

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**DANIEL UKUESSUNGA BENJAMIM**

**NOVO AGLOMERANTE POZOLÂNICO A PARTIR DA ARGILA CALCINADA E  
FOLHA DE BAMBU**

Ilha Solteira  
2021



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DANIEL UKUESSUNGA BENJAMIM**

**NOVO AGLOMERANTE POZOLÂNICO A PARTIR DA ARGILA CALCINADA E  
FOLHA DE BAMBU**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira – Universidade  
Estadual Paulista para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil.

Área de conhecimento: Estrutura

**Orientador: Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi  
Tashima**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B468n Benjamim, Daniel Ukuessunga.  
Novo aglomerante pozolânico a partir da argila calcinada e folha de bambu  
/ Daniel Ukuessunga Benjamim. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021  
82 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estrutura, 2021

Orientador: Mauro Mitsuuchi Tashima  
Inclui bibliografia

1. Pozolana. 2. Cinza de folha de bambu. 3. Argila calcinada. 4. Blocos  
combustíveis. 5. Biomassas.

*Rafael da Silva Santos*  
Rafael da Silva Santos

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: NOVO AGLOMERANTE POZOLÂNICO A PARTIR DA ARGILA  
CALCINADA E FOLHA DE BAMBU

**AUTOR: DANIEL UKUESSUNGA BENJAMIM**

**ORIENTADOR: MAURO MITSUUCHI TASHIMA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em  
ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

A handwritten signature in black ink that reads "mauro m. Tashima".

Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ALEX OTÁVIO SANCHES (Participação Virtual)

Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. AMIN NAZER (Participação Virtual)

Departamento de Construcción / Universidad de Atacama - Chile

Ilha Solteira, 29 de abril de 2021

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado à minha querida mãe Joaquina Chiaquissa Cangongo, à minhas irmãs, familiares em geral, e meus amigos. Pois, suas forças foram essenciais para a culminação desta etapa da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus todo poderoso, endereço minhas profundas gratidões pelo fôlego de vida, por permitir que cá chegasse, por nunca me desamparar mesmo quando longe e sozinho sentia-me, seu amor me conforta.

Ao meu pai Benjamim, assim como a fé que tenho pela divindade, sei que estás sempre comigo, como meu anjo da guarda, amo-te por sentir sua presença em toda minha vida.

À minha mãe Joaquina Ch. Cangongo, pela vida, pelos ensinamentos, e por fazer-me ser por intermédio do seu reflexo o que hoje sou, o meu amor por ti é infinito, por ti daria todas as vidas que tivesse.

À minhas irmãs, só nós sabemos onde passamos, e hoje às ver sorrir, encham meu coração de alegria e satisfação, vontade de voar cada vez mais alto, é bom vos ter.

Aos meus familiares em geral, agradeço imenso por tudo que fazem por mim, muita coisa não teria conseguido se não fosse por vós, e nem sempre saberemos verdadeiramente reconhecer, Deus retribui a cada um de vós o dobro.

À Helena José, por ceder parte de si, parte de sua vida e fazer minhas emoções flutuarem, companheirismos, força, apoio, estímulo e cumplicidade, muito obrigado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauro Mitsuuchi Tashima, por ter me recebido e guiado sabiamente, pelos ensinamento, simplicidade e humildade, por depositar confiança em mim mesmo vindo de uma formação de base diferente, muito grato por me transformar.

Ao Prof. Dr. José Luiz Pinheiro Melges, por tratar sabia e pacientemente meu processo para chegar aqui na UNESP de Ilha Solteira, por me receber, me instalar, e por me dar todas as diretrizes acadêmicas e não só, jamais me esquecerei daquele abraço e sorriso de boas vinda na rodovia, junto ao Prof. Dr. Sérgio Kurokawa, que me proporcionou o primeiro roteiro pela cidade e ajuda no processo de instalação aqui em Ilha Solteira

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, por permitir a minha inserção no grupo de pesquisa materiais alternativos de construção - MAC, por receber-me carinhosamente, e pelos ensinamentos.

Aos meus colegas e amigos, Gabriela, Gean, Sherington, Renan, Rodrigo, Letícia, João, Felipe, Marcelo, Alan, Luíza, por receberem-me tão bem desde o início e terem ajudando-me em todas as dificuldades a qual deparei-me, levar-vos-ei na jornada da minha vida.

Ao meu amigo José Carlos de Oliveira, grande companheiro, muito obrigado por fazer-me viver nessa Cidade, por mostrar-me o quão grande e lindo esse Brasil, pelos conselhos, pelos ensinamentos de vida, pela partilha, pelo apoio e força, pela diversão, a ti vai uma gratidão muito especial, o poder da amizade teve influência muito significativa em mim.

Aos meus amigos em Angola, que sentiram minha falta e vice-versa, porém sempre mandaram energia positiva para que tudo corresse bem.

Agradeço à UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” - UNESP, especialmente ao departamento de Engenharia Civil do câmpus de Ilha Solteira.

Aos técnicos do Laboratório Central de Engenharia Civil, especialmente Gilson, Flávio, Osias e Mário, pelo apoio e acolhimento durante esse período.

Ao INSTITUTO NACIONAL DE GESTÃO DE BOLSA DE ESTUDO DE ANGOLA – INAGBE, pelo apoio financeiro, por conceder que tudo isso fosse possível, pois graças a vós, o que ontem foi sonho, hoje é realidade, muito grato por tudo.

Uma gratidão extensiva a todos quanto direta ou indiretamente tiveram participação nessa etapa da vida, muito obrigado.

“Tudo posso naquele que me fortalece, pois, ainda que eu transborde para o mais longínquo, sozinho nunca estarei, guias-me mesmo de olhos vendados, a ti pertenco, pois, pela tua graça vivo”

## RESUMO

A cinza da folha de bambu e argila calcinada (CFBA), surge como um aglomerante pozzolânico, com finalidade de possibilidade de substituir parcialmente em até 50% em massa o cimento Portland em matrizes cimentícias. Foi desenvolvido a partir da folha de bambu e argila, que haviam já sido caracterizados em estudos anteriores com alto teor de reatividade pozzolânica. A combinação destes dois materiais proporcionou vantagens satisfatórias, pois, além da fusão de duas fontes pozzolânicas, a folha de bambu serviu de combustível no processo de calcinação de ambos materiais, com temperatura máxima de 713 °C. Neste estudo foram produzidas argamassas com níveis de substituição de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% do cimento Portland pela cinza da folha de bambu e argila calcinada, com o propósito de avaliar o índice de consistência, índice de desempenho, resistência mecânica, absorção de água por imersão, capilaridade, massas específicas e resistência ao fogo. Foram de igual modo produzidas pastas de Cimento/CFBA nas proporções de 0%, 20% e 40% para determinar a microestrutura dos produtos hidratados por meio de análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, bem como foi coletada certa quantidade de CFBA para análise de DRX para determinar a estrutura amorfa do material. Assim, com base nos resultados obtidos, a inserção da cinza da folha de bambu e argila calcinada em matrizes cimentícias, mostraram ser uma boa alternativa para substituir o cimento Portland e mitigar os impactos causados pela produção do cimento.

**Palavras chaves:** Pozzolâna. Cinza de folha de bambu. Argila calcinada. Blocos combustíveis. Biomassas.

## **ABSTRACT**

Ash from bamboo leaf and calcined clay (CFBA), appears as a pozzolanic binder, with the purpose of partially replacing Portland cement in cementitious matrices by up to 50% by mass. It was developed from bamboo and clay leaves, which had already been characterized in previous studies with a high content of pozzolanic reactivity. The combination of these two materials provided satisfactory advantages, because, in addition to the fusion of two pozzolanic sources, the bamboo leaf served as fuel in the calcination process of both materials, with a maximum temperature of 713 °C. In this study, mortars were produced with substitution levels of 0%, 10%, 20%, 30, 40% and 50% of Portland cement by ash from the bamboo leaf and calcined clay, with the purpose of evaluating the consistency index, performance index, mechanical resistance, water absorption by immersion, capillarity, specific dry mass and fire resistance. Cement/CFBA pastes were also produced in the proportions of 0%, 20% and 40% to determine the microstructure of hydrated products by scanning electron microscopy analysis. And XRD analysis to CFBA to determine the amorphous structure of the material. Thus, based on the results obtained, the insertion of ash from the bamboo leaf and calcined clay in cementitious matrices, proved to be a good alternative to replace Portland cement and mitigate the impacts caused by cement production.

**Keywords:** Pozzolan. Bamboo leaf ash. Calcined clay. Combustible blocks. Biomass.

## LISTA DE FIGURAS

---

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1 - PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....                                                                                                                              | 19 |
| FIGURA 2 - VENDA DE CIMENTO NO 1º SEMESTRE DE 2020 .....                                                                                                                              | 25 |
| FIGURA 3 - IMAGEM DE MEV DA CINZA DA CASCA DE ARROZ .....                                                                                                                             | 30 |
| FIGURA 4 - IMAGEM DE MEV DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU, A-) SEM MOER; B-) 50 MINUTOS DE MOAGEM .....                                                                                     | 32 |
| FIGURA 5 - IMAGEM DE MEV DA ARGILA CALCINADA.....                                                                                                                                     | 33 |
| FIGURA 6 - TEMPO DE AUTO CALCINAÇÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR E ARGILA .....                                                                                                        | 35 |
| FIGURA 7 - IMAGEM DE MEV DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ARGILA SEM MOAGEM(A) E 50 MINUTOS DE MOAGEM (B). .....                                                                | 35 |
| FIGURA 8 - BLOCO COMBUSTÍVEL.....                                                                                                                                                     | 37 |
| FIGURA 9 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....                                                                                                                                         | 40 |
| FIGURA 10 - PRENSA DE SOLO CIMENTO .....                                                                                                                                              | 42 |
| FIGURA 11 - PENEIRAS UTILIZADAS PARA A SEPARAÇÃO E COLETA DO MATERIAL .....                                                                                                           | 43 |
| FIGURA 12 - MOINHO DE ESFERA E SUAS RESPECTIVAS ESFERAS.....                                                                                                                          | 44 |
| FIGURA 13 - ARGAMASSADEIRA INDUSTRIAL .....                                                                                                                                           | 45 |
| FIGURA 14 - MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIO EMIC - INSTRON.....                                                                                                                           | 46 |
| FIGURA 15 - FLUXOGRAMA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA .....                                                                                                                           | 47 |
| FIGURA 16 - PROCESSO DE SECAGEM DA ARGILA À CÉU ABERTO.....                                                                                                                           | 49 |
| FIGURA 17 - PROCESSO DE CONFECÇÃO DE BLOCOS COMBUSTÍVEIS .....                                                                                                                        | 50 |
| FIGURA 18 - MOLDAGEM DAS PASTA.....                                                                                                                                                   | 52 |
| FIGURA 19 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....                                                                                                                                             | 54 |
| FIGURA 20 - CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....                                                                                                                                        | 58 |
| FIGURA 21 - ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....                                                                                                                                     | 59 |
| FIGURA 22 - CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS EM ESTUFA À TEMPERATURA DE $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ ..                                                                                      | 64 |
| FIGURA 23 - CORPOS DE PROVA IMERSOS.....                                                                                                                                              | 64 |
| FIGURA 24 - CORPOS DE PROVA EM ESTUFAS $105^{\circ}\text{C}$ .....                                                                                                                    | 66 |
| FIGURA 25 - CORPOS DE PROVAS SUBMETIDOS NA MÚFLA À $600^{\circ}\text{C}$ .....                                                                                                        | 67 |
| FIGURA 26 - DIFRATOGRAMA DE RAIOS - X DA AMOSTRA DE CFBA .....                                                                                                                        | 69 |
| FIGURA 27 - IMAGENS DE MEV DA PASTA DE CPO+CFBA: A) CONTROLE, 28 DIAS; B) CONTROLE, 90 DIAS; C) 20%CFBA, 28 DIAS; D) 20%CFBA, 90 DIAS; E) 40%CFBA, 28 DIAS; F) 40%CFBA, 90 DIAS ..... | 71 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 28 - DIÂMETRO DE ABERTURA DAS ARGAMASSAS OBTIDO PELO ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....                                     | 72 |
| FIGURA 29 - MASSA DOS CORPOS DE PROVA POR TEOR DE SUBSTITUIÇÃO (G) .....                                                    | 73 |
| FIGURA 30 - DETERMINAÇÃO DE ÍNDICE DE DESEMPENHO DE MATERIAIS POZOLÂNICOS COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS (NBR 5752) ..... | 74 |
| FIGURA 31 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS DE CFBA EM SUBSTITUIÇÃO EM ATÉ 50% DO CP-V .....                  | 76 |
| FIGURA 32 - GANHO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSA .....                                                     | 78 |
| FIGURA 33 - % DE PERDA DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA APÓS SUBMETIDOS A 600 °C E 800 °C.....                                  | 85 |
| FIGURA 34 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A DOS CORPOS DE PROVAS SUBMETIDOS À TEMPERATURA NATURAL, 600 °C E 800 °C.....          | 86 |

## LISTA DE TABELAS

---

|                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 - PROGRAMAÇÃO DE ENSAIOS .....                                                                                                                                                                         | 38 |
| TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO PORTLAND V ARI, CP II-F .....                                                                                                                                      | 39 |
| TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO .....                                                                                                                                                      | 40 |
| TABELA 4 - ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE .....                                                                                                                                                                     | 41 |
| TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU E ARGILA BRUTA (%)<br>.....                                                                                                                        | 48 |
| TABELA 6 - DOSAGEM DAS PASTAS .....                                                                                                                                                                             | 52 |
| TABELA 7 - DOSAGEM DA ARGAMASSA, CPO:CFBA (4 x 4 x 16 cm) COM ADIÇÃO DE<br>SUPERPLASTIFICANTE, PARA ENSAIO DE ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA, ÍNDICE DE ATIVIDADES<br>RESISTENTE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL. .... | 56 |
| TABELA 8 - DOSAGEM DE ARGAMASSA PARA ENSAIOS DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIO,<br>MASSA ESPECÍFICAS, ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E RESISTÊNCIA AO FOGO.<br>.....                                      | 56 |
| TABELA 9 - PROCEDIMENTO DE CONFECCÃO DAS ARGAMASSAS .....                                                                                                                                                       | 57 |
| TABELA 10 - DOSAGEM DA ARGAMASSA DO ÍNDICE DE DESEMPENHO (NBR 7215).....                                                                                                                                        | 61 |
| TABELA 11 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS DE CP-V COM<br>SUBSTITUIÇÃO EM ATÉ 50% POR CFBA.....                                                                                                  | 75 |
| TABELA 12 - GANHO DE RESISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS POR SUBSTITUIÇÃO EM FUNÇÃO DO<br>TEMPO .....                                                                                                                    | 77 |
| TABELA 13 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO EXPRESSO EM (%) .....                                                                                                                                                  | 79 |
| TABELA 14 - ÍNDICE DE VAZIO (%) .....                                                                                                                                                                           | 80 |
| TABELA 15 - MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA (G/CM <sup>3</sup> ) .....                                                                                                                                         | 81 |
| TABELA 16 - MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA (G/CM <sup>3</sup> ).....                                                                                                                                      | 81 |
| TABELA 17 - MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA REAL (G/CM <sup>3</sup> ).....                                                                                                                                          | 82 |
| TABELA 18 - ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE (G/CM <sup>2</sup> ) .....                                                                                                                                        | 83 |
| TABELA 19 - MASSA DOS CORPOS DE PROVA (G) ANTES E DEPOIS DE SEREM SUBMETIDOS À<br>600°C DE TEMPERATURA POR DUAS HORAS .....                                                                                     | 84 |
| TABELA 20 - MASSA DOS CORPOS DE PROVA (G) ANTES E DEPOIS DE SEREM SUBMETIDOS À<br>800°C DE TEMPERATURA POR DUAS HORAS .....                                                                                     | 84 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

---

|       |                                                                                                 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                        |
| STBD  | Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação                                                    |
| UNESP | Universidade Estadual Paulista                                                                  |
| CFBA  | Cinza de folha de bambu e argila calcinada                                                      |
| NBR   | Norma Brasileira e Regulamentadora                                                              |
| MEV   | Microscopia Eletrônica de Varredura                                                             |
| TGA   | Análise Termogravimétrica                                                                       |
| FTEL  | Espetroscopia fotoeletrônica por transformada de Fourier                                        |
| DRX   | Difração de raio-X                                                                              |
| ASTM  | <i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais) |
| FEIS  | Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira                                                        |
| PPGEC | Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil                                                   |
| PCA   | Portland Cement Association                                                                     |
| FRX   | Fluorescência de raios-X                                                                        |
| CPO   | Cimento Portland comum                                                                          |

## SUMÁRIO

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>                                                                  | <b>11</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                                                  | <b>13</b> |
| <b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>                                                    | <b>14</b> |
| <b>SUMÁRIO .....</b>                                                                           | <b>15</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                      | <b>18</b> |
| <b>2 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....</b>                                                     | <b>22</b> |
| <b>3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....</b>                                                         | <b>23</b> |
| 3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                | 23        |
| <b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                            | <b>24</b> |
| 4.1 CIMENTO PORTLAND .....                                                                     | 24        |
| 4.1.1 Definição .....                                                                          | 24        |
| 4.2 ADIÇÕES MINERAIS .....                                                                     | 29        |
| 4.2.1 Definição .....                                                                          | 29        |
| 4.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS.....                                                                 | 29        |
| 4.3.1 Definição .....                                                                          | 29        |
| 4.4 CINZA DA FOLHA DE BAMBU.....                                                               | 31        |
| 4.5 ARGILA CALCINADA .....                                                                     | 32        |
| 4.5.1 Definição .....                                                                          | 32        |
| 4.5.2 Utilizações de argila calcinada como material pozolânico em<br>matrizes cimentícias..... | 32        |
| 4.5.3 Argamassas de sistemas ternários de argilas calcinadas e<br>outras pozolanas.....        | 34        |
| 4.6 BLOCO COMBUSTÍVEL .....                                                                    | 36        |
| 4.6.1 Definição .....                                                                          | 36        |
| <b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>                                                            | <b>38</b> |
| 5.1 MATERIAIS.....                                                                             | 39        |
| 5.1.1 Cimento Portland.....                                                                    | 39        |
| 5.1.2 Água de amassamento.....                                                                 | 39        |

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.3. Agregado Miúdo .....                                                                                 | 40        |
| 5.1.4 Argila caulinita .....                                                                                | 41        |
| 5.1.5 Biomassa (folha de bambu).....                                                                        | 41        |
| 5.1.6 Superplastificante .....                                                                              | 41        |
| 5.2 EQUIPAMENTOS .....                                                                                      | 42        |
| 5.2.1 Prensa de solo cimento .....                                                                          | 42        |
| 5.2.2 Forno de combustão.....                                                                               | 42        |
| 5.2.3 Peneiras .....                                                                                        | 43        |
| 5.2.4 Moinho de esferas metálicas.....                                                                      | 43        |
| 5.2.5 Microscópio eletrônico de varredura .....                                                             | 44        |
| 5.2.6 Difrátômetro de raio-X .....                                                                          | 44        |
| 5.2.7 Argamassadeira industrial.....                                                                        | 45        |
| 5.2.8 Máquina universal de ensaio.....                                                                      | 45        |
| 5.2.9 Outros equipamentos .....                                                                             | 46        |
| 5.3 METODOLOGIA .....                                                                                       | 46        |
| 5.3.1 Produção da cinza da folha de bambu e argila calcinada .....                                          | 48        |
| 5.3.2 Caracterização físico-química da CFBA.....                                                            | 51        |
| 5.3.3 Estudo da aplicação CFBA em pasta de cimento .....                                                    | 51        |
| 5.3.4 Estudo da aplicação CFBA em argamassas de cimento.....                                                | 54        |
| <b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                       | <b>68</b> |
| 6.1 CARACTERIZAÇÃO DA CFBA POR MEIO DE DRX .....                                                            | 68        |
| 6.1.2 Difração de raio-X .....                                                                              | 68        |
| 6.2 ESTUDO MICROESTRUTURAL DE PASTAS DE CFBA + CIMENTO.....                                                 | 69        |
| 6.2.1 Microscopia eletrônica de varredura .....                                                             | 69        |
| 6.3 ESTUDO DE ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS DE CFBA<br>+ CIMENTO COM SUPERPLASTIFICANTE ..... | 72        |
| 6.3.1 Ensaio de índice de consistência .....                                                                | 72        |
| 6.3.2 Determinação do índice de desempenho pozolânico da CFBA.....                                          | 73        |
| 6.3.3 Resistência mecânica das argamassas de CFBA e cimento ...                                             | 74        |
| 6.4 ESTUDO DE ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS DE CFBA<br>+ CIMENTO SEM SUPERPLASTIFICANTE ..... | 79        |
| 6.4.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios, e massa<br>específica .....                       | 79        |

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| 6.4.2    | <i>Absorção de água por capilaridade</i> ..... | 82        |
| 6.4.3    | <i>Resistência ao fogo</i> .....               | 83        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....                        | <b>87</b> |
| 7.1      | CONCLUSÕES .....                               | 87        |
| 7.2      | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....     | 88        |

## 1 INTRODUÇÃO

---

Com o crescimento populacional, as necessidades primárias do homem, nomeadamente a habitação, tornam-se cada vez mais gradativas. Fato este que leva a indústria da construção civil a desafiar-se dia após dia.

