e Cheah e Ramli (2011) observaram em seus resultados, redução na resistência à compressão do concreto com o aumento do nível de substituição do cimento por cinza de eucalipto. Udoeyo et al (2006) relata que as partículas de cinza de madeira devem se comportar mais como material de enchimento do que como material aglomerante, condizendo com Resende (2013), que afirma que o comportamento da cinza de eucalipto no concreto é apenas de preenchimento de poros, ou seja, efeito filler. Como pôde-se observar, embora a cinza utilizada neste trabalho não tenha apresentado caráter pozolânico para participar do processo de hidratação do cimento na matriz, também, não atua como um material inerte, já que provoca um suave aumento na resistência dos corpos de prova estudados. Este comportamento, certamente, está associado à distribuição do tamanho de partícula da cinza que se aproxima, em parte, do tamanho de partícula apresentada pelo cimento Portland CP II F-32. De acordo com os requisitos para o cimento Portland que constam na NBR 16697 (2018), 88% da finura do cimento deve ser menor que 75  $\mu\text{m}$ . No caso da cinza de eucalipto utilizada neste trabalho, aproximadamente 41% apresenta partículas com o tamanho da mesma ordem daquelas que compõem o cimento Portland utilizado. Com isso, este percentual de partículas da cinza auxilia na compactação da massa de argamassa, participando do efeito filler e aumentando a resistência mecânica, como mostrado na Figura 18.

## 5.6 Absorção de Água por Imersão

Com respaldo na NBR 9778 (2009), após o processo de a cura submersa de 28 dias das amostras, foram determinadas a absorção de água por imersão, o índice de vazios da amostra e a massa específica real. A Tabela 16 apresenta valores médios destes ensaios para os corpos de prova preparados na Etapa I, cujos fatores a/c variam de 0,48, 0,50, 0,53 e 0,55 para as amostras 0%, 5%, 10% e 15% de adição de cinza, respectivamente.

Tabela 16 - Valores Médios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa I).

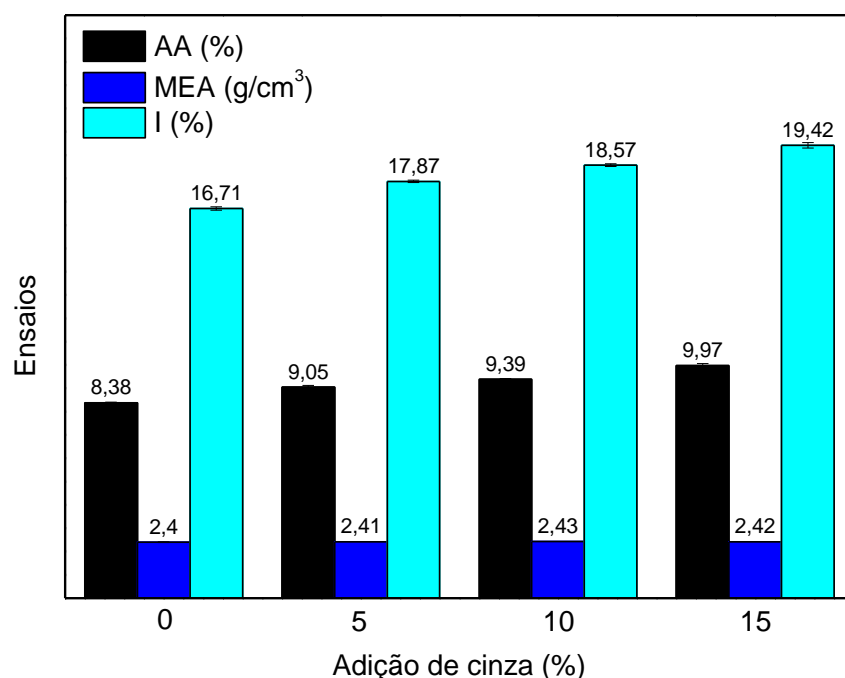
NBR 9778:2009 - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Valores Médios						
Amostra	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Absorção de água AA (%)	Desvio padrão	Índice de vazios IV (%)	Desvio padrão
0%	2,40	0,0051	8,38	0,0276	16,71	0,0707
5%	2,41	0,0020	9,05	0,0766	17,87	0,0464
10%	2,43	0,0024	9,39	0,0186	18,57	0,0614
15%	2,42	0,0009	9,97	0,0890	19,42	0,1148

Fonte: O autor (2022).