O cimento é o maior produto manufaturado da terra em produção massiva (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018a). É o segundo produto mais usado no mundo depois da água, esses materiais compõem uma proporção substancial do ambiente construtivo (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018a).

Atualmente, o consumo do cimento Portland é de cerca de 4,6 bilhões de toneladas por ano, e espera-se que atinja aproximadamente 6 bilhões de toneladas até o final de 2050 (BHAGATH SINGH; SUBRAMANIAM, 2019).

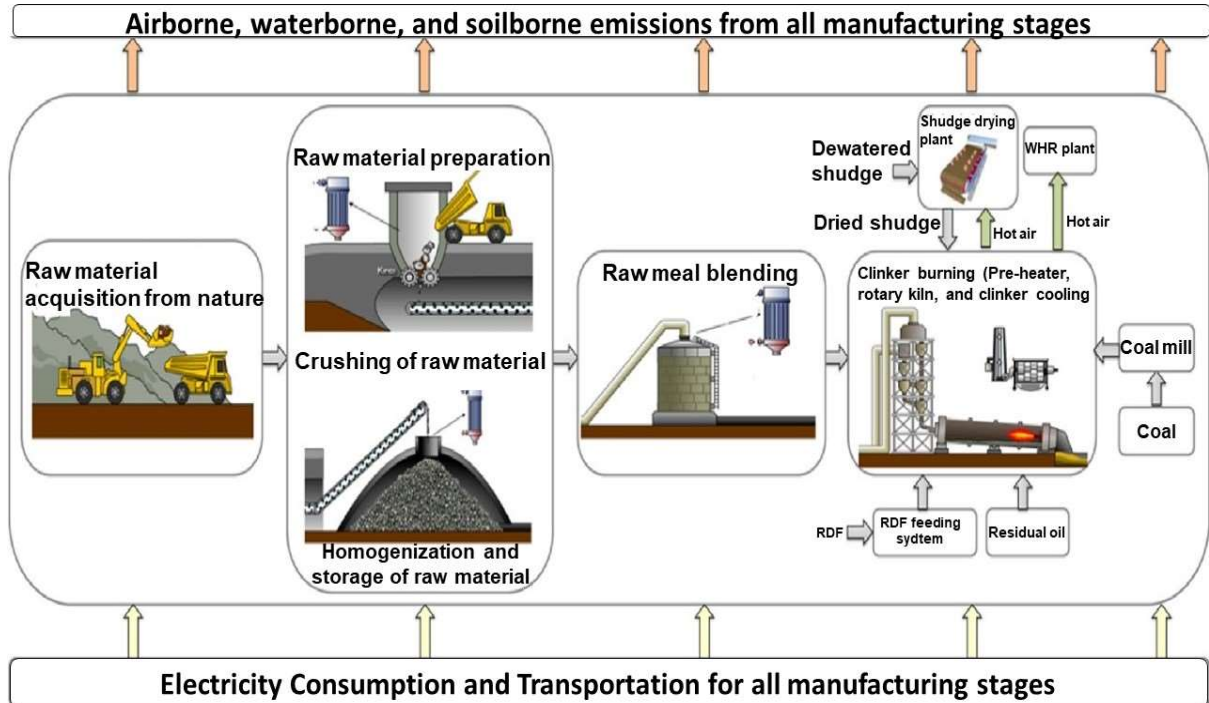
O cimento Portland é o mais consumido no mundo, e é composto essencialmente por 95% de clínquer. A demanda de países em rápido e constante desenvolvimento faz com que a sua produção seja cada vez mais acelerada e com qualidade mais baixa (BHAGATH SINGH; SUBRAMANIAM, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018b).

A produção do Cimento Portland é responsável por altos níveis de emissão de dióxido de carbono na atmosfera. A produção de uma tonelada deste material, gera 0,9 tonelada de dióxido de carbono, no qual é responsável por cerca de 7% da emissão de dióxido de carbono global (MORAES et al., 2019). A produção do cimento Portland consome grandes quantidades de matérias-primas, a qual contribui significativamente para a degradação do meio ambiente, embora haja abundância de matéria primas, a sua exploração tem que ser criteriosa, para que no futuro não ocorra escassez de matérias-primas (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018b).

Fato relevante no processo de produção do cimento Portland, remete-se ao alto grau de consumo de energia, especialmente no que diz respeito à energia necessária para a produção do clínquer, a mesma representa 20% a 40% do custo total da produção do cimento. São necessárias cerca de 4427MJ (BOESCH; KOEHLER; HELLWEG, 2009), para produção de uma tonelada de clínquer, dos quais oriundos da queima de 50% de carvão, 22% de resíduo pet, 1% de gás natural, 11% de resíduos industriais, 13% de combustíveis derivado de lixo, 1% de resíduos de

borrachas e 2% de pneus (BOESCH; KOEHLER; HELLWEG, 2009). A Figura 1 ilustra o processo de produção do cimento Portland.

Figura 1 - Processo de produção do cimento Portland



Fonte: (ÇANKAYA; PEKEY, 2020)

Com base nestes pressupostos, pesquisadores estão empenhados no desenvolvimento de novas fontes de matérias a fim de obter materiais cimentícios ambientalmente mais ecológicos e economicamente mais viáveis e sustentáveis a partir de biomassas e resíduos agroindustriais, com finalidade de mitigar os impactos ambientais oriundo da produção do cimento Portland.

Neste contexto, destaca-se os materiais pozolânicos, caracterizado como produtos alternativos de construção.

Os materiais pozolânicos, são materiais siliciosos e ou aluminosos, que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando finamente moído, no estado amorfo na presença de água ou umidade, reagem quimicamente com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formam compostos com propriedades cimentícias. As cinzas vulcânicas, argila calcinadas, cinzas de casca de arroz, cinza volante e sílica ativa são algumas pozolâneas comumente utilizadas (VAF AEI; ALLAHVERDI, 2016; SABIR; WILD; BAI, 2001). Os estudos relativamente à aplicação de pozolâna tornam-se interessantes tendo em contas as inúmeras vantagens manifestadas em matrizes de cimento com a utilização destes materiais,

com significância relevante na contribuição à resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e reologia (VICENTINI, 2018), reduções no aumento de temperatura, embora em alguns casos as pozolâneas se desenvolvem mais lentamente (SABIR; WILD; BAI, 2001).

As argilas calcinadas derivadas das argilas cauliníticas, argilas esmectíticas e argilas ilíticas são pozolâneas que se destacam neste desenvolvimento. O processo de calcinação, bem como a sua etimologia, refere-se ao processo de queima em uma determinada temperatura e devidamente controlada, pois a argila está em seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação leva a perda de hidroxilas. A temperatura de calcinação que produz um estado ativo amorfo está na faixa de 600 a 800 °C (SABIR; WILD; BAI, 2001), acima dos 850 °C ocorre uma cristalização, o que prejudica a reatividade do material com o cimento Portland.

(DWIVEDI et al., 2006) utilizaram a técnica de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e relataram que a cinza de folha de bambu é um material pozolânico eficaz quando misturado com hidróxido de cálcio (CH) em testes por aproximadamente 4h de reação utilizando técnicas de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Conclusões semelhantes foram observadas por (SINGH et al., 2007) em mistura de cinzas de folha de bambu com cimento Portland, concluindo que a cinza de folha de bambu é um material pozolânico eficaz. (VILLAR-COCIÑA et al., 2011), e (MORAES, 2019) realçam de igual modo a eficácia da cinza da folha de bambu como ótima pozolâna.

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Tornar a sustentabilidade como maior percussor da restauração do meio ambiente pode ser considerado como um dever cívico. Isto deve ser feito de forma conjuntural, inclusiva, por todas as nações e áreas do saber, sendo assim, a cinza da folha de bambu e argila calcinada (CFBA) surge como um contributo nesta empreitada.

Como já abordado, uma das soluções para mitigar a problemática causado pela produção do cimento Portland, é a opção pela substituição parcial ou total por materiais pozolânicos, derivada de atividades antropogênicas, nomeadamente resíduos agroindustriais (MORAES, 2019), pois é de conhecimento que as pozolâneas

melhoram o comportamento mecânico e durabilidade das matrizes cimentícias, agindo quimicamente e fisicamente.

O bambu destaca-se entre várias espécies de plantas devido à sua versatilidade e rápido crescimento, com a capacidade de crescer em locais degradados. É um recurso natural com múltiplas finalidades (da alimentação à arquitetura) e possui alta capacidade de sequestro de dióxido de carbono. O bambu é encontrado em muitas regiões do mundo, com uma área total estimada em 31,5 milhões de hectares, e cerca de 17,36 milhões de hectares localizados na Ásia. Deste modo, o cultivo do bambu gera uma grande quantidade de um resíduo: a folha de bambu, e a mesma é destinada a queimas em aterros sanitários que geram cinzas foliares de bambu que não têm um objetivo adequado, tornando-se uma fonte de poluição (ARUMUGAM; KARUPPASAMY; JEGADEESAN, 2018; BANNARAVURI; BIRRU, 2018; MORAES et al., 2019).

A argila existe em abundância no meio ambiente, e é utilizada em diversas finalidades, sendo que foi pioneira no processo de construção primitiva, e principalmente na arquitetura vernacular, sendo dessa maneira um pilar na fonte de materiais pozolânicos quando calcinada (MOHAMMED, 2017).

Sendo assim, foram realizadas pesquisas para transformar a folha de bambu juntamente com a argila, em material alternativo sustentável para a indústria da construção civil através de processo de calcinação. Destacam-se pesquisadores como: (DWIVEDI et al., 2006; FRÍAS et al., 2012; ROSELLÓ et al., 2015; SINGH et al., 2007; VILLAR-COCIÑA et al., 2011)(MORAES, 2019) que concluíram que o cinza da folha de bambu apresenta bom comportamento pozolânico e alta reatividade.

## 2 APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

---

A dissertação está dividida em seis capítulos: Introdução, objetivos da dissertação, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e discussões e conclusões.

*Capítulo 1* – Neste capítulo apresentar-se-á a introdução relativamente ao tema abordado.

É aqui onde são apresentadas questões tais como; a problemática da pesquisa, relevância do estudo econômico-social, ambiental e tecnologia, e justificativa do tema investigado;

*Capítulo 2* – Neste capítulo é apresentado o objetivo geral concebido nessa investigação, sequeentemente apresentado os objetivos específicos levados a cabo;

*Capítulo 3* – Destaca-se neste capítulo a revisão bibliográfica, uma abordagem enfatizando os materiais alternativos de construção, adições minerais com pozolânas na produção de compostos cimentícios e blocos combustíveis;

*Capítulo 4* – São aqui apresentados os materiais usados, ferramentas e equipamentos, bem como a metodologia empregada para desenvolver o programa experimental, desde coletas de dados, informações e procedimentos. É aqui onde são apresentados e detalhados a produção da cinza de folha de bambu e argila calcinada, blocos combustíveis de argilas com folha de bambu, igualmente aos ensaios realizados que caracterizam a cinza de folha de bambu e argila calcinada;

*Capítulo 5* – Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e análises dos respectivos dados, tendo em conta as coerências destacadas na bibliografia;

*Capítulo 6* – Apresentar-se-á a conclusão em função dos resultados obtidos. Conclui-se a relevância do emprego da cinza de folha de bambu e argila calcinada em matrizes cimentícias na indústria da construção civil do contemporâneo.

### **3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

---

O objetivo deste estudo foi produzir um novo ligante pozolânico, com finalidade de substituir parcialmente o cimento Portland mediante a utilização de resíduos agroindustriais.

#### **3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Produzir bloco combustível de folha de bambu e argila, para a autocombustão no processo de calcinação da argila e a folha de bambu;

Produzir cinza de folha de bambu e argila calcinada provenientes do processo de autocombustão dos blocos combustíveis, como material pozolânico alternativo de construção;

Caracterizar a estrutura amorfa da CFBA por meio de ensaio de DRX.

Analisar o processo de hidratação da CFBA em pastas com substituição do cimento Portland por meio de MEV;

Produzir argamassas de cimento Portland com níveis de substituição em até 50% do cimento Portland pela CFBA, e analisar a resistência mecânica e durabilidade.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

### **4.1 CIMENTO PORTLAND**

#### **4.1.1 Definição**

Cimento, são aglomerantes caracterizados por endurecerem pela ação exclusiva da água. Este fenômeno é chamado de hidratação. O cimento Portland e a cal hidráulica, são os principais aglomerantes hidráulicos utilizados na construção civil (TROUT, 2019).

O cimento Portland segundo a (NBR 16697, 2018) é definido como um ligante hidráulico obtido a partir da moagem do clínquer com adição em pequenas proporções de sulfato de cálcio.

Esse material é amplamente utilizado na indústria da construção, sendo o principal constituinte do concreto que é o material mais amplamente empregado entre todos os materiais de construção (MOHAMMED, 2017).

De acordo com Sindicato Nacional da Indústria do cimento, em 2019 as vendas de cimento aumentaram 3,3% referente aos últimos quatros anos. Em abril de 2020, no início da pandemia da COVID-19, registou uma queda nas vendas, porém, em maio e junho do mesmo ano houve um aumento significativo, comparativamente ao ano de 2019, num total de 3,6 % equivalente a 26,9 milhões de toneladas, a Figura 2 ilustra a variação das vendas (SNIC, 2020).

Figura 2 - Venda de cimento no 1º semestre de 2020



Fonte:(SNIC, 2020)

A produção de materiais cimentícios no antigo Egito começou por volta do quarto milénio a.C. Quando a argamassa foi utilizada para alvenaria. A pedra calcária era abundante no vale do Nilo, porém, não havia combustível para atingir temperaturas entre 850°C - 1000°C necessário para a queimar. Deste modo, por essa razão, os antigos egípcios utilizavam gesso impuro ( $\text{CaSO}_4$ ), que formava um hemi-hidrato quando queimado a temperaturas mais baixas que podiam ser facilmente atingidas com pequenos fogos a cerca de 170°C. Os primeiros cimentos egípcios eram então essencialmente gessos de gesso. Os gessos e cimentos à base de gesso teriam tido uma resistência adequada, mas, como teriam sido solúveis em água, a sua durabilidade seria limitada. No clima árido do Egito, contudo, isto não era uma desvantagem na prática e os cimentos deste tipo foram utilizados com sucesso até ao período romano (TROUT, 2019).

A origem do cimento hidráulico remonta à Grécia e Roma antiga. Os materiais constituintes eram cal e cinza vulcânica que reagem lentamente na presença de água para formar uma massa dura, resultando em um material base na produção de argamassas e concretos romanos de 2000 anos atrás e dos trabalhos subsequentes da Europa Ocidental (LEA, 2018).

O cimento Portland é um sucessor de uma cal hidratada que foi desenvolvida pela primeira vez por John Smeaton em 1756. O desenvolvimento seguinte surgiu por volta de 1800 na Inglaterra e na França. No qual um material cimentício foi obtido a partir da queima de nódulos de calcário argiloso. A inovação do cimento Portland remete à Joseph Aspdin de Leeds, Yorkshire, Inglaterra, que em 1824 registou uma patente para um material produzido a partir de uma mistura sintética de calcário e argila. A fabricação do cimento Portland se espalhou rapidamente para outros países europeus, e americanos, durante o século XX. China e Índia se tornaram líderes mundiais na produção do cimento, seguido pelos Estados Unidos, Brasil, Turquia e Irã (LEA, 2018; TROUT, 2019).

Em química do cimento, define-se hidratação como uma reação de um cimento não hidratado ou simplesmente de um dos seus constituintes com a água, a qual está associado mudanças químicas tanto quanto mudanças físicas-mecânicas do sistema em particular, com fixação e endurecimento. O simples fato de o cimento estar exposto a um lugar úmido, já acontece uma hidratação superficial, porém, para uma hidratação completa, é necessária uma certa quantidade suficiente de água. Pois, a proporção mútua de água e cimento na mistura (a/c) também chamado de razão água/sólido (a/s), influencia a reologia da suspensão produzida (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Quimicamente, a hidratação do cimento Portland (PC) consiste em um processo de reações entre os minerais de clínquer, sulfato de cálcio e água, que ocorrem simultaneamente e sucessivamente em taxas diferentes e influenciam-se mutuamente. Os constituintes desse processo são: alita, (silicato tricálcico dopado com íons estrangeiros); belita, (silicato dicálcico dopado com íons estrangeiros); aluminato tricálcico; ferrita de aluminato de cálcio (fase de ferrita) óxido de cálcio livre; sulfatos alcalinos; sulfato de cálcio na forma de dihidrato, hemihidrato ou anidrita fundido com clínquer; mistura de água (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

- $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2, \text{Ca}_3\text{SiO}_5 \rightarrow \text{C}_3\text{S}, (\text{Alita})$
- $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2, \text{Ca}_2\text{SiO}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{S}, (\text{Belita})$
- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \rightarrow \text{C}_3\text{A}, (\text{Celita})$
- $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10} \rightarrow \text{C}_4\text{AF}, (\text{Ferrita})$

O processo de hidratação do cimento Portland é bastante complexo, pois trata-se de sistema de multicomponentes o qual consiste em uma série de reações químicas. Este mesmo processo de hidratação e sua cinética são influenciados por vários fatores: pela composição de fase do cimento; pela presença de íons estrangeiros no interior das grelhas cristalina; pela finura do cimento (distribuição granulométrica e superfície específica); pela relação água-cimento; pela temperatura de cura; pela presença de aditivos químicos (substâncias químicas adicionadas para modificar a hidratação); pela presença de adições minerais (escória de alto forno, cinza volante, e pozolânas) (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

O silicato tricálcico (Alita) é o mais importante dentre todos os constituintes do cimento Portland, responsável em grande medida pelo controlar a fixação e endurecimento. Contudo, a hidratação do silicato tricálcico é também bastante complexa e ainda não é totalmente compreendida. Porém, como produto do processo de hidratação, forma-se uma fase amorfa de silicato de cálcio e silicato hidratado com relação molar  $\text{CaO/SiO}_2$  inferior a 3,0 chamada de fase C-S-H e hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , ou simplesmente CH (BEAUDOIN; ODLER, 2019).



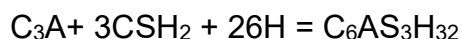
Silicato dicálcico (Belita), das modificações existentes o  $\beta\text{C}_2\text{S}$  é de longe a mais importante, uma vez que é um constituinte regular do cimento Portland.  $\beta\text{C}_2\text{S}$  é uma modificação metaestável em todas as temperaturas, mas pode ser estabilizado à temperatura ambiente incorporando diferentes íons estrangeiros em sua rede cristalina.

Assim como na hidratação do silicato tricálcico, a hidratação do  $\beta$ -silicato dicálcico está associada à liberação de íons cálcio e silicato na fase líquida. A fase C-S-H formada na hidratação do silicato dicálcico é muito semelhante à formada na hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Aluminato tricálcico (Celita), existe em modificações cúbicas, ortorrômbico e monoclinicas, no entanto, a sua reatividade pode variar, em função da qualidade e quantidade do dopante utilizado. Na hidratação do cimento Portland, o aluminato tricálcico reage com o sulfato de cálcio presente. Assim, as reações no sistema  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS}^- \cdot \text{H}_2\text{O}$  são de particular importância e devem também serem abordadas.

Na ausência de hidróxido de cálcio, em temperatura ambiente, o primeiro produto de hidratação do  $C_3A$  é um material semelhante a gel, sem linhas de DRX detectáveis. Mais tarde, este material transforma-se em cristais hexagonais ( $C_2AH_8$  e  $C_4AH_{19}$ ). Quando findas, convertem-se em  $C_3AH_6$  cúbico, o único hidrato de aluminato de cálcio que é termodinamicamente estável à temperatura ambiente (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

Na presença de sulfato de cálcio, a quantidade de  $C_3A$  hidratado na fase inicial de hidratação é claramente reduzida quando comparada com a consumida na ausência de  $CaSO_4$ . A Etringita (trissulfato)  $C_6AS_3H_{32}$  é formado como o principal produto de hidratação (BEAUDOIN; ODLER, 2019).



A composição de aluminoferrita de cálcio (fases da ferrita) pode variar entre cerca de  $C_2(A_{0,7}F_{0,3})$  e  $C_2(A_{0,3}F_{0,7})$ . Em condições comparáveis, os produtos de hidratação formados na hidratação das fases de ferrita são semelhantes em muitos aspectos aos formados a partir de  $C_3A$ , embora as taxas de reação sejam diferentes. A reatividade da fase de ferrita pode variar significativamente e parece depender da relação Al/Fe. Geralmente diminui com aumento da proporção de Fe  $C_2(A, F)$  puro exibe uma taxa de hidratação inicial bastante rápida que abranda rapidamente, mas que continua a ser constante até estar completamente hidratado. Normalmente hidrata mais rapidamente do que o  $C_3A$  puro. Tal como com o  $C_3A$ , o progresso da hidratação é retardado na presença de CH, mais fortemente pelo gesso e mais eficazmente (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

A fase de ferrita abarca cerca de 8%-13% de um PC típico e é geralmente representada pela fórmula  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ , que pode ser expressada na sua forma abreviada por  $C_4AF$  na literatura do cimento. A fase de ferrita tem recebido relativamente pouca atenção no que diz respeito à sua hidratação e características físico-mecânicas (BEAUDOIN; ODLER, 2019).

## 4.2 ADIÇÕES MINERAIS

### 4.2.1 Definição

Adições minerais são materiais cimentícios suplementares, com a finalidade de melhorar o desempenho físico, mecânico, reológico e a durabilidade nas matrizes cimentícias (MOHAMMED, 2017).

As adições minerais mais usadas atualmente são derivadas de pozolânas artificiais tais como; cinza volante do tipo F, metacaulim, sílica ativa e cinza da casca de arroz. Todavia, existem outras derivadas de adições hidráulicas, tais como: escórias de alto forno e cinza volante tipo C. As pozolânas não endurecem só na presença de água, mas com a presença de hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  originado pela hidratação dos silicatos de cálcio (C-S-H) e do cimento (ANDRADE; BUJÁK, 2013). As adições minerais geram mudanças notórias em três fases: na estrutura sólida, na rede de poros e solução de poros da pasta de cimento hidratada. Estas alterações são ocasionadas pela redução da quantidade de clínquer por volume de concreto, que por sua vez aumenta a relação água / cimento (a/c) em relação à fração de cimento Portland.

## 4.3 MATERIAIS POZOLÂNICOS

### 4.3.1 Definição

A etimologia da palavra pozolâna é derivada da região de Pozzuoli na Itália, onde se extraiu as cinzas misturadas com cal, usadas nas grandes construções medievais na Europa (MCCARTHY; DYER, 2019).

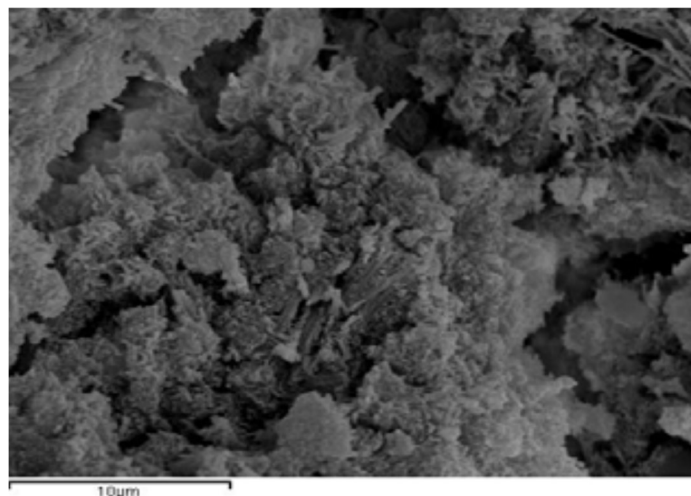
A NBR 12653, (ABNT, 2014), define materiais pozolânicos como materiais siliciosos e, ou aluminosos, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas, quando na forma fina no estado amorfo na presença de água ou umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentícias. Atualmente, as pozolânas ganham destaques como materiais cimentícios alternativos e adições minerais, muitos estudos

e novas fontes estão a ser desenvolvidas (MEHTA, 2017; ROSELLÓ et al., 2015; SABIR; WILD; BAI, 2001; VILLAR-COCIÑA et al., 2011);(M. M. TASHIMA, 2012);(CASSOL, 2015; MORAES, 2015).

Os materiais pozolânicos naturais não requerem qualquer outro tratamento, adição ou modificação para além da moagem; já os materiais pozolânicos artificiais resultam de modificações químicas e/ou estruturais de materiais que originalmente não têm ou têm apenas poucas propriedades pozolânicas. E podem ser resíduos agroindustrial, de produção ou produtos fabricados a partir de matérias-primas selecionadas. A divisão entre materiais pozolânicos naturais e artificiais não está bem definida, uma vez que existem materiais, tais como: Moler dinamarquês, gaize francês e alguns tufos riolíticos dos Estados Unidos que, além de constituintes tipicamente pozolânicos, também contêm quantidades variáveis de minerais argilosos que só apresentam características pozolânicos claro quando calcinados (MCCARTHY; DYER, 2019).

Atualmente no mercado brasileiro a pozolâna artificial à base de biomassa mais usada como adição mineral nas matrizes cimentícias é a cinza da casca de arroz, pois é pioneira no ramo e muitos são os estudos já realizados mundialmente. A Figura 3 mostra uma imagem de microscopia eletrônica de varredura da cinza da casca de arroz.

Figura 3 - Imagem de MEV da cinza da casca de arroz



Fonte: (MORAES, 2015)

O termo "atividade pozolânica" abrange todas as reações que ocorrem entre os constituintes ativos dos materiais pozolânicos, cal e água. O mesmo inclui

dois parâmetros, nomeadamente a quantidade máxima de cal com que um material pozolânico pode combinar e o processo que ocorre nesta combinação. Ambos os fatores dependem da natureza do material pozolânico e, mais especificamente, da qualidade e quantidade das fases ativas (MCCARTHY; DYER, 2019).

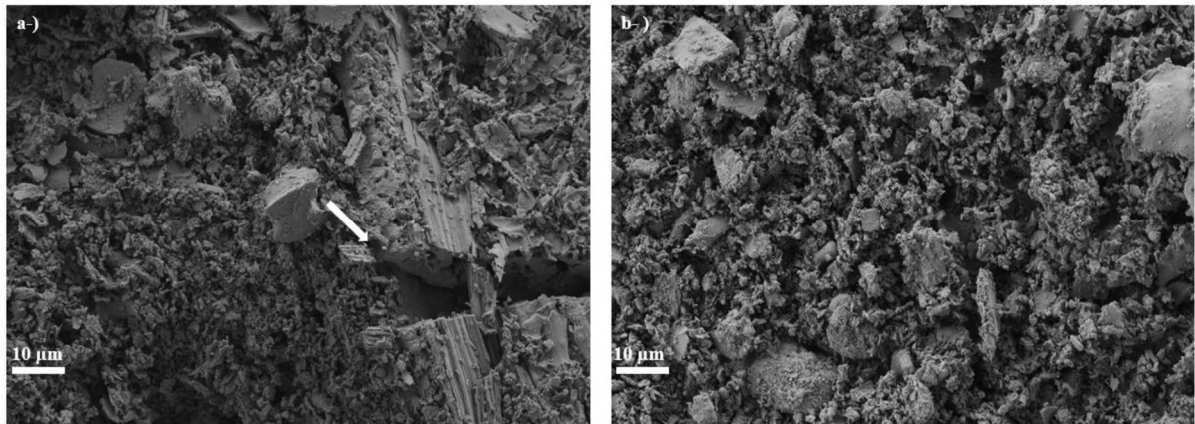
Depois de 180 dias de reação, os materiais pozolânicos são capazes de se combinar com 45%-75% de cal em relação à sua massa. Nas pastas, a combinação da cal é mais baixa, uma vez que o desenvolvimento de produtos de hidratação dificulta a obtenção de condições de equilíbrio (MCCARTHY; DYER, 2019).

#### 4.4 CINZA DA FOLHA DE BAMBU

A cinza da folha de bambu é considerada um material pozolânico alternativo, composto, majoritariamente por sílica, em torno de 74,23% a 80,4%, baixo teor de alumina (2,27%), e com variação de óxidos amorfos. A cinza da folha de bambu possui alta reatividade comprovada pelas análises de condutividade elétrica, pH, FTIR, TGA e FESEM em diferentes matrizes cimentícias, concluída e classificada como altamente reativa, a mesma é sustentada pelos autores (DWIVEDI et al., 2006; FATIMAH et al., 2019; FRÍAS et al., 2012; MORAES, 2019; RODIER et al., 2017, 2019; ROSELLÓ et al., 2015; SINGH et al., 2007; SOHEL et al., 2015; VILLAR-COCIÑA et al., 2011).

Moraes (2019) afirma que cerca de 11,34% perdem-se ao fogo e a cinza da folha de bambu possui 7,67% de fase cristalina, resultado do difratograma. O tempo ótimo de moagem foi de 50 minutos, proporcionando diâmetro médio das partículas de 26,2 micrometros. O tamanho das partículas foi aferido através de ensaio de granulometria a laser. A Figura 4 mostra a cinza da folha de bambu antes da moagem e depois dos 50 minutos de moagem.

Figura 4 - Imagem de MEV da cinza da folha de bambu, a-) sem moer; b-) 50 minutos de moagem



Fonte:(MORAES, 2019)

## 4.5 ARGILA CALCINADA

### 4.5.1 Definição

A NBR 12653 , (2014) define a argila calcinada como material pozzolânico artificial, oriundo da calcinação da argila em intervalo de temperatura entre 500 °C a 900 °C. A argila caulinita está disponível em abundância na natureza, quando calcinada produz propriedade física – química com alto teor de reatividade (KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019; MUZENDA *et al.*, 2020a; NGUYEN; KHAN; CASTEL, 2018; SABIR; WILD; BAI, 2001; SHI *et al.*, 2019; CASSOL, 2015).

### 4.5.2 Utilizações de argila calcinada como material pozzolânico em matrizes cimentícias

As propriedades que a argila calcinada possui, torna-a uma das principais fontes de matéria prima de materiais cimentícios, e são aplicadas abundantemente em matrizes cimentícias no contemporâneo.

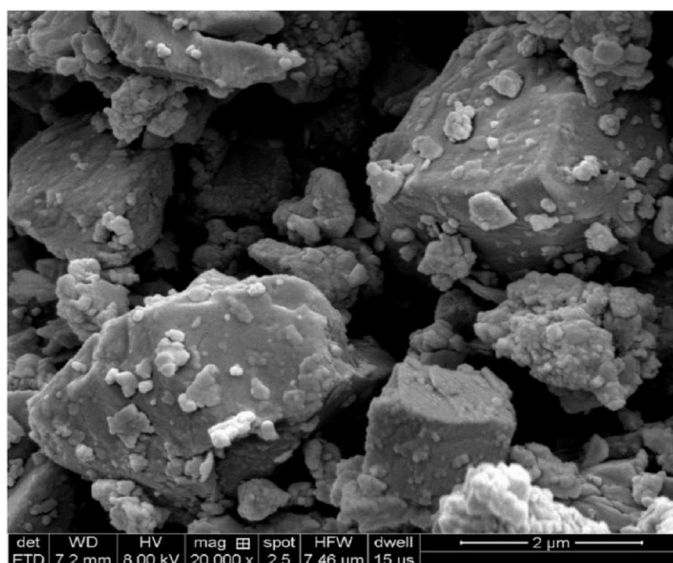
A argila caulinita calcinada que dá origem ao metacaulim, é uma das mais usadas na produção massiva de argamassas e concreto, pois, suas propriedades físico-químicas fazem com que alguns desempenhos de concretos só são alcançados com seu emprego. A resistência ao sulfato é uma dessas característica, (SABIR;

WILD; BAI, 2001; NGUYEN; KHAN; CASTEL, 2018; SHI *et al.*, 2019; KRISHNAN; EMMANUEL; BISHNOI, 2019).

(MUZENDA *et al.*, 2020a) empregou a argila calcinada para analisar as propriedades reológicas das matrizes cimentícias, pois, a argila calcinada no estado fresco em pastas, argamassas e concreto em substituição do cimento Portland altera a tensão de escoamento estático e dinâmico e viscosidade plástica. (SCRIVENER *et al.*, 2018; RODRIGUEZ; TOBON, 2020) também estudaram a influência no desempenho reológico em matrizes cimentícias quando adicionado argila calcinada.

(VICENTINI, 2018), usou a argila calcinada no processo de produção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, resultando em uma ótima pozolâna, pois, a caracterização química obtida a partir de ensaio de fluorescência de raio-X apresentou altos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e pouca quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Por ensaio de granulometria a laser foi possível estabelecer o tempo ótimo de moagem de 50 minutos do material, cujo diâmetro médio das partículas foi de  $27,9 \mu\text{m}$ . O ensaio de MEV mostrou que a queima conferiu a remoção da matéria orgânica e outras impurezas, proporcionando assim homogeneidade na morfologia do material e redução do diâmetro das partículas. A Figura 5 mostra uma imagem de microscopia da argila calcinada.

Figura 5 - Imagem de MEV da argila calcinada



Fonte: (MUZENDA *et al.*, 2020b)

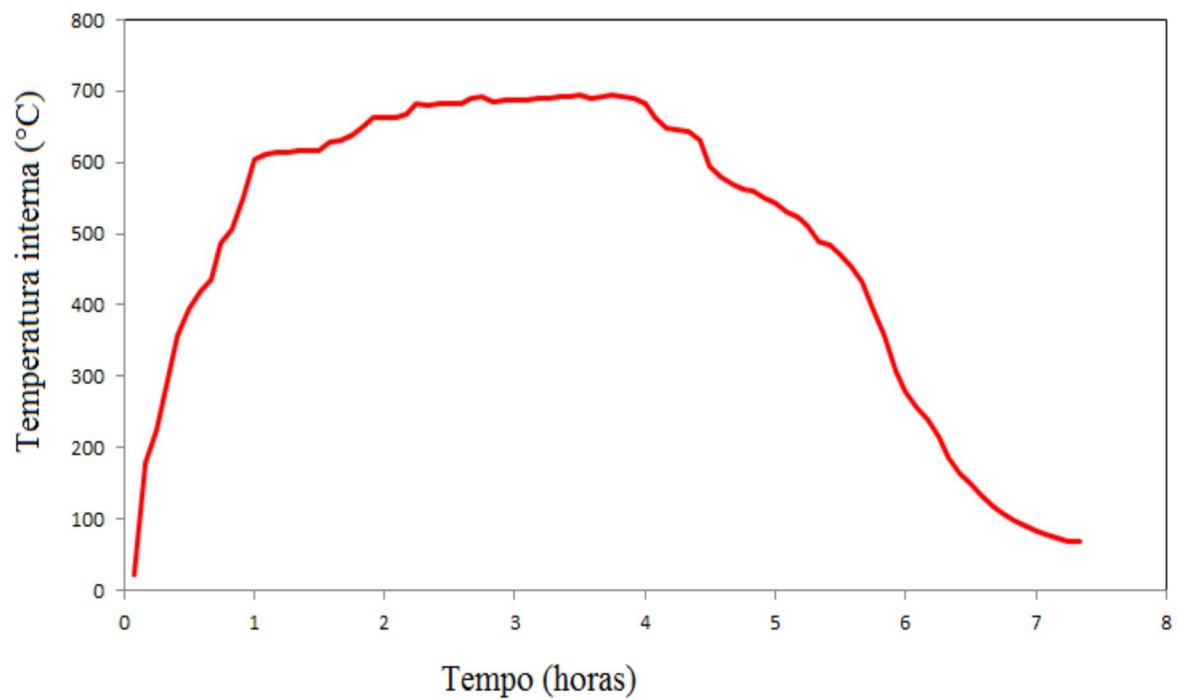
#### **4.5.3 Argamassas de sistemas ternários de argilas calcinadas e outras pozolâneas**

A incorporação da argila calcinada e pozolâneas de biomassas proporcionam cada vez mais novas fontes de materiais cimentícios suplementares alternativos nas matrizes cimentícias, as biomassas desempenham papel fundamental na redução de energia de produção dos materiais.

(VICENTINI, 2018) para a produção da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, misturou a argila caulinita e o bagaço de cana-de-açúcar na proporção em massa de 1:0,15, relação bagaço de cana-de-açúcar e 1:0,125 a relação bagaço/água, a qual produziu blocos sólidos combustíveis cuja sua auto calcinação gerou a cinza do bagaço de cana-de-açúcar e argila calcinada.

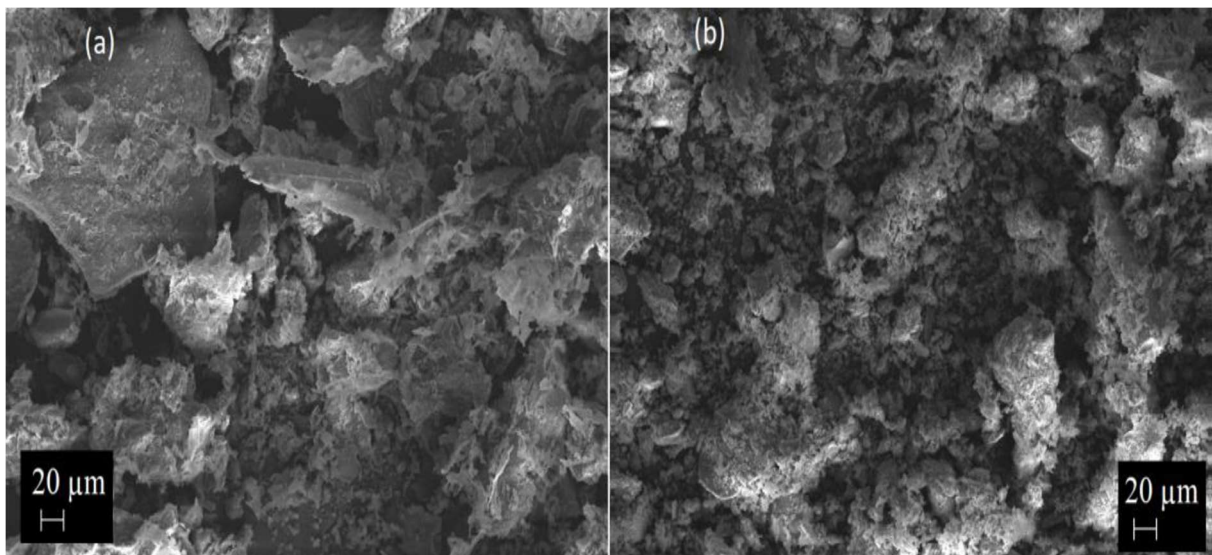
A Figura 6 ilustra a variação de temperatura. Após a calcinação e a cinza atingir a temperatura ambiente, a cinza é retirada do forno foi processada, apresentando teores de sílica e alumina de 83,42 %.Então foram produzidas pastas e argamassas com teores de substituição em massa Cal/Cinza do bagaço de cana-de-açúcar e argila calcinada e Cimento/ Cinza do bagaço de cana-de-açúcar e argila calcinada em diversas proporções, mantendo constante a relação água/aglomerante em 0,5 todas as amostras estudadas pelo autor foram curadas em câmaras úmidas, foram submetidas a análises de DRX, FTIR, MEV e TG, a qual caracterizaram que a cinza obteve alto teor de reatividade. A Figura 7 mostra a microscopia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar antes da moagem e depois de 50 minutos de moagem.