Os valores mostrados na Tabela 16, foram obtidos pela média entre as cinco amostras. Observa-se que a massa específica real da amostra de referência (0%) foi de 2,40 g/cm<sup>3</sup>, o índice de vazios de 16,71% e a absorção de água de 8,38%. Com excessão da massa específica aparente que permanece praticamente invariável, as demais propriedades apresentam um ligeiro aumento com a adição da cinza, quando comparadas à amostra padrão, acompanhando o suave aumento do fator a/c.

Segundo um estudo de revisão realizado por Ayobami (2021), o aumento da porosidade dos materiais à base de cimento, produzidos com a incorporação de cinza de madeira, pode ser causado pelas partículas de formato irregular das cinzas que contêm numerosos poros não preenchidos pelos produtos de hidratação após a cura e subsequente endurecimento. Segundo os autores, se a cinza apresentasse tamanho de partículas regulares, com superfície lisa e semelhante à do cimento, ela poderia atuar de forma mais eficiente no preenchimento dos poros, reduzindo, portanto, o índice de vazios. Dessa forma, as propriedades pozolânicas e hidráulicas não poderiam compensar o aumento da porosidade que foi causado pelo aumento da razão a/c à medida que a dosagem de cinza foi aumentada. A Figura 19 mostra graficamente os resultados apresentados na Tabela 15.

Figura 19 - Médias Equivalentes aos Ensaio de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa I).



Fonte: O autor (2022).

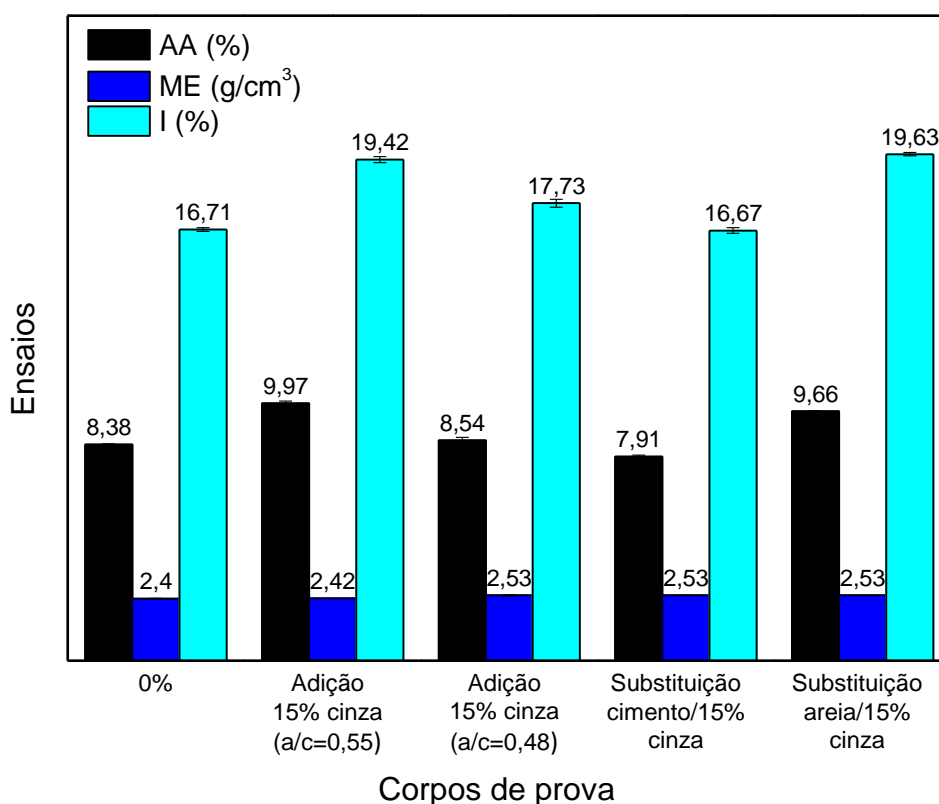
A Tabela 17 mostra os resultados de absorção de água, massa específica e índice de vazios para as amostras preparadas na Etapa II. Da mesma forma, a amostra com adição de 15% de cinza com fator a/c de 0,55 (obtida na Etapa I) foi adicionada para fins de comparação. A Figura 20 mostra estes resultados graficamente.