Figura 6 - Tempo de auto calcinação do bagaço da cana-de-açúcar e argila



Fonte:(VICENTINI, 2018)

Figura 7 - Imagem de MEV da Cinza do bagaço de cana-de-açúcar e argila sem moagem(a) e 50 minutos de moagem (b).



Fonte:(VICENTINI, 2018)

## 4.6 BLOCO COMBUSTÍVEL

### 4.6.1 Definição

Bloco combustível é definido como uma massa densificada, composta essencialmente de resíduos agroecológicos, que podem ser queimados para extrair energia, geralmente aplicado em aquecimento ou cozimento (SHARMA; MUKUNDA; SRIDHAR, 2009)(THE; CLARA; CLARA, 2002).

A biomassa é a principal fonte de energia nos países em desenvolvimento, usada geralmente para energia doméstica, cozinhar, aquecer ambiente, água etc. Perfaz cerca de 14% da energia total gerada no mundo. A biomassa é a quarta maior fonte de energia depois do carvão, petróleo e gás natural (SHARMA; MUKUNDA; SRIDHAR, 2009).

Após o processo de queima das biomassas são geradas cinzas como resíduo, que geralmente são expostas a céu aberto ou em aterros sanitários.

Como já apresentado, estudos apontam que as cinzas geradas pelo processo de queima das biomassas têm propriedades pozolânicas, fato este que desperta interesse de pesquisadores no processo de obtenção de novas fontes de materiais alternativos de construção, com a finalidade de substituição parcial do cimento Portland, deste modo mitigando os impactos ambientais causado pelos materiais convencionais.

Os blocos combustíveis descritos nesta pesquisa, mostrados na Figura 8, surgem com intuito de gerar energia para o processo de calcinação de materiais caracterizados com propriedades pozolânicas nomeadamente, argila e folha de bambu.

Figura 8 - Bloco Combustível



Fonte: Próprio autor

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Foi desenvolvido um programa experimental de modo a produzir um novo ligante pozolânico, e aplicar em matrizes cimentícias.

Neste capítulo são apresentados os materiais empregados para a produção da CFBA e produção de pastas e argamassas e os equipamentos utilizados. Além disso, é abordado também a metodologia utilizada para confecção dos blocos combustíveis; calcinação dos materiais; processamento da CFBA; dosagens e produção de pastas e argamassas, bem como os ensaios aplicados a amostras.

A matriz dos ensaios realizados está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Programação de ensaios

|           | Traços                                                         | Nº de Ensaios | Ensaios realizados por traço      | Idades (dias)   | Amostras (unidade) |
|-----------|----------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| CFBA      |                                                                | 1             | DRX                               |                 |                    |
| Pasta     | 0%,<br>20%CFBA,<br>40%CFBA                                     | 1             | MEV                               | 28; 91          | 6                  |
| Argamassa | 0%;<br>10%CFBA;<br>20%CFBA;<br>30%CFBA;<br>40%CFBA;<br>50%CFBA | 6             | Índice de consistência            |                 | 24                 |
|           |                                                                |               | Índice de desempenho              | 28              | 8                  |
|           |                                                                |               | Resistência à compressão axial    | 3; 7;<br>28; 90 | 72                 |
|           |                                                                |               | Absorção de água por imersão      | 28              | 18                 |
|           |                                                                |               | Absorção de água por Capilaridade | 28              | 18                 |
|           |                                                                |               | Resistência ao fogo               | 28              | 54                 |

Fonte: Próprio autor

## 5.1 MATERIAIS

### 5.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland CPV ARI, para a produção de argamassas e pastas de cimento. Trata-se de um cimento com 95% de clínquer, com pouco teor de adição para evitar interferências de outras adições quanto a análise da atividade pozolânica. O mesmo apresenta uma área específica de 4800 cm<sup>2</sup> / g (método Blaine), e granulometria de 0,05% retido na peneira de 75 µm e 0,58 % retido na peneira de 45 µm NBR 16697 (ABNT, 2018), de igual modo foi usado o cimento Portland CP II-F, na confecção de argamassas para o índice de desempenho. Na Tabela 2 abaixo mostra a composição química destes cimentos.

Foi utilizada a Cinza da folha de bambu e argila calcinada (CFBA), que é um material ligante proveniente da mistura da folha de bambu e argila, cuja o processo de obtenção deste material será descrito no item 4.3.1.

Tabela 2 - Caracterização química do Cimento Portland V ARI, CP II-F

|         | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Outros |
|---------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|--------|
| CPV-ARI | 18,16            | 7,01                           | 2,57                           | 62,95 | 0,7  | 3,11            | 0,77             | 0,18              | 4,55   |
| CP II-F | 17,59            | 4,26                           | 2,75                           | 61,22 | 3,44 | 2,56            | -                | -                 | 8,18   |

Fonte: Próprio autor

### 5.1.2 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada na mistura das argamassas e pastas foi proveniente da rede de distribuição pública de água potável do município de Ilha Solteira, SP, Brasil.

### 5.1.3. Agregado Miúdo

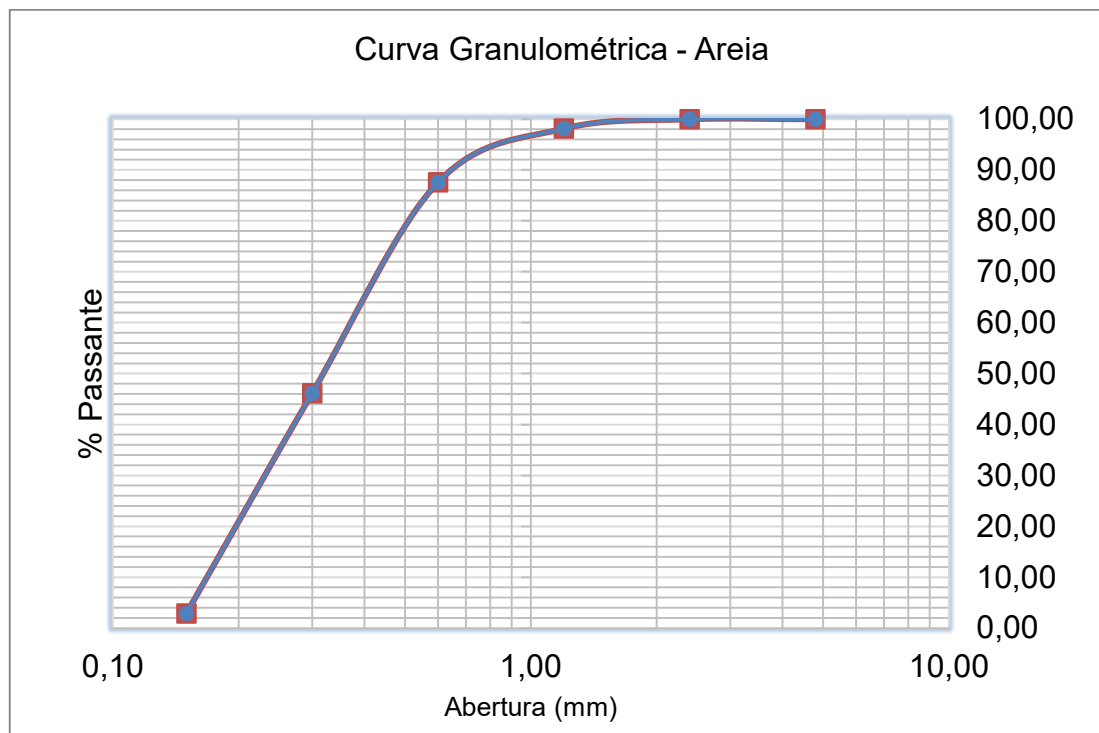
Na produção das argamassas, foi utilizado como agregado miúdo, a areia natural disponível no Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP, campus de Ilha Solteira, SP, Brasil proveniente da cidade de Castilho, São Paulo - Brasil. Foram realizados ensaios de caracterização referente à composição granulométrica da areia, conforme a (NBR NM248, 2003), a mesma apresenta um teor de umidade inferior a 2% e sua distribuição granulométrica é similar ao especificado pela (NBR NM248, 2003). A Tabela 3 apresenta as características físicas da areia e a Figura 9 mostra a curva granulométrica da areia.

Tabela 3 - Características físicas do agregado miúdo

| Massa específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Absorção % | Módulo de finura |
|---------------------------------------|------------|------------------|
| 2.630                                 | 0.481      | 1.650            |

Fonte: Próprio autor

Figura 9 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Próprio autor

#### 5.1.4 Argila caulinita

A argila caulinita está presente em abundância na natureza, possui ampla utilização na indústria da construção civil. E foi usada como matéria prima para produção da CFBA. A mesma foi proveniente de uma cerâmica na cidade de Pereira Barreto, SP, Brasil. Chega em barras geometricamente prismáticas com certo teor de umidade, a qual é exposta a céu aberto no sentido de secá-las, posteriormente moer para obter-se a granulometria desejada para o processo de homogeneização.

#### 5.1.5 Biomassa (folha de bambu)

A folha de bambu é um resíduo gerado pelas plantas de bambu, possui reatividade pozolânica quando calcinada e servirá como fonte de geração de energia e foi utilizado como matéria prima para produção da CFBA.

As folhas de bambu foram coletadas de uma plantação de bambu nos arredores da cidade de Ilha Solteira, SP, Brasil. As folhas foram moídas para tornar o material mais fino e homogêneo.

#### 5.1.6 Superplastificante

Foi utilizado 0,1% de aditivo superplastificante de marca MC PowerFlow 4000, em relação à massa do cimento para melhorar a trabalhabilidade. A Tabela 4 abaixo mostra as características técnicas do aditivo superplastificante fornecido pela fabricante do material.

Tabela 4 - Aditivo superplastificante

| Característica      | Valor         | Observações             | Estado  | Cor    |
|---------------------|---------------|-------------------------|---------|--------|
| Densidade           | 1,12 kg/L     | NBR 10908:2008          | Líquido | Marrom |
| Dosagem Recomendada | ≥0,2% ≤ 5,0 % | sobre o peso do cimento |         |        |

Fonte: (BAUCHEMIE, 2019)

## 5.2 EQUIPAMENTOS

### 5.2.1 Prensa de solo cimento

A prensa de solo cimento (Figura 10) é um equipamento manual, usado para produção de pequenas quantidades de tijolos cerâmicos, solo-cimento e solo comum. No presente trabalho foi usado para produção de blocos sólidos combustíveis de folha de bambu e argila bruta. A mesma tem capacidade de produzir três blocos de uma só vez, com dimensões de 23 x 11 x 09 cm respectivamente.

Figura 10 - Prensa de solo cimento



Fonte: Próprio autor

### 5.2.2 Forno de combustão

O forno de combustão foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa MAC, usado na pesquisa de (TASHIMA, 2006), no Laboratório Central de Engenharia Civil da UNESP, campus de Ilha Solteira, SP, Brasil. Trata-se de um forno de autocombustão, que não possui controle de temperatura e tempo de combustão, pois, tudo depende dos blocos sólidos combustíveis. A temperatura é controlada manualmente por

intermédio de termopares, de maneira que desde o início da combustão até ao término, regista-se às variações de temperatura em função do tempo até a combustão encerrar. A utilização deste forno justifica-se pelos ótimos resultados obtidos em pozolânas produzidas por (MORAES, 2019; VICENTINI, 2018; PEREIRA *et al.*, 2015; MORAES, 2015). O mesmo forno foi usado neste estudo para produção da CFBA.

### 5.2.3 Peneiras

As peneiras utilizadas são da marca Solotest (Figura 11). As bandejas utilizadas possuem aberturas de 300 a 75  $\mu\text{m}$  (ASTM 50 a 200). As peneiras foram usadas para separar fragmento mal calcinado, respectivas impurezas e outros resíduos indesejados para o material.

Figura 11 - Peneiras utilizadas para a separação e coleta do material



Fonte: Próprio autor

### 5.2.4 Moinho de esferas metálicas

O moinho de esferas metálicas visto na Figura 12, foi usado para moer as partículas do material com finalidade de torná-los mais fino e deste modo aumentar a superfície específica da CFBA. O equipamento consiste em um cilindro oco de aço.

Figura 12 - Moinho de esfera e suas respectivas esferas



Fonte: Próprio autor

### 5.2.5 Microscópio eletrônico de varredura

Técnica fundamental na química e ciência dos materiais, microscópio eletrônico de varredura (MEV) EVO LS15 - ZEISS utilizou-se para determinar a morfologia da microestrutura da CFBA. As amostras foram recobertas por ouro e analisadas no modo elétron-secundário com voltagem de 20 kV. As imagens fornecidas pelo equipamento permitiram analisar as fases de hidratação.

### 5.2.6 Difratômetro de raio-X

A técnica da análise das partículas por difração de raios-x foi empregada para identificar a mineralogia da CFBA fases amorfas e cristalina. O difratograma usado foi da empresa Shimadzu, modelo XRD-6000, com o comprimento de onda  $\lambda=1,54056 \text{ \AA}$ . E foi empregada uma faixa de varredura de  $1^\circ/\text{min}$  na faixa de  $5^\circ$  a  $80^\circ$ , 30 kV, a 30 mA.

### 5.2.7 Argamassadeira industrial

As argamassas foram processadas pela argamassadeira da marca Amadio. A mesma tem capacidade de produzir até 5 kg, com três velocidades; 124, 220, 450 rpm. A mesma é apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Argamassadeira industrial



Fonte: Próprio autor

### 5.2.8 Máquina universal de ensaio

As propriedades mecânicas de resistência à compressão axial, foram determinadas por meio da máquina de marca Universal de Ensaio da EMIC - INSTRON. A mesma tem capacidade máxima de 200 toneladas. A Figura 14 ilustra o processo de funcionalidade da máquina, o ensaio de resistência à compressão axial do corpo de prova pela máquina universal de ensaio.

Figura 14 - Máquina universal de Ensaio EMIC - INSTRON



Fonte: Próprio autor

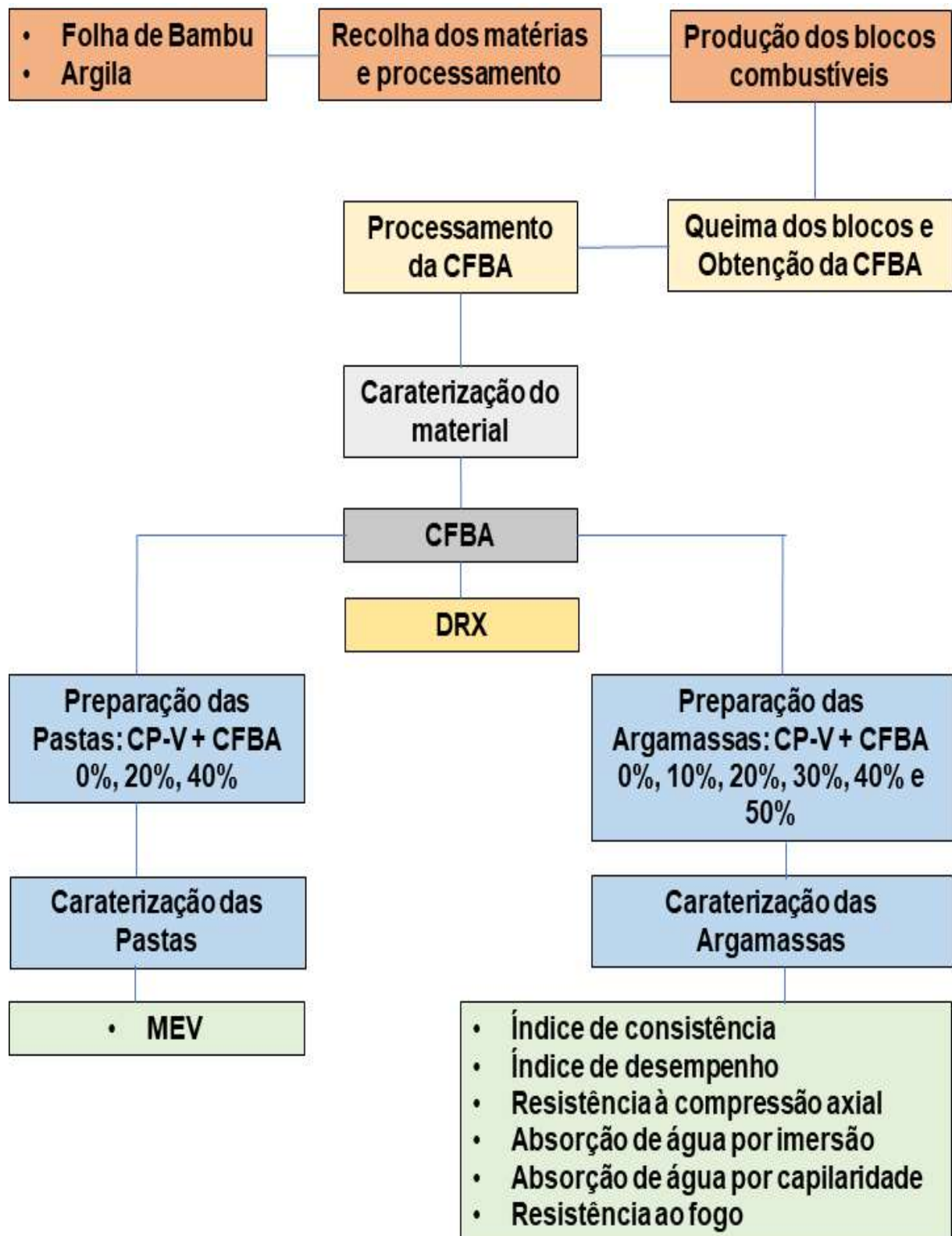
### 5.2.9 Outros equipamentos

Também foram utilizados outros materiais comuns de laboratório tais como: mesa vibradora, moldes, balança, espátulas, etc.

## 5.3 METODOLOGIA

A Figura 15, introduz o procedimento da obtenção da cinza da folha de bambu e argila, bem como à caracterização da CFBA como aglomerante pozolânico, em seguida a produção de amostras em cimento com substituição parcial por CFBA.