Tabela 17 - Valores Médios de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa II).

<b>NBR 9778:2009 - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica – Valores médios</b>						
	<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Absorção de água AA (%)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Índice de vazios IV (%)</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>0%</b>	2,40	0,01	8,38	0,03	16,71	0,07
<b>Adição de 15%cinza (a/c = 0,55)</b>	2,42	0,00	9,97	0,09	19,42	0,11
<b>Adição de 15%cinza (a/c = 0,48)</b>	2,53	0,02	8,54	0,11	17,73	0,15
<b>Substituição cimento/15%cinza</b>	2,53	0,01	7,91	0,05	16,67	0,11
<b>Substituição areia/15%cinza</b>	2,53	0,00	9,66	0,02	19,63	0,07

Fonte: O autor (2022).

Figura 20 - Médias Equivalentes aos Ensaio de Massa Específica Real, Absorção de Água e Índice de Vazios (Etapa II).



Fonte: O autor (2022).

Estes resultados mostram, de uma forma geral que, a massa específica apresenta, suavemente, maiores valores para as amostras preparadas na Etapa II. Entretanto, a absorção de água e o índice de vazios não exibem o mesmo comportamento, apresentando variações irregulares, ora aumentando, ora diminuindo. Os destaques para a absorção de água são para a amostra com 15% de adição de cinza ( $a/c = 0,55$ ) que apresentou o maior valor (9,97%) e para a amostra com 15% de substituição do cimento por cinza, cujo valor foi o menor (7,91%). Já para o índice de vazios, o maior valor encontrado foi para a amostra com substituição de areia por 15% de cinza (19,63%), enquanto o menor valor encontrado (16,67%), foi

para a amostra com 15% de substituição do cimento por cinza. Em estudo de substituição do cimento por cinza de biomassa (beneficiamento de cacau), Silva et al (2014), obtiveram valores próximos destes encontrados neste trabalho. Os autores encontraram, como valor de referência 7,89% de absorção de água e com substituição de 5% em massa do cimento, entre 8,95% - 9,20%; no quesito índice de vazios, os autores encontraram 15,73% como referência e em substituição de 5% do cimento, os valores variaram entre 17,25% a 17,60%. Para a massa específica real, o valor de referência foi de 2,15 g/cm<sup>3</sup>, e em substituição do cimento, os resultados variaram entre 2,08 a 2,11 g/cm<sup>3</sup>.

Os resultados encontrados neste trabalho podem estar associados ao empacotamento das partículas da cinza, ocupando espaços diferentes de acordo com sua incorporação na matriz, participando do chamado efeito fíler. O efeito fíler tem como característica quando as partículas finas que preenchem o espaço vazio entre os grãos de cimento modificando seu empacotamento granular, o que implica em uma alteração da porosidade inicial da pasta. Este efeito pode modificar a demanda de água necessária para manter uma trabalhabilidade, dada a granulometria e a proporção de adições (Cyr, 2006).