Figura 15 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Próprio autor

### 5.3.1 Produção da cinza da folha de bambu e argila calcinada

A cinza de folha de bambu e argila, surge como resultado da calcinação da folha de bambu e argila ambos com propriedades pozzolânicas. A cinza da folha de bambu foi estudada por (MORAES, 2019). A caracterização química da cinza da folha de bambu foi obtida através de fluorescência de Raio – X, a partir da qual foi possível observar que a cinza possui essencialmente sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Na Tabela 5 apresenta-se a caracterização química da cinza da folha de bambu. A argila usada foi estudada por (VICENTINI, 2018), caracterizada física e quimicamente por ensaio de fluorescência de Raio – X, para obtenção dos principais óxidos descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização química da cinza da folha de bambu e Argila Bruta (%)

| Amostra      | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{SO}_3$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | Cl   | $\text{TiO}_2$ | $\text{MnO}$ | Outros | Perda ao fogo |
|--------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------------|---------------|------------------------|------|----------------|--------------|--------|---------------|
| CFB          | 74,23          | 2,27                    | 2,34                    | 3,3          | 1,46         | 2,11                 | 0,84          | 1,02                   | 0,39 | 0,46           | 0,15         | 0,09   | 11,57         |
| Argila Bruta | 60,58          | 24,64                   | 9,62                    | 0,31         | 0,75         | 1,53                 | 0,06          | -                      | -    | 1,82           | -            | -      | 0,69          |

Fonte: (MORAES, 2019; VICENTINI, 2018)

#### 5.3.1.1 Secagem da argila

A argila caulinita proveniente da cerâmica em forma de blocos de 5 kg cada, com certo teor de umidade, foi exposta a céu aberto por um período de 48 horas de modo a secá-la pois essa umidade dificultaria a moagem da mesma. A Figura 16 mostra a argila caulinita exposta a céu aberto (sol) no sentido de às sela-las.

Figura 16 - Processo de secagem da argila à céu aberto



Fonte: Próprio autor

#### *5.3.1.2 Preparação da argila caulinita*

Após a secagem, a argila foi moída para redução de tamanho das partículas, de modo a proporcionar a trabalhabilidade desejada. O processo consistiu em dispor 15 kg de argila, 60 kg de esferas no moinho e moer durante um período de 20 minutos. Salienta-se que o tempo de moagem se deu pela otimização da granulometria.

Em seguida, a argila moída foi peneirada, de modo a extrair as impurezas e partículas que não passaram na peneira 300 $\mu$ m correspondente as peneiras ASTM 50, em uma quantidade de 10 kg num intervalo de tempo de até 6 minutos de peneiramento com agitador mecânico de peneiras.

#### *5.3.1.3 Confecção dos Blocos combustíveis*

Os blocos combustíveis foram confeccionados obedecendo a seguinte ordem: separação e dosagem do material na proporção de argila/folha de bambu 1:0,15 em massa e a relação folha de bambu/água 1:0,125 em massa. Em seguida colocou-se num recipiente a folha de bambu e água (paulatinamente) para proporcionar aderência à mistura. O material foi manualmente misturado de modo a

homogeneizar a mistura. Logo após, foi colocada a argila e misturou-se até ser observada homogeneidade satisfatória. Em seguida, a mistura foi levada para a prensa de solo cimento para compactar e dar um formato, assim como é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Processo de confecção de blocos combustíveis



Fonte: Próprio autor

#### *5.3.1.4 Calcinação dos blocos combustíveis*

O processo de calcinação dos blocos combustíveis, consistiu em agrupar os blocos no forno desenvolvido pelo grupo de pesquisa MAC e usado pela primeira vez por (TASHIMA, 2006) o qual consiste em dispor em 5 camadas constituintes por 12 blocos totalizando assim 60 blocos. O processo é induzido com uma chama (isqueiro), adicionado gás de cozinha num intervalo de tempo de até 5 minutos para acelerar a pega da chama e posteriormente dá-se sequência com a autocombustão dos blocos que eleva até a sua máxima temperatura que atingiu os 713 °C e foi baixando naturalmente até cessar o fogo e se realizou a coleta da cinza da folha de bambu e argila calcinada (CFBA).

Por tratar-se de biomassas, logicamente que houve perda de material no processo de calcinação, estimou-se uma perda de aproximadamente 6% dos 60 (aproximadamente 650 g em média a cada bloco) blocos dispostos no forno. Não há

um valor exato, pois não se usou nenhum instrumento ou técnica para aferir com precisão ou exatidão a perda de material.

A CFBA foi peneirada para retirar o material não queimado e outras impurezas, depois moída por 50 minutos, tempo concluído como ótimo por (VICENTINI, 2018) em um moinho de esferas, posteriormente novamente peneirado na peneira de 300  $\mu\text{m}$  para obter-se uma granulometria mais fina.

### **5.3.2 Caracterização físico-química da CFBA**

#### *5.3.2.1 Análise de DRX a CFBA*

Embora os materiais constituintes tais como a cinza bambu já ter sido estudada por (MORAES, 2019) e a argila ser estudado em (VICENTINI, 2018), a caracterização da CFBA, precisa ser estudada de forma isolada. Se espera que o material apresenta composições tais como: silicatos  $\text{SiO}_2$  e/ou aluminatos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pois são os principais compostos de matrizes pozolânicas, e outros óxidos complementares (DWIVEDI et al., 2006; MEHTA, 2017; MORAES, 2019; RODIER et al., 2017, 2019; SABIR; WILD; BAI, 2001; VICENTINI, 2018; VILLAR-COCIÑA et al., 2011).

Sabendo que um composto pozolânico deve apresentar-se na forma amorfa para o processo de hidratação e interação, o ensaio de difração de raio-X foi realizado com finalidade de avaliar a estrutura amorfa da CFBA e sua respectiva mineralogia.

O processo de preparação da amostra, simplesmente consistiu em coletar uma certa quantidade de CFBA moída, e dar seguimento como especificado anteriormente.

### **5.3.3 Estudo da aplicação CFBA em pasta de cimento**

#### *5.3.3.1 Pasta de cimento e pozolâna*

Para estudar a reatividade pozolânica da cinza de folha de bambu e argila calcinada, produziu-se pastas com teor de substituição do cimento Portland em massa, designados como: Controle, 20%CFBA e 40%CFBA respectivamente. A relação água/aglomerante foi de 0,5. Depois de moldadas em recipientes cilíndricos como ilustrado na Figura 18, as amostras foram armazenadas em câmara úmida a uma temperatura de 20 °C e de 95% de umidade relativa do ar, para análises aos 28 e 90 dias de cura. As amostras foram preparadas de acordo com as especificações de ensaios, a Tabela 6 mostra a dosagem dos materiais.

Tabela 6 - Dosagem das pastas

| Pasta    | Cimento (g) | CFBA (g) | Água (ml) |
|----------|-------------|----------|-----------|
| Controle | 20          | -        | 10        |
| 20%CFBA  | 16          | 4        | 10        |
| 40%CFBA  | 12          | 8        | 10        |

Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Moldagem das pasta



Fonte: Próprio autor

#### *5.3.3.2 Ensaios realizados nas pastas*

As pastas com proporções de 0% (controle), 20%CFBA e 40%CFBA foram armazenadas em câmara úmida, nas idades de 28 e 90 dias, e as amostras foram preparadas de acordo com as especificações dos ensaios. A Figura 19 ilustra o processo de preparação das amostras. Foi usado acetona para o processo de interrupção de hidratação e as amostras foram secas por 30 minutos em estufa a uma temperatura de 60 °C, foi usado a peneira ABNT 40, com abertura de 0,42 mm (TECHNOLOGY et al., 2012). Foram realizadas análises de MEV nas pastas.

Figura 19 - Preparação das amostras



Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4 Estudo da aplicação CFBA em argamassas de cimento

Com objetivo de caracterizar as amostras fisicamente por meio de ensaios, são apresentados os métodos empregados para preparação das amostras, no qual é um fator fundamental que influi significativamente nos resultados que serão obtidos.

O processo de preparação das amostras foi realizado no Laboratório Central de Engenharia Civil e no Núcleo de Ensino e Pesquisa de Alvenaria Estrutural da UNESP – campus de Ilha Solteira.

#### *5.3.4.1 Estudo das dosagens de argamassa de cimento e CFBA*

Produziu-se argamassas com substituição parcial do cimento Portland por CFBA em massa nas proporções de; 0%CFBA (controle), 10%CFBA, 20%CFBA, 30%CFBA, 40%CFBA e 50%CFBA respectivamente, no traço 1: 3 (aglomerante: agregado miúdo), e a relação  $a/c = 0,5$ . Foi utilizado 0,1% de aditivo superplastificante em relação à massa do cimento apenas para os traços com 30%CFBA, 40%CFBA e 50%CFBA de substituição. Foram moldados em corpos de prova prismáticos 4 x 4 x 16 cm, com finalidade de serem submetidos a ensaio de resistência à compressão axial, índice de consistência e índice de atividade resistente. A Tabela 7 abaixo mostra a dosagem dos materiais.

Foram produzidas nas mesmas proporções argamassas sem adição de superplastificante, as quais foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, determinação da absorção de água por imersão, índice de vazio, massa específica, absorção de água por capilaridade e resistência ao fogo, a Tabela 8 mostra a dosagem dos materiais.

Tabela 7 - Dosagem da argamassa, CPO:CFBA (4 x 4 x 16 cm) com adição de superplastificante, para ensaio de índice de consistência, índice de atividades resistente e resistência à compressão axial.

| Argamassa | Cimento (g) | CFBA (g) | Areia (g) | Água (l) | Superplastificante (0,1%) (g) |
|-----------|-------------|----------|-----------|----------|-------------------------------|
| Controle  | 1765        | 0        | 5295      | 0,884    | 0                             |
| 10 % CFBA | 1588,5      | 176,5    | 5295      | 0,884    | 0                             |
| 20 % CFBA | 1412        | 353      | 5295      | 0,884    | 0                             |
| 30 % CFBA | 1235,5      | 529,5    | 5295      | 0,884    | 1,765                         |
| 40 % CFBA | 1059        | 706      | 5295      | 0,884    | 1,765                         |
| 50 % CFBA | 882,5       | 882,5    | 5295      | 0,884    | 1,765                         |

Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Dosagem de argamassa para ensaios de água por imersão, índice de vazio, massa específicas, absorção de água por capilaridade e resistência ao fogo.

| Argamassa | Cimento (g) | CFBA (g) | Areia (g) | Água (g) |
|-----------|-------------|----------|-----------|----------|
| Controle  | 445         | 0        | 1335      | 223      |
| 10 % CFBA | 400,5       | 44,5     | 1335      | 223      |
| 20 % CFBA | 356         | 89       | 1335      | 223      |
| 30 % CFBA | 311,5       | 133,5    | 1335      | 223      |
| 40 % CFBA | 267         | 178      | 1335      | 223      |
| 50 % CFBA | 225,5       | 225,5    | 1335      | 223      |

Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.2 Confeção das argamassas de cimento Portland e CFBA

Todas as especificações do processo seguem-se na NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), alterando simplesmente o tempo da mistura, que foi dividido em fases de adição de materiais de modo a proporcionar melhor homogeneidade à mistura. A Tabela 9 mostra o

procedimento de mistura que foi dividida em fases em função do processo realizado em cada etapa.

Tabela 9 - Procedimento de confecção das argamassas

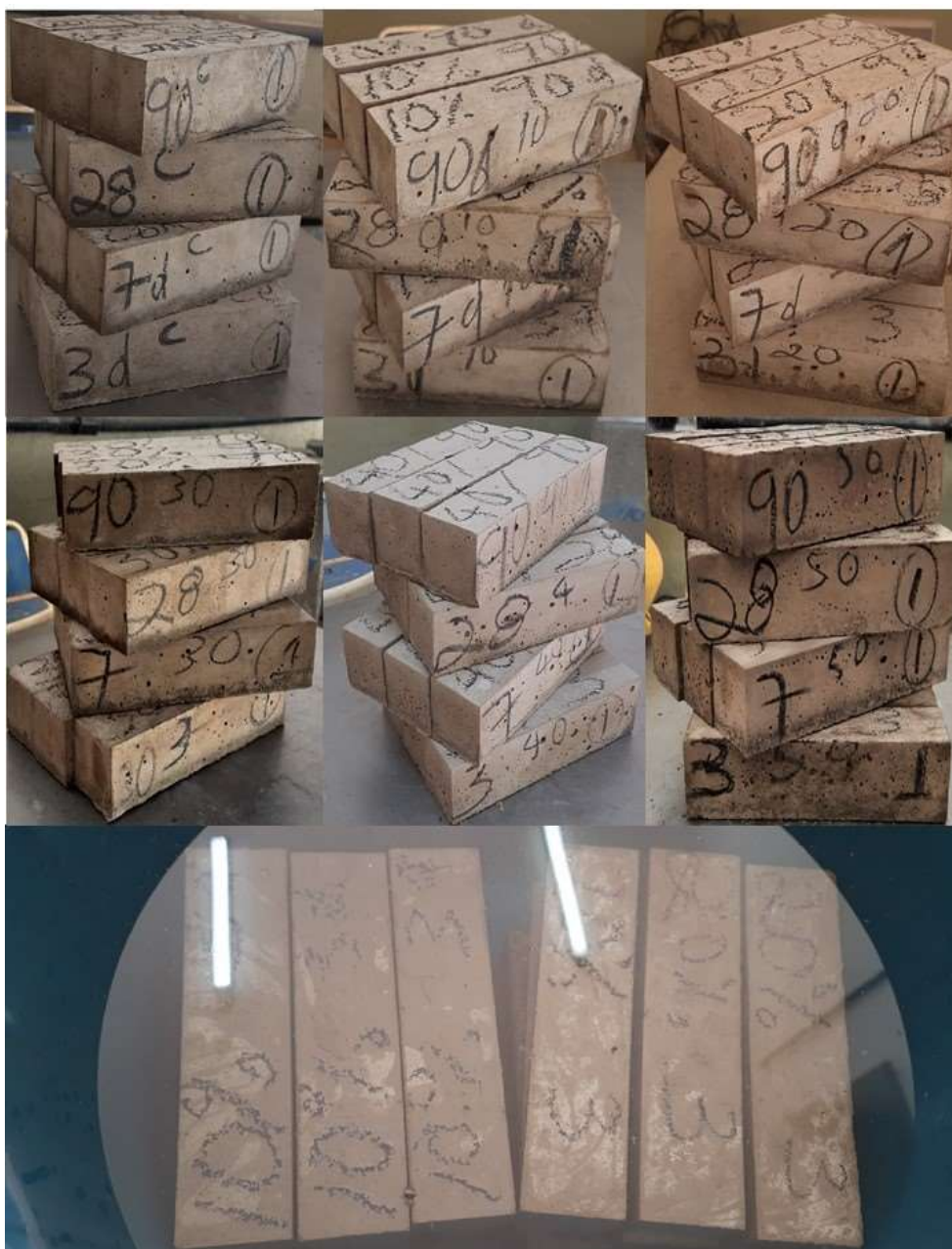
| Fase | Material adicionado   | Rotação da argamassadeira (rpm) | Tempo de mistura (segundos) | Total de tempo (segundos) |
|------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 1    | Água + Cimento + CFBA | 124                             | 30                          | 30                        |
| 2    | -                     | 220                             | 30                          | 60                        |
| 3    | Areia                 | 124                             | 60                          | 120                       |
| 4    | -                     | 450                             | 60                          | 180                       |
| 5    | -                     | Repouso                         | 60                          | 240                       |
| 6    | -                     | 450                             | 60                          | 300                       |

Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.3 Moldagem e cura das argamassas de CFBA e cimento Portland

Para a moldagem, foi usado moldes metálicos de formato prismáticos 4x4x16cm, capazes de produzir 3 corpos de prova em simultâneo Figura 20. Em seguida, é posto sobre a mesa vibradora para melhor compactação. Logo após esse processo é armazenada por 24h. Posteriormente desmoldado e submersos em água à 20 °C para o processo de cura até a data do ensaio.

Figura 20 - Confeção dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.4 Ensaios de Índice de consistência das argamassas de cimento e CFBA

O ensaio de índice de consistência consiste na determinação da fluidez, espalhamento e trabalhabilidade e foi realizado com um tronco de cone de 65 mm de altura, com abertura maior de 125mm (parte inferior) e menor de 80mm (parte superior), sobre uma mesa de consistência. O preenchimento da argamassa é feito em três camadas com variação decrescente de golpes de 15, 10 e 5 respectivamente.

Logo após, é retirado o tronco de cone, e a mesa de consistência comporta uma manivela que por intermédio desta é efetuado 30 golpes, na proporção de 1 golpe/segundo. Após finalizado este processo é aferido o espalhamento da argamassa, medindo então seu diâmetro em 3 perspectivas para obter-se um valor médio, como mostrado na Figura 21. As especificações foram seguidas pela (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019)

Figura 21 - Ensaio de índice de consistência



Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.5 Resistência à compressão axial das argamassas de cimento e CFBA

Deste modo, foram igualmente realizados testes de resistência à compressão para avaliar a resistência mecânica à compressão axial. Os mesmos foram realizados com argamassas de idades de 3, 7, 28 e 91 dias respectivamente, o equipamento usado foi a máquina universal de ensaio EMIC.

As especificações da execução do ensaio estão descritas NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019)

#### 5.3.4.6 Determinação de Índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias

Para o índice de desempenho dos materiais pozolânicos com cimento Portland CP II–F-32 aos 28 dias seguido pela (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), foram confeccionadas amostras com as dosagens apresentada na Tabela 10. O índice de desempenho é determinado pela seguinte expressão:

$$I = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100$$

Onde:

I é o índice de desempenho da CFBA com cimento Portland aos 28 dias. O resultado é expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

$f_{cB}$  é a resistência média aos 28 dias dos corpos de provas moldados com cimento e 25 % de material pozolânico, aproximada ao décimo e expressa em megapascal (MPa);

$f_{cA}$  é a resistência média aos 28 dias dos corpos de provas moldados apenas com cimento, aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa).

Tabela 10 - Dosagem da argamassa do índice de desempenho (NBR 7215)

| Descrição                     | Argamassa A | Argamassa B |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Cimento CP II-F-32 (g)        | 624         | 468         |
| CFBA (g)                      | -           | 156         |
| Areia normal <sup>b</sup> (g) | 1872        | 1872        |
| Água (ml)                     | 300         | 300         |
| Superplastificante (ml)       | -           | 6,24        |

<sup>b</sup> Areia recomendada pela norma NBR 7215

Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.7 Determinação da absorção de água, índice de vazios, e massas específicas

As especificações do ensaio foram seguidas de acordo a NBR 9778, a mesma possibilita a determinação de: Índice de vazio ( $I_v$ ); massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ); massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ ); Massa específica da amostra real ( $\rho_r$ ), (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Foram produzidas argamassas com teores de substituição em massa até 50% do cimento Portland por CFBA.

#### Absorção de água por imersão (A)

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100$$

Onde:

A - Absorção de água por imersão (%);

$M_{sat}$  - Massa saturada por imersão (g);

$M_s$  - Massa seca em estufa (g).

**Índice de vazio ( $I_v$ )**

$$I_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} * 100$$

Onde:

$I_v$  - Índice de vazio (%);

$M_{sat}$  - Massa saturada por imersão (g);

$M_s$  - Massa seca em estufa (g);

$M_i$  - Massa saturada submersa (g).

**Massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ )**

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i}$$

Onde:

$\rho_s$  - Massa específica da amostra seca (g/cm<sup>3</sup>);

$M_{sat}$  - Massa saturada por imersão (g);

$M_s$  - Massa seca em estufa (g);

$M_i$  - Massa saturada submersa (g).

**Massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ )**

$$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_i}$$

Onde:

$\rho_{sat}$  - Massa específica da amostra saturada (g/cm<sup>3</sup>);

$M_{sat}$  - Massa saturada por imersão (g);

$M_s$  - Massa seca em estufa (g);

Mi - Massa saturada submersa (g).

**Massa específica da amostra real ( $\rho_r$ )**

$$\rho_r = \frac{M_s}{M_s - M_i}$$

Onde:

$\rho_r$  - Massa específica da amostra real (g/cm<sup>3</sup>);

M<sub>sat</sub> - Massa saturada por imersão (g);

M<sub>s</sub> - Massa seca em estufa (g);

M<sub>i</sub> - Massa saturada submersa (g).