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a incorporação de cinza proveniente da queima do eucalipto em matriz cimentícia para argamassa. Os resultados mostraram que a cinza contém alto percentual de sílica na forma cristalina e não contribui com atividade pozolânica, segundo ensaio realizado em concordância com normas brasileiras. Apesar destes resultados preliminares, a cinza foi incorporada à matriz de argamassa de formas distintas, incluindo variação de seu percentual com variação do fator a/c, e também, em substituição do cimento ou da areia na matriz. Os corpos de prova, produzidos com as diferentes condições de incorporação da cinza, foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, massa específica real, absorção de água e índice de vazios, em concordância com as normas brasileiras vigentes. Os resultados destes ensaios mostraram, de uma forma geral, que os valores de resistência mecânica aumentam com o tempo de cura e com o aumento do fator a/c. Para a idade de 28 dias, sugerida para teste segundo as normas brasileiras, a incorporação da cinza, seja adicionada à matriz, seja substituindo o cimento ou a areia em 15 % em massa, melhora suavemente a resistência à compressão, porém, varia ligeiramente os resultados de massa específica, absorção e índice de vazios. Estes resultados sugerem que, embora a cinza não apresente características pozolânicas, suas partículas podem atuar no preenchimento de poros entre os agregados e o cimento, que compõem a matriz, participando do efeito filler. Em outras palavras, as partículas de cinza integrada à matriz, possivelmente contribuíram ao lado do processo de hidratação do cimento, auxiliando o desempenho mecânico da argamassa. Com estes resultados, conclui-se que a cinza proveniente

da queima do eucalipto pode ser adicionada e/ou incorporada em substituição de agregados em uma argamassa até o valor limite estudado – 15% em massa. A argamassa contendo até 15% em massa da cinza pode, portanto, ser utilizada para uso comum em obras tradicionais, como por exemplo, reboco, contrapiso, concreto convencional e laje, ou qualquer aplicação que exija os parâmetros de resistência para este tipo de argamassa.

## REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: NBR 7215**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento: NBR 12655**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: NBR 5752**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos – Requisitos: NBR 12653**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.

Ayobami, A.B. **Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview**. Resources, Conservation & Recycling, 166, p.105351, 2021.

BONFIM, W. B.; PAULA, H. M. **Characterization of diferente biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar**. Journal of cleaner production, 2021.

CARASEK, H. Argamassas. In: Isaia, G.C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

CHEAH, C. B., & RAMLI, M. **The implementation of wood waste ash as a partial cementreplacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview**. Resources, Conservation and Recycling, 55(7), 669-685, 2011.

CINCOTTO, M. A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil.** In: Tecnologia de Edificações. São Paulo. Pini / IPT, 1988.

Cyr, M., Lawrence, P., Ringot, E., 2006. **Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength.** Cem. Concr. Res. 36, 264–277.

DUARTE, J. B., **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por pó de pedra em concreto de cimento Portland.** Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

FRANÇA, D. F. S; et al. **Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 153-166, jul./set. 2016.

FREITAS, F.A.E., **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens.** Tese de mestrado, Universidade Federal de Campinas, 2001.

FOELKEL, C. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto. Parte 05: Resíduos Minerais.** 2011

GLUITZ, A.C e MARAFÃO, d. **Utilização da cinza de madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013. Disponível em:

<  
[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15272/2/PB\\_COQUI\\_2013\\_1\\_03.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15272/2/PB_COQUI_2013_1_03.pdf) >>. Acessado em: 13/07/2022.

JAWED, I., et al. Hydratations of Portland cement. In: BARNES, P. (Ed.). **Structure and Performance of Cement.** Essex: Applied Science Publishers, 1983. P. 237-318.

JOHN, V. M; et al. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: **Tecnologias e materiais alternativos de construção** / W. J. Freire, A. L. Beraldo (coord.) – Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003.