Os corpos de provas foram submetidos à estufa em temperatura de 105°C±5, tal como recomendado pela NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), como mostra a Figura 22 abaixo e a imersão dos mesmo corpo de prova também de acordo com a mesma norma. A Figura 23 ilustra os corpos de prova imersos.

Figura 22 - Corpos de prova submetidos em estufa à temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5$



Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Corpos de prova imersos



Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.8 Absorção de água por capilaridade

O processo de produção dos corpos de prova, bem como o respectivo ensaio, foi seguido de acordo com NBR 9779 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

$$C = \frac{Msat - Ms}{S}$$

Onde:

C - Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>);

Msat - Massa saturada do corpo de prova permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo específico (g);

Ms - Massa seca em estufa (g);

S - Área da seção transversal (cm<sup>2</sup>).

A Figura 24 mostra o processo de preparação dos corpos de prova: a) corpos de prova em estufa à 105 °C; b) limite de altura (5 mm) da submersão dos corpos de prova em água; c) corpos de provas prontos para o processo de absorção de água por capilaridade; d) processo de absorção de água por capilaridade.

Figura 24 - Corpos de prova em estufas 105 °C



Fonte: Próprio autor

#### 5.3.4.9 Determinação de resistência ao fogo

As especificações deste ensaio consistem em submeter os corpos de provas em altas temperaturas de até 800 °C por um intervalo de tempo de duas horas, para analisar o comportamento mecânico dos corpos de provas quando submetidos a resistência à compressão axial após altas temperaturas. Foram então analisadas nas temperaturas de 600 °C e 800 °C ambos por duas horas.

Os corpos de provas foram colocados em uma múfla após 28 dias de cura; a) os corpos de provas foram submetidos a 600 °C de temperatura por duas horas, como ilustra a Figura 25, e um resfriamento natural por 24 horas. Após este processo os corpos de prova foram submetidos a resistência à compressão axial; b) os corpos de prova foram submetidos à 800 °C de temperatura por duas horas, também com resfriamento natural por 24 horas e posteriormente realizado o ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova.

Figura 25 - Corpos de provas submetidos na múfla à 600 °C



Fonte: Próprio autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos processos desenvolvidos nos capítulos anteriores.

Será apresentado da seguinte forma: estudo de caracterização físico-química da CFBA por meio de análise de DRX, estudo microestrutural de pastas de CFBA + Cimento e estudo de aspectos físicos e mecânicos das argamassas de CFBA + Cimento.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DA CFBA POR MEIO DE DRX

#### 6.1.2 Difração de raio-X

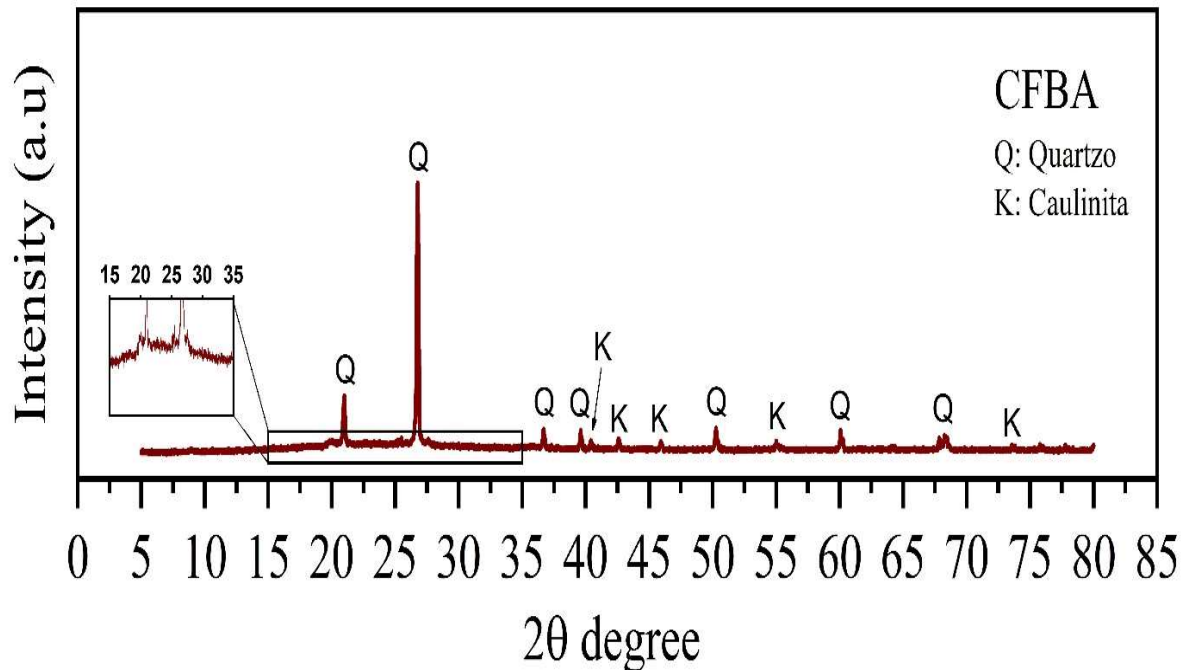
Os resultados da Difração de raio-X são apresentados na Figura 26 onde mostram a mineralogia da CFBA.

De acordo com os resultados obtidos anteriormente pelos autores supracitados, aferiu-se que a CFBA apresenta comportamentos típicos e esperados de materiais com natureza altamente amorfa, formado maioritariamente por  $\text{SiO}_2$ .

Foi possível observar entre os ângulos  $2\theta = 20^\circ$  e  $2\theta = 30^\circ$  do difratograma desvio a base da mineralogia da CFBA. Achou-se material cristalino na amostra de CFBA, tais como quartzo e caulinita cristalina, que devem ter se originado no processo de coleta da folha de bambu e/ou da argila.

(MORAES et al., 2019; VILLAR-COCIÑA et al., 2011) ao estudarem a cinza da folha de bambu, também determinaram a estrutura amorfa e com picos de cristalinos no ensaio de DRX, que originou no aparecimento de quartzo, calcita e cristobalita em sua morfologia e (VICENTINI, 2018) em seu ensaio de DRX registou aparecimento de quartzo, caulinita e moscovita em sua amostra.

Figura 26 - Difratoograma de raios - X da amostra de CFBA



Fonte: Próprio autor

## 6.2 ESTUDO MICROESTRUTURAL DE PASTAS DE CFBA + CIMENTO

### 6.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

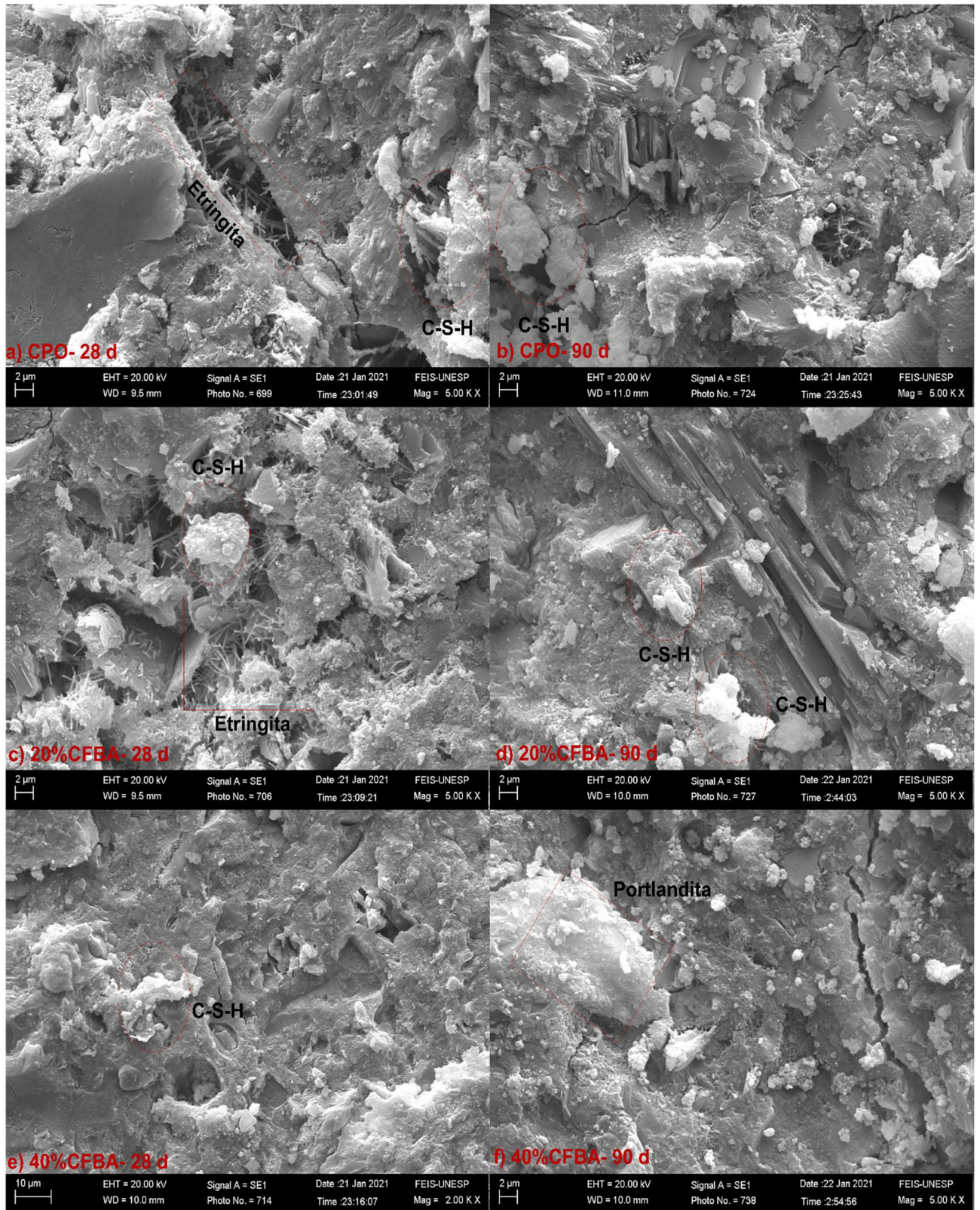
A presença de material pozolânico modifica em certa medida as reações de hidratação do cimento Portland. Qualquer modificação química e microestrutural pode potencialmente afetar as propriedades do material endurecido.

Os resultados obtidos a partir das análises de MEV nas idades de 28 e 90 dias, apresentado na Figura 27 mostram um estágio já avançado de hidratação, e a partir das imagens nota-se um aumento de hidratação em função do tempo. Tanto no traço controle, bem como nos traços com 20%CFBA e 40%CFBA de substituição. É possível observar pequenos cristais fibrosos que caracterizam o silicato hidratado de cálcio (gel C-S-H) e cristais aciculares equivalente ao trissulfato de cálcio hidratado denominado como etringita, (SANTOS et al., 2020) observaram também formação de C-S-H e etringita no processo de hidratação de suas amostras. Segundo (SINGH et al., 2007), ao estudar a hidratação da cinza da folha de bambu em mistura com cimento Portland, também verificou formação de etringita e C-S-H, alegando que

tal, provavelmente deve-se ao fato de que o gesso tenha se convertido em anidrita e o sulfato de anidrita reage com a fase de aluminado e forma então a etringita. (VILLAR-COCIÑA et al., 2011)(MORAES et al., 2019) que produziram e caracterizam os parâmetros e hidratação da cinza da folha de bambu em matrizes cimentícias de igual modo em seus processos de hidratação de suas amostras verificaram também formação de etringita e C-S-H. As imagens ainda mostram maiores formações de etringita no traço controle aos 28 dias de cura e menos gel C-S-H, já aos 90 dias é o oposto, acredita-se que isso se deve ao fato que nesse período a amostra já se encontra totalmente hidratada, o mesmo acontece com os traços 20% CFBA e 40% CFBA. E se observou ainda nas imagens, parte da portlandita que não foi totalmente consumida pela reação pozolânica. Isto é explicado pelo fato do material pozolânico reage como o hidróxido de cálcio produzindo silicato de cálcio hidratado. O material pozolânico é dissolvido no meio liberando íons de Si e Al que em solução reage com o Ca produzindo C-S-H e resultando em uma redução da formação de portlandita (MCCARTHY; DYER, 2019).

Os materiais pozolânicos não alteram os tipos de hidratos que se formam a partir da hidratação de  $C_3A$ . No entanto, se as misturas contêm hidróxido de cálcio, o C-S-H forma-se como consequência da reação pozolânica (MCCARTHY; DYER, 2019).

Figura 27 - Imagens de MEV da pasta de CPO+CFBA: a) Controle, 28 dias; b) Controle, 90 dias; c) 20%CFBA, 28 dias; d) 20%CFBA, 90 dias; e) 40%CFBA, 28 dias; f) 40%CFBA, 90 dias



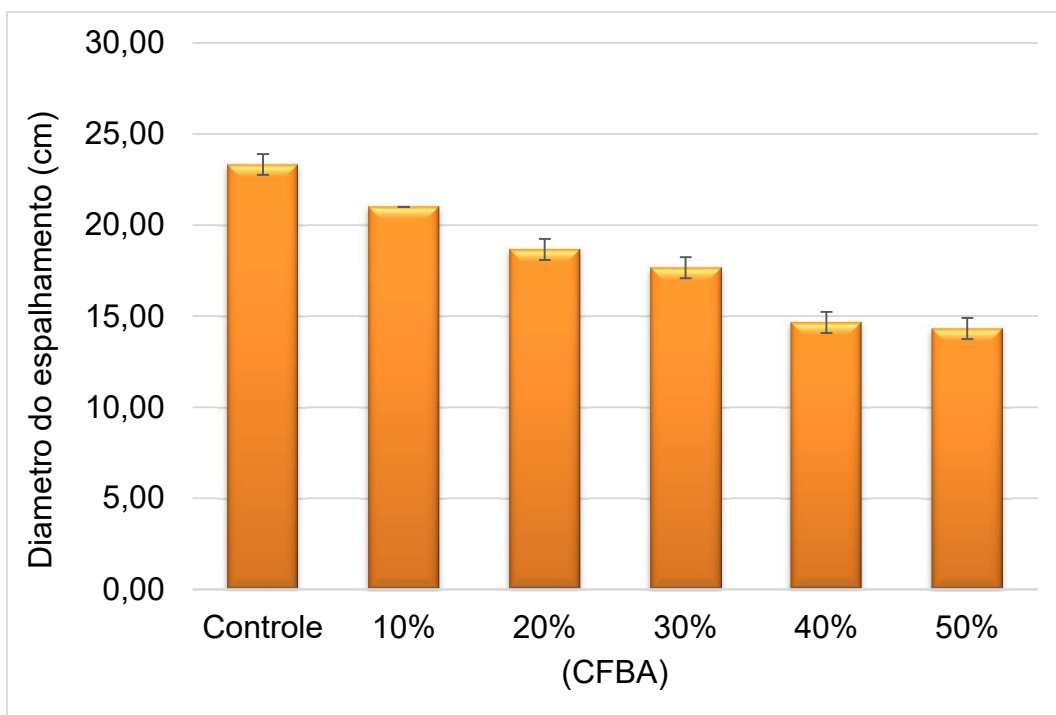
Fonte: Próprio autor

### 6.3 ESTUDO DE ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS DE CFBA + CIMENTO COM SUPERPLASTIFICANTE

#### 6.3.1 Ensaio de índice de consistência

É apresentado a seguir os resultados do índice de consistência ilustrado na Figura 28. Houve diminuição da fluidez em função do teor de substituição. Quanto maior o teor substituição, menor foi a fluidez e mais consistente foi a argamassa, esse comportamento deve-se ao fato de que as pozolânas têm maior finura e deixam as matrizes menos fluidas. O mesmo fenômeno foi registrado nos trabalhos de (MORAES, 2019, 2015; VICENTINI, 2018).

Figura 28 - Diâmetro de abertura das argamassas obtido pelo Índice de consistência

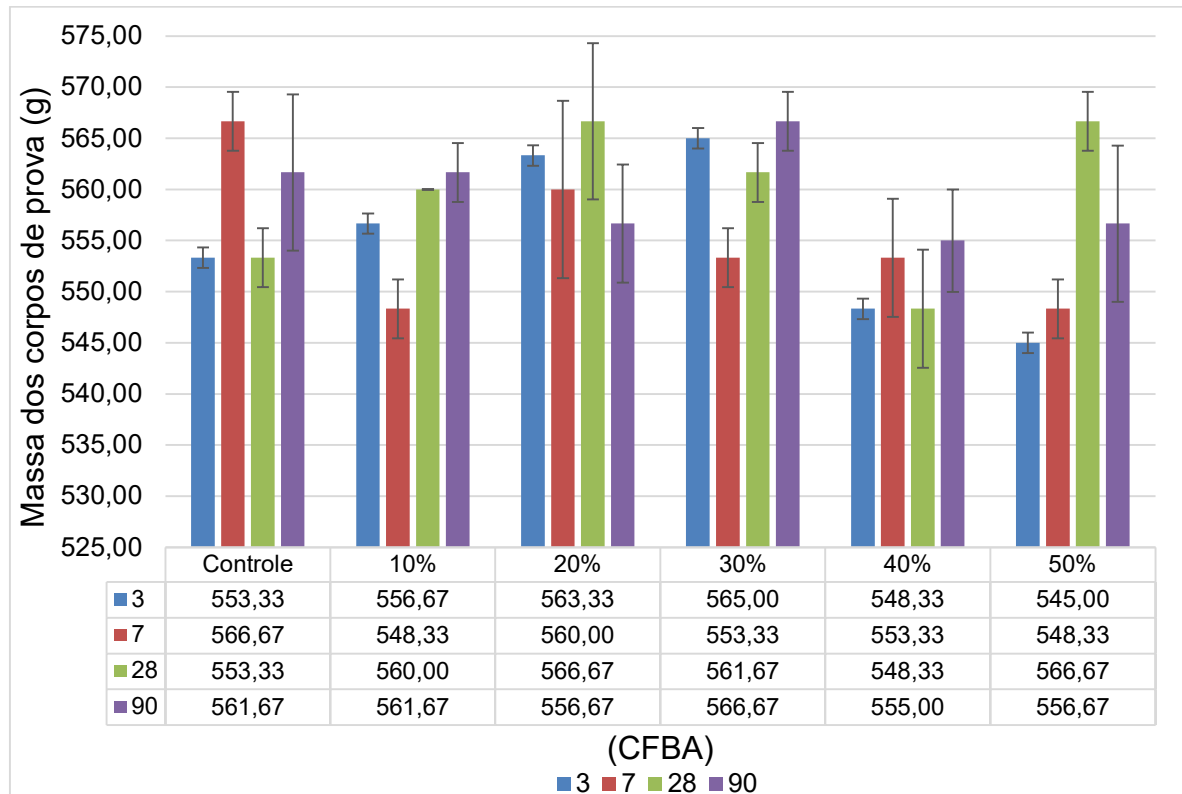


Fonte: Próprio autor

Apesar da queda de fluidez dos traços em função dos teores de substituições, a consistência obteve alteração sim, porém isso não atrapalhou ou impediu a moldagem das argamassas nas formas. Essa conclusão foi obtida a partir

da massa dos corpos de prova, que apresentaram uma uniformidade e não apresentaram nichos ou porosidades aparentes. Na Figura 29 é ilustrado as massas dos corpos de provas por teor de substituição em grama (g).

Figura 29 - Massa dos corpos de prova por teor de substituição (g)

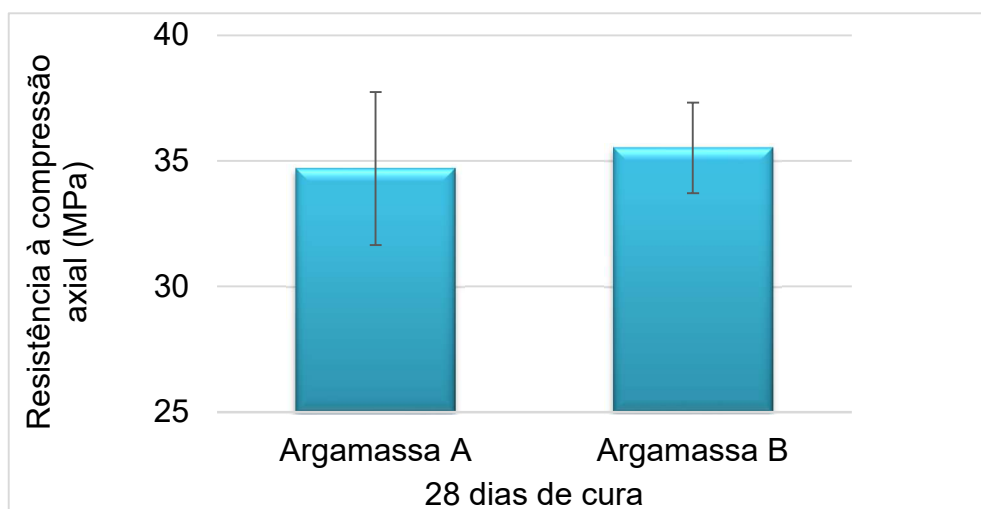


Fonte: Próprio autor

### 6.3.2 Determinação do índice de desempenho pozolânico da CFBA

A Figura 30 mostra a resistência à compressão axial das argamassas A e B de acordo com a NBR 5752 (ABNT 2014).

Figura 30 - Determinação de Índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias (NBR 5752)



Fonte: Próprio autor

De acordo com a NBR 5752 (ABNT 2014) o resultado do índice de desempenho pozolânico da CFBA com o cimento Portland foi determinado pela equação descrita anteriormente e a mesma registou 103% de desempenho, o que perfaz como eficaz de acordo com a mesma norma.

### 6.3.3 Resistência mecânica das argamassas de CFBA e cimento

Os resultados de resistência à compressão das argamassas com teores de substituição em até 50% do cimento Portland pela cinza da folha de bambu e argila calcinada são apresentados na Tabela 11 e Figura 31 abaixo. Os resultados apresentam um ganho de resistência em função das idades de cura.

Nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias de cura o ganho de resistência foi gradativo, relativamente ao traço controle, aos 3 dias de cura a amostra de 10% CFBA teve ganho de 17,26 % face ao traço controle, ao passo que aos 7 dias teve ganho de 20,52%, aos 28 dias de cura, um aumento de 14,59% e aos 90 dias de cura ganho de 14,18%. As amostras com teor de 20%CFBA registraram aos 3 dias ganho de resistência de 27,46 % face ao traço controle, já aos 7 dias de cura houve um ganho de resistência de 33,25%, aos 28 dias de cura, registrou um ganho de resistência

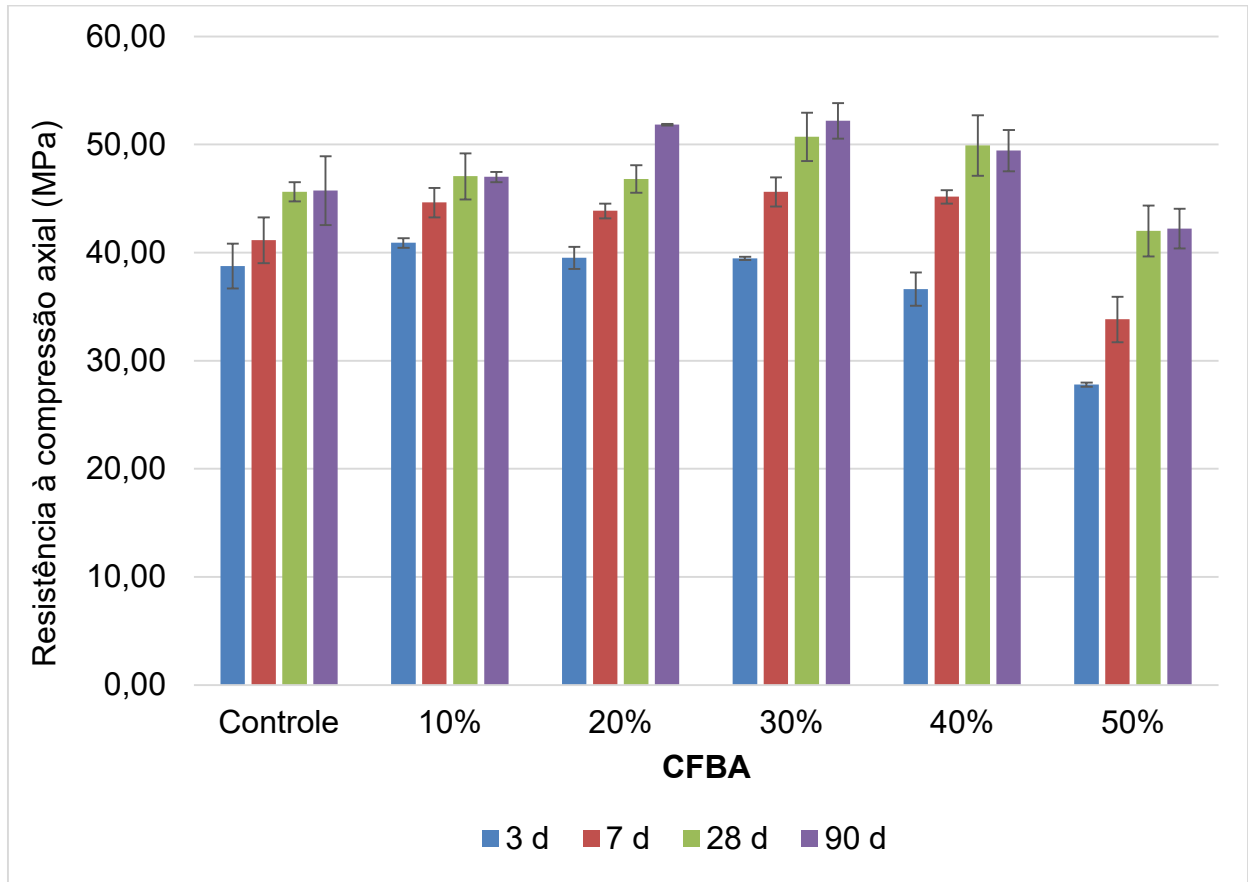
28,26%, ao passo que aos 90 dias de cura houve um aumento de 41,66%. As amostras com teor de 30%CFBA aos 3 dias de cura, registrou um ganho de resistência de 45,49% face ao traço controle, e aos 7 dias de cura um ganho de 58,41%, ao passo que aos 28 dias de cura, registou um ganho de resistência de 58,78% face ao traço controle e aos 90 dias de cura um ganho de 62,99% respetivamente. As amostras com teor de 40%CFBA, registrou um ganho de resistência aos 3 dias de cura de 57,50% em relação ao traço controle, ao passo que aos 7 dias de cura, houve um aumento na resistência de 82,94%, aos 28 dias de cura registrou ganho na resistência de 84,15% e aos 90 dias de cura registrou ganho de 80,15% respetivamente. As amostras com teor de 50%CFBA, aos 3 dias de cura registrou ganho de resistência de 43,38% face ao traço controle, e aos 7 dias de cura um ganho de 64,42%, ao passo que aos 28 dias de cura registrou ganho de resistência de 84,15%, e aos 90 dias de cura um ganho na resistência de 84,62% face ao traço controle. Ao comparar os resultados, autores (MORAES, 2019, 2015; TASHIMA, 2006; VICENTINI, 2018) (FRÍAS et al., 2012) também registraram a mesma progressão de resultados em função do tempo.

Tabela 11 - Resistência à compressão axial das argamassas de CP-V com substituição em até 50% por CFBA

|          | 3 dias       | 7 dias       | 28 dias      | 90 dias      |
|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Controle | 38,77 ± 2,08 | 41,15 ± 2,12 | 45,63 ± 0,89 | 45,74 ± 3,18 |
| 10% CFBA | 40,91 ± 0,44 | 44,64 ± 1,37 | 47,06 ± 2,14 | 47,01 ± 0,47 |
| 20% CFBA | 39,53 ± 1,02 | 43,87 ± 0,68 | 46,82 ± 1,28 | 51,84 ± 0,09 |
| 30% CFBA | 39,48 ± 0,15 | 45,63 ± 1,34 | 50,72 ± 2,24 | 52,19 ± 1,64 |
| 40% CFBA | 36,63 ± 1,53 | 45,17 ± 0,63 | 49,92 ± 2,80 | 49,45 ± 1,91 |
| 50% CFBA | 27,79 ± 0,18 | 33,83 ± 2,10 | 42,02 ± 4,82 | 42,23 ± 1,84 |

Fonte: Próprio autor

Figura 31 - Resistência à compressão axial das argamassas de CFBA em substituição em até 50% do CP-V



Fonte: Próprio autor

#### 6.3.3.1 Índice de atividade resistente

#### 6.3.3.2 Ganho de resistência

O resultado do ganho de resistência dos corpos de provas submetidos a ensaio de resistência à compressão axial, são apresentados na Tabela 12, E a expressão matemática para o cálculo do mesmo foi obtido extraído no estudo feito por (PAYÁ et al., 1996).

$$SG_{(\%)} = \frac{R_{cpuz} - (R_{c controle} * Cimento\%)}{(R_{c controle} * Cimento\%)} * 100$$

Onde:

SG - Ganho de resistência (%);

$R_{c\text{ poz}}$  - Resistência à compressão da amostra com pozolâna;

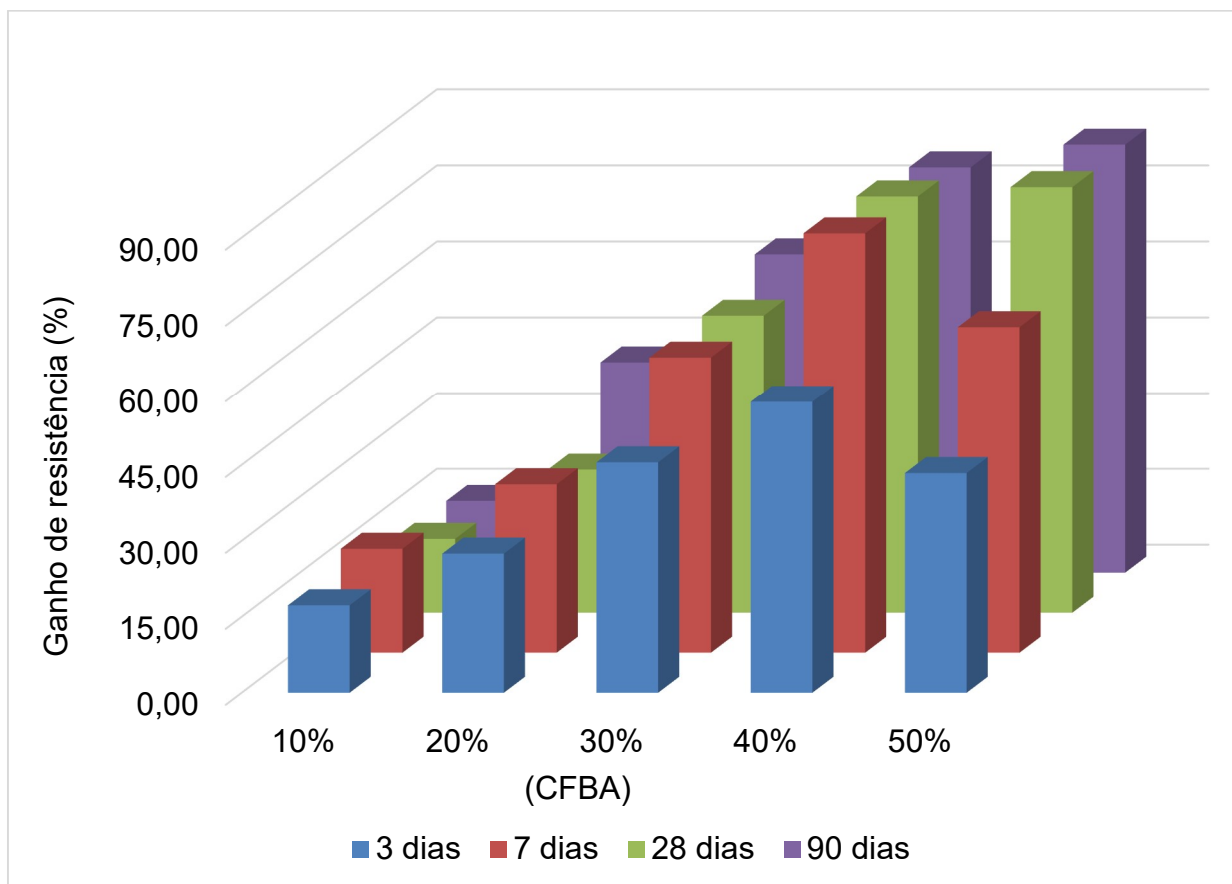
$R_{c\text{ controle}}$  - Resistência à compressão da amostra com cimento;

Tabela 12 - Ganho de resistência das argamassas por substituição em função do tempo

|          | Ganho de resistência % |        |         |         | CPO (%) |
|----------|------------------------|--------|---------|---------|---------|
|          | 3 dias                 | 7 dias | 28 dias | 90 dias |         |
| Controle | -                      | -      | -       | -       | -       |
| 10% CFBA | 17,26                  | 20,52  | 14,59   | 14,18   | 0,9     |
| 20% CFBA | 27,46                  | 33,25  | 28,26   | 41,66   | 0,8     |
| 30% CFBA | 45,49                  | 58,41  | 58,78   | 62,99   | 0,7     |
| 40% CFBA | 57,50                  | 82,94  | 82,32   | 80,15   | 0,6     |
| 50% CFBA | 43,38                  | 64,42  | 84,15   | 84,62   | 0,5     |

Fonte: Próprio autor

Figura 32 - Ganho de resistência à compressão axial das argamassa



Fonte: Próprio autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 32, mostra claramente ganhos de resistência satisfatório em todos os teores de substituição. Era de se esperar que a maior faixa de idade para ganho de resistência seria entre aos 7 e 28 dias de cura, pois, as pozolânas têm suas reações mais lentas por essa razão aos 3 dias de cura não se esperava muito ganho de resistência. Cada porcentual de cimento substituído na matriz resultou em um desempenho bom relativamente ao esperado. O traço de 50% CFBA se formos analisar de uma forma numérica comparativamente ao traço controle é o único que apresentou o valor de resistência abaixo, mas no ponto de vista estatístico, é o que maior registrou ganho de resistência, pois, substituir 50% do cimento Portland nas matrizes cimentícias e apresentar resultado de 84,62% de ganho de resistência é bastante satisfatório.

## 6.4 ESTUDO DE ASPECTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DAS ARGAMASSAS DE CFBA + CIMENTO SEM SUPERPLASTIFICANTE

### 6.4.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios, e massa específica

Os resultados de absorção de água por imersão descritos pela NBR 9778 (ABNT 2009) são apresentados na Tabela 13 abaixo.

Tabela 13 - Absorção de água por imersão expresso em (%)

| Teor     | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Absorção (%) |
|----------|---------------------|---------------------------|--------------|
| Controle | 525,87 ± 3,95       | 562,63 ± 4,30             | 6,99         |
| 10% CFBA | 535,03 ± 6,86       | 571,33 ± 5,84             | 6,78         |
| 20% CFBA | 523,63 ± 7,50       | 562,07 ± 7,39             | 7,34         |
| 30% CFBA | 514,93 ± 11,85      | 555,87 ± 13,23            | 7,95         |
| 40% CFBA | 525,00 ± 4,69       | 566,40 ± 5,05             | 7,89         |
| 50% CFBA | 518,13 ± 7,52       | 563,27 ± 6,89             | 8,71         |

Fonte: Próprio autor

Foi possível observar que as amostras vão absorvendo mais água em função dos níveis de substituição, acredita-se que esse fato se deve a natureza dos materiais. (HOSSAIN et al., 2016, 2020) que estudaram o comportamento da absorção da água em diferentes materiais pozolânicos em substituição do cimento Portland, registraram também essa variação de aumento de resultados nos percentuais de substituição e tempo de cura. Acredita-se que esse fato se deve em função da natureza de cada material.

O índice de vazio (%) seguido pela mesma norma são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Índice de vazio (%)

| Teor     | Massa saturada submersa (g) | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Índice de vazio (%) |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| Controle | 306,43 ± 4,02               | 525,87 ± 3,95       | 562,63 ± 4,30             | 14,35               |
| 10% CFBA | 313,63 ± 5,42               | 535,03 ± 6,86       | 571,33 ± 5,84             | 14,09               |
| 20% CFBA | 304,87 ± 4,27               | 523,63 ± 7,50       | 562,07 ± 7,39             | 14,94               |
| 30% CFBA | 297,90 ± 7,01               | 514,93 ± 11,85      | 555,87 ± 13,23            | 15,87               |
| 40% CFBA | 306,57 ± 1,80               | 525,00 ± 4,69       | 566,40 ± 5,05             | 15,93               |
| 50% CFBA | 300,73 ± 6,20               | 518,13 ± 7,52       | 563,27 ± 6,89             | 17,19               |

Fonte: Próprio autor

Fazendo jus aos resultados da absorção, e a partir dos resultados obtidos do índice de vazio e poros não se esperava diferente, maior absorção maior índice de vazio. Mesmo com ligeiros aumentos, é importante destacar que os níveis de substituição vão apresentando maiores índices de vazio.

Os resultados da massa específica da amostra seca (ps), são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica da amostra seca (g/cm<sup>3</sup>)

| Teor     | Massa saturada submersa (g) | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| Controle | 306,43 ± 4,02               | 525,87 ± 3,95       | 562,63 ± 4,30             | 2,05                                       |
| 10% CFBA | 313,63 ± 5,42               | 535,03 ± 6,86       | 571,33 ± 5,84             | 2,08                                       |
| 20% CFBA | 304,87 ± 4,27               | 523,63 ± 7,50       | 562,07 ± 7,39             | 2,04                                       |
| 30% CFBA | 297,90 ± 7,01               | 514,93 ± 11,85      | 555,87 ± 13,23            | 2,00                                       |
| 40% CFBA | 306,57 ± 1,80               | 525,00 ± 4,69       | 566,40 ± 5,05             | 2,02                                       |
| 50% CFBA | 300,73 ± 6,20               | 518,13 ± 7,52       | 563,27 ± 6,89             | 1,97                                       |

Fonte: Próprio autor

Houve uma certa redução da massa específica seca, comparativamente ao traço controle em relação ao traço 50%CFBA, esse fato pode ser entendido talvez porque o cimento Portland tem maior massa em relação a argila calcinada.