KADRI, E. H; DUVAL, R. Effect of ultrafine particles on heat of hydration of cement mortars. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 138-142, 2002. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/279901329\\_Effect\\_of\\_ultrafine\\_particles\\_on\\_heat\\_of\\_hydration\\_of\\_cement\\_mortars](https://www.researchgate.net/publication/279901329_Effect_of_ultrafine_particles_on_heat_of_hydration_of_cement_mortars)>>. Acessado em: 15 de outubro de 2019.

KATTAR, J.E. e ALMEIDA, N.J. **Cimento Portland.** Publicação da Holdercim do Brasil. São Paulo. 1999.

Le Blond, J.S., Horwell, C.J., Williamson, B.J., **Oppenheimer, C. Generation of crystalline silica from sugarcane burning.** Journal of Environmental Monitoring, v. 12, p.1459-70, 2010.

MARQUES, M. L.; et al. Potencialidades do uso de resíduos de celulose (DREGS/GRITS) como agregado em argamassas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, 16, 4, 423-431, 2014.

MEHTA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI. São Paulo, 1994.

NASCIMENTO, J.E.F. et al. **Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland**. *Cerâmica*. v.65. p. 85-91. 2019. Disponível em:  
<[www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132019000100085&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132019000100085&tlng=pt)>. Acessado em 22 de maio de 2022.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição. Editora PINI. São Paulo. 1997.

PASQUEL, C. E. **Tópicos del tecnologia del concreto**. 2ª. Ed. Cochabamba: Serrano, 1996.

PAULA, M, O de., **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, 2006. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.

PERUZZI, A, P de., **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. Dissertação de Mestrado, 2002. Universidade São Paulo. São Paulo.

PFEIL, W. **Concreto armado**. Rio de Janeiro – RJ. LTC – Livros técnicos e científicos editora. Cap. 1, conceitos gerais. p. 1., 1985.

PINEDA, T.; et al. Biotransformação da cinza da casca de arroz em nanopartículas de sílica mediante *Fusarium Oxysporum*. **Revista Matéria**, 17, 1, 946-954, 2012.

QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – estudo em pasta**. 2008. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

RESENDE, D.S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. Tese de Doutorado, 2013. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

SIMÕES, B. B. **Avaliação das cinzas de carvão de Candiota/RS como material suplementar para o cimento Portland do tipo II**. Dissertação de Mestrado, 2020. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

SILVA, E. J., et al. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista**

eletrônica em **Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental.**  
Bahia, 2012. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/271104070\\_APLICACAO\\_DE\\_FIBRA\\_DE\\_COCO\\_EM\\_MATRIZES\\_CIMENTICIAS](https://www.researchgate.net/publication/271104070_APLICACAO_DE_FIBRA_DE_COCO_EM_MATRIZES_CIMENTICIAS)>Acessado em: 14 de setembro de 2019.

SILVA, R. B., et al (2014). Caracterização de cinzas de biomassa geradas na produção de energia e avaliação do seu uso em argamassas. **Congresso Luso- Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis** 5, 6 e 7 de março de 2014. Guimarães, Portugal.

**SILVA, R. B., et al** 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, J.; Brito, J. **Avaliação do comportamento à água de argamassa com incorporação de agregados cerâmicos.** Engenharia Civil UM, 28, p. 37-44, 2007

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2. Ed. London: Thomas Telford, 1998. 459p.  
TEZUKA, I. **Concreto armado com fibras.** ABCP. São Paulo, 1989.

UDOEYO, F. and Dashibil, P. **Sawdust Ash as Concrete Material.** J. Material Civil Engineering, 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(173), 173-176, 2002.

UDOEYO, U.F., Iron, U.H. and Odion, O.O. **Strength Performance of Laterized Concrete.** Construction and Building Materials. 20(10): 1057-1062, 2006.

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.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em:  
<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75712/000883246.pdf?sequence=1>>> Acessado em: 13 de julho de 2022.

Vassilev, S.V.; Baxter, D.; Andersen, L.K.; Vassileva, C.G. **An overview of the chemical composition of biomass.** Fuel, 89, p.913-933, 2010.