O resultado da massa específica da amostra saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ), são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Massa específica da amostra saturada (g/cm<sup>3</sup>)

| Teor     | Massa saturada submersa (g) | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Massa específica saturada (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
| Controle | 306,43 ± 4,02               | 525,87 ± 3,95       | 562,63 ± 4,30             | 2,20                                           |
| 10% CFBA | 313,63 ± 5,42               | 535,03 ± 6,86       | 571,33 ± 5,84             | 2,22                                           |
| 20% CFBA | 304,87 ± 4,27               | 523,63 ± 7,50       | 562,07 ± 7,39             | 2,19                                           |
| 30% CFBA | 297,90 ± 7,01               | 514,93 ± 11,85      | 555,87 ± 13,23            | 2,15                                           |
| 40% CFBA | 306,57 ± 1,80               | 525,00 ± 4,69       | 566,40 ± 5,05             | 2,18                                           |
| 50% CFBA | 300,73 ± 6,20               | 518,13 ± 7,52       | 563,27 ± 6,89             | 2,15                                           |

Fonte: Próprio autor

O resultado da massa específica da amostra real ( $\rho_r$ ) são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Massa específica da amostra real (g/cm<sup>3</sup>)

| Teor     | Massa saturada submersa (g) | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|-----------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| Controle | 306,43 ± 4,02               | 525,87 ± 3,95       | 562,63 ± 4,30             | 2,40                                       |
| 10% CFBA | 313,63 ± 5,42               | 535,03 ± 6,86       | 571,33 ± 5,84             | 2,42                                       |
| 20% CFBA | 304,87 ± 4,27               | 523,63 ± 7,50       | 562,07 ± 7,39             | 2,39                                       |
| 30% CFBA | 297,90 ± 7,01               | 514,93 ± 11,85      | 555,87 ± 13,23            | 2,37                                       |
| 40% CFBA | 306,57 ± 1,80               | 525,00 ± 4,69       | 566,40 ± 5,05             | 2,40                                       |
| 50% CFBA | 300,73 ± 6,20               | 518,13 ± 7,52       | 563,27 ± 6,89             | 2,38                                       |

Fonte: Próprio autor

A massa específica seca, saturada e real não apresentaram variações significativas, houve uma redução nas massas, mas com poucas variações, assim como aferido no parágrafo anterior, isso talvez se deve ao fato do material argiloso ser mais fino e com maior capacidade de compactação.

#### 6.4.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados da absorção de água por capilaridade, seguido das especificações da NBR 9779 (2009) seguem em apresentação na Tabela 18.

Tabela 18 - Absorção de água por capilaridade (g/cm<sup>2</sup>)

| Teor     | Secção transversal (cm <sup>2</sup> ) | Massa Seca, Ms. (g) | Massa Saturada, Msat. (g) | Abs. Capilaridade (g/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| Controle | 10,27 ± 0,23                          | 532,20 ± 1,91       | 564,87 ± 1,94             | 3,18                                   |
| 10% CFBA | 7,07 ± 0,46                           | 528,10 ± 8,23       | 552,20 ± 8,63             | 3,41                                   |
| 20% CFBA | 7,33 ± 0,23                           | 530,47 ± 5,35       | 554,83 ± 4,99             | 3,32                                   |
| 30% CFBA | 6,40 ± 0,01                           | 519,07 ± 3,86       | 547,40 ± 1,50             | 4,43                                   |
| 40% CFBA | 8,00 ± 0,01                           | 524,10 ± 4,98       | 553,60 ± 3,65             | 3,69                                   |
| 50% CFBA | 7,87 ± 0,23                           | 522,90 ± 1,85       | 553,23 ± 1,24             | 3,86                                   |

Fonte: Próprio autor

Foi possível observar um aumento de absorção de água por capilaridade, acredita-se que esse fato se deve também pela natureza dos materiais, pois, a argila absorve mais água em relação ao cimento, com tudo é necessário técnicas mais precisas para aferir com precisão esse aumento. Apesar do processo de absorção da água ser distinto, o comportamento do material é similar (HOSSAIN et al., 2020).

#### 6.4.3 Resistência ao fogo.

A Tabela 19 mostra a massa dos corpos de prova antes e depois de serem submetidos a 600 °C de temperatura em uma múfla por duas horas. Bem como na Tabela 20 mostra de igual modo a massa dos corpos de prova antes e depois de serem submetidos a 800 °C de temperatura na múfla por duas horas. E na Figura 33 é apresentado um porcentual de perda da massa dos corpos de provas após submetidos às duas temperaturas descritas.

Tabela 19 - Massa dos corpos de prova (g) antes e depois de serem submetidos à 600°C de temperatura por duas horas

| Teor     | 600 °C - Temperatura na mufla |       |       |               |              |       |       |               |
|----------|-------------------------------|-------|-------|---------------|--------------|-------|-------|---------------|
|          | Antes                         |       |       |               | Depois de 2h |       |       |               |
|          | Nº 1                          | Nº 2  | Nº 3  | Média         | Nº 1         | Nº 2  | Nº 3  | Média         |
| Controle | 529,2                         | 521,5 | 526,9 | <b>525,87</b> | 518          | 519,8 | 521,1 | <b>519,63</b> |
| 10% CFBA | 540                           | 537,9 | 527,2 | <b>535,03</b> | 514,5        | 517,7 | 512,1 | <b>514,67</b> |
| 20% CFBA | 530,6                         | 524,6 | 515,7 | <b>523,63</b> | 517,5        | 513,6 | 516,6 | <b>515,9</b>  |
| 30% CFBA | 517,1                         | 530,4 | 527   | <b>524,83</b> | 506,6        | 509,7 | 528,5 | <b>514,93</b> |
| 40% CFBA | 530                           | 520,7 | 524,3 | <b>525</b>    | 514,4        | 511,7 | 515   | <b>513,7</b>  |
| 50% CFBA | 519,3                         | 525   | 510,1 | <b>518,13</b> | 504          | 503,1 | 492,9 | <b>500</b>    |

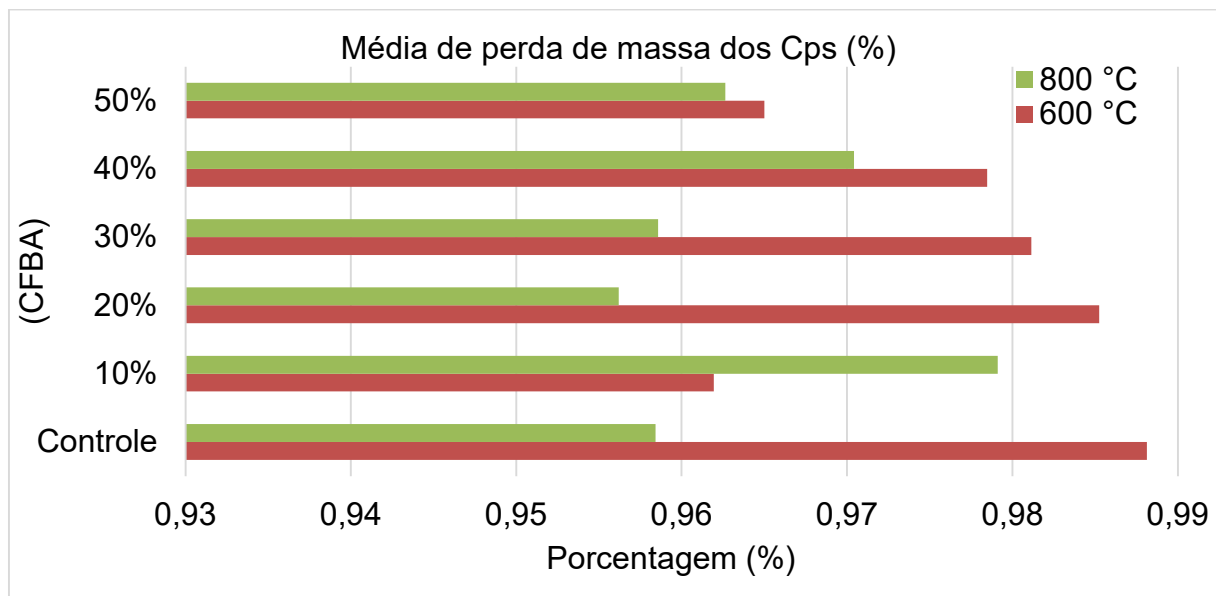
Fonte: Próprio autor

Tabela 20 - Massa dos corpos de prova (g) antes e depois de serem submetidos à 800°C de temperatura por duas horas

| Teor     | 800 °C - Temperatura na mufla |       |       |               |              |       |       |               |
|----------|-------------------------------|-------|-------|---------------|--------------|-------|-------|---------------|
|          | Antes                         |       |       |               | Depois de 2h |       |       |               |
|          | Nº 1                          | Nº 2  | Nº 3  | Média         | Nº 1         | Nº 2  | Nº 3  | Média         |
| Controle | 532                           | 530,4 | 534,2 | <b>532,2</b>  | 510,9        | 513,2 | 506,1 | <b>510,07</b> |
| 10% CFBA | 518,9                         | 530,5 | 534,9 | <b>528,1</b>  | 521,8        | 509,2 | 520,2 | <b>517,07</b> |
| 20% CFBA | 529                           | 526   | 536,4 | <b>530,47</b> | 513,8        | 507,9 | 500   | <b>507,23</b> |
| 30% CFBA | 516,5                         | 523,5 | 517,2 | <b>519,07</b> | 489,1        | 492,2 | 511,4 | <b>497,57</b> |
| 40% CFBA | 519,7                         | 529,5 | 523,1 | <b>524,1</b>  | 513,6        | 504,4 | 507,8 | <b>508,6</b>  |
| 50% CFBA | 521,1                         | 524,8 | 522,8 | <b>522,9</b>  | 504,4        | 509,9 | 495,8 | <b>503,37</b> |

Fonte: Próprio autor

Figura 33 - % de perda de massa dos corpos de prova após submetidos a 600 °C e 800 °C



Fonte: Próprio autor

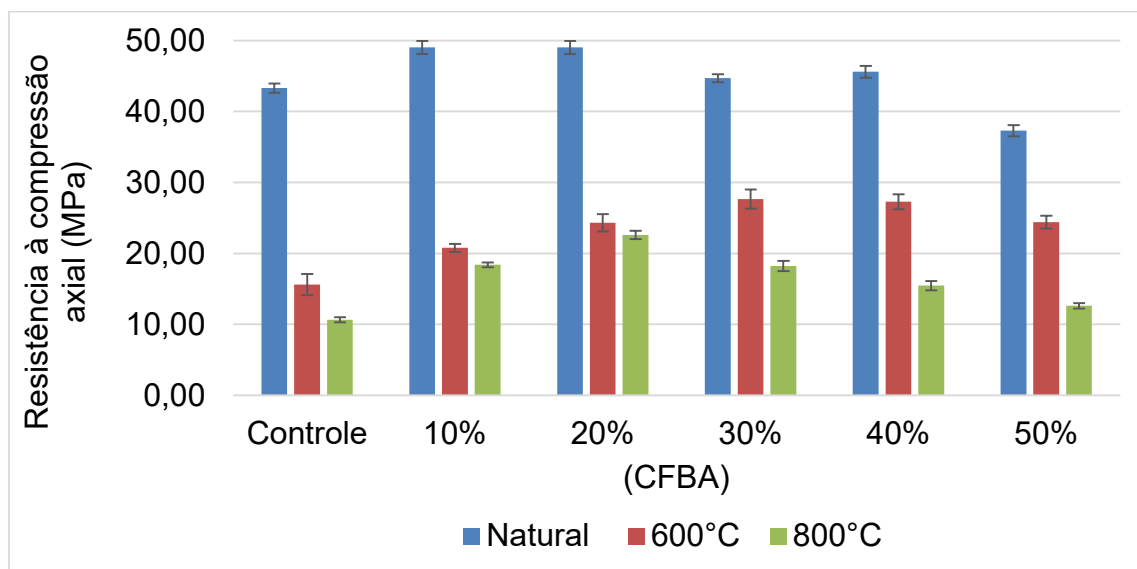
A partir da Figura 33, foi possível observar quedas de massa dos corpos de prova após submetidas às temperaturas aferidas, embora a diferença não seja elevada, acredita-se que isso se deve ao fato de existir certa quantidade de água no interior dos corpos de prova, que foi se desidratando em função da subida de temperatura.

Os resultados da resistência à compressão axial das amostras após terem sido submetidos às temperaturas de 600 °C e 800 °C são apresentados na Figura 34.

Ao comparar o traço controle da amostra antes de ser submetida a 600 °C de temperatura a amostra após 600 °C de temperatura, houve uma perda de resistência à compressão de 36,05%; já ao comparar o traço 10%CFBA antes e depois de 600 °C de temperatura houve uma perda de resistência à compressão de 42,36%; ao passo que para o traço 20%CFBA houve uma perda de 49,61%; para o traço 30%CFBA após 600 °C de temperatura houve perda de 61,92%; ao passo que para o traço 40%CFBA houve perda de 59,82%; e para o traço 50%CFBA a perda foi de 65,44% respectivamente. De igual modo ao comparar o traço controle da amostra após ter sido submetida à 800 °C de temperatura perdeu a sua resistência em 24,61%, ao passo que para o traço de 10%CFBA houve uma perda na resistência de 37,53%, e no traço 20%CFBA houve perda de 46,10%, 40,81% de perda no traço 30%CFBA,

33,94% de perda no traço 40%CFBA e no traço 50%CFBA perda de 33,85% de resistência respectivamente.

Figura 34 - Resistência à compressão a dos corpos de provas submetidos à temperatura natural, 600 °C e 800 °C



Fonte: Próprio autor.

É possível observar que a temperatura tem influência significativa na resistência das argamassas. Porém, não foi usada nenhuma técnica específica para aferir qual influência teve a CFBA no processo de resistência ao fogo.

(UMASABOR; OKOVIDO, 2018) ao estudar a resistência ao fogo da cinza da casca de arroz em argamassas com substituição do cimento Portland, nas temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C em uma mufla por 2 horas, também registrou quedas quanto mais elevada a temperatura. Concluíram que mesmo com 700 °C de temperatura, a resistência do concreto ainda teve 5% de vantagem de resistência, isso pode ser devido aos hidratados adicionais de silicato de cálcio (C-S-H) produzidos a partir das reações cimento-pozolâna que melhoram a força e durabilidade nas matrizes cimentícias.

(SETAYESH; SURESH; BINDIGANAVILE, 2017) avaliaram o desempenho da resistência em altas temperaturas em até 500 °C da cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas matrizes cimentícias e concluíram que com até 15% de substituição até uma temperatura de 500 °C houve eficiência.

## 7 CONCLUSÕES

---

### 7.1 CONCLUSÕES

O programa experimental desenvolvido teve como objetivo produzir um novo aglomerante à base de biomassa e argila, onde a folha de bambu e argila caulinita são os precursores e desempenham simultaneamente complementos pozolânicos e combustível para o processo de calcinação.

A produção da CFBA foi satisfatória. A proporção da folha de bambu e argila para produção dos blocos combustíveis, proporcionaram melhor calcinação dos materiais.

O ensaio de DRX aferiu a natureza amorfa da CFBA, ao apresentar desvio na linha base entre  $2\theta = 20$  e  $2\theta = 30$ , o mesmo ainda indicou presença de quartzo e caulinita.

Durante o processo de confecção das argamassas, o teor de substituição do CPO pela CFBA gerou menor trabalhabilidade, deste modo se usou superplastificante para melhorar a fluidez da argamassa.

Foi verificado um aumento satisfatório de resistência à compressão axial para todos os níveis de substituição, isso mostrou que a alta reatividade do material proporcionou melhor comportamento mecânico e durabilidade das matrizes. E apesar do traço 50%CFBA ser o único que ligeiramente registrou resistência menor ao traço controle, de acordo com a análise de ganho de resistência (SG), foi o que apresentou maior ganho de resistência.

Quanto mais elevada foi a temperatura, menor foi a sua massa e resistência à compressão, o que era esperado, mas se precisa de mais precisão para aferir o quanto a resistência após altas temperaturas ainda são satisfatórias quando o material estiver a exercer função estrutural ou arquitetônico, outro sim, trata-se ao fato de que não foi utilizada nenhuma técnica específica para apurar com precisão a influência da CFBA na resistência dos corpos de prova após submetidos as altas temperaturas.

Assim sendo, perfaz-se que a cinza da folha de bambu e argila calcinada (CFBA) é um aglomerante/ligante sustentável que pode bem ser usado para a substituição parcial em até 50% do cimento Portland nas matrizes cimentícias.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao desenvolver o programa experimental, houve várias análises que estavam previstas a serem desenvolvidas, porém, com a situação epidemiológica do contemporâneo algumas ficaram por serem feitas e outras foram desenvolvidas, mas os resultados não foram satisfatórios. Desta forma, recomendamos a continuidade do desenvolvimento deste programa experimental.

Fazer uma caracterização física e química da CFBA mais profunda, completa e com maior precisão;

Analisar mais as propriedades mecânicas em função porcentual de substituição, e o ciclo de vida do material, bem como das matrizes cimentícias;

Avaliar a influência da CFBA nas variações de altas temperaturas dentro das matrizes cimentícias, procurar técnicas específicas para analisar o comportamento e a resistência. Expor o material em diferentes ambientes quanto a agressividade e agentes externos.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C.; BUJÁK, R. Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 59–67, 2013.
- ARUMUGAM, A.; KARUPPASAMY, G.; JEGADEESAN, G. B. Synthesis of mesoporous materials from bamboo leaf ash and catalytic properties of immobilized lipase for hydrolysis of rubber seed oil. **Materials Letters**, v. 225, p. 113–116, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: Análise Granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 6, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697- Cimento Portland — Requisitos. **Cimento Portland – Requisitos. Norma Brasileira**, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 20, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9779- Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. **Abnt**, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. **Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2019.
- BANNARAVURI, P. K.; BIRRU, A. K. Strengthening of mechanical and tribological properties of Al-4.5%Cu matrix alloy with the addition of bamboo leaf ash. **Results in Physics**, v. 10, n. June, p. 360–373, 2018.
- BAUCHEMIE, M. MC-PowerFlow 4000. n. 11, p. 1–2, 2019.
- BEAUDOIN, J.; ODLER, I. **Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement**. 5. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019.
- BHAGATH SINGH, G. V. P.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118024, 2019.
- BOESCH, M. E.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Model for cradle-to-gate life cycle assessment of clinker production. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 19, p. 7578–7583, 2009.
- ÇANKAYA, S.; PEKEY, B. Application of scenario analysis for assessing the environmental impacts of thermal energy substitution and electrical energy efficiency in clinker production by life cycle approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122388, 2020.
- CASSOL, G. Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes. **Ekp**, v. 13, n. 3, p. 1576–1580, 2015.
- DWIVEDI, V. N. et al. A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. **International Journal of Physical Sciences**, v. 1, n. 3, p. 106–111, 2006.
- FATIMAH, I. et al. Use of ZrO<sub>2</sub> supported on bamboo leaf ash as a heterogeneous catalyst in microwave-assisted biodiesel conversion. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 12, n. January, p. 100129, 2019.

FRÍAS, M. et al. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1019–1023, 2012.

HOSSAIN, M. M. et al. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 128–140, 2016.

HOSSAIN, M. M. et al. Water absorption and sorptivity of alkali-activated ternary blended composite binder. **Journal of Building Engineering**, v. 31, n. August 2019, p. 101370, 2020.

KRISHNAN, S.; EMMANUEL, A. C.; BISHNOI, S. Hydration and phase assemblage of ternary cements with calcined clay and limestone. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 64–72, 2019.

LEA, F. M. **cement definition.pdf** Britanica Academic, Encyclopedia Britanica, 15 Aug. 2018, , 2018. Disponível em: <academic-eb-britanica.ez87.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/cement/108319>

M. M. TASHIMA. Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS). p. 431, 2012.

MCCARTHY, M. J.; DYER, T. D. **Pozzolanas and pozzolanic materials**. 5. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019.

MEHTA, V. M. M. AND P. K. **POZZOLANIC and CEMENTITIOUS MATERIALS**. [s.l.: s.n.].

MOHAMMED, S. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 10–19, 2017.

MORAES, M. J. B. DE. **Estudo do Potencial da Cinza de Folha de Bambu para sua utilização como material Pozolânico e Sustentável em Matrizes Cimentantes**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA, 2019.

MORAES, J. Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes. **Aleph**, 2015.

MORAES, M. J. B. et al. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 369–380, 2019.

MUZENDA, T. R. et al. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, n. January, p. 103516, 2020a.

MUZENDA, T. R. et al. The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, n. May 2019, p. 103516, 2020b.

NGUYEN, Q. D.; KHAN, M. S. H.; CASTEL, A. Engineering properties of limestone calcined clay concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 16, n. 8, p. 343–357, 2018.

PAYÁ, J. et al. Comparisons among magnetic and non-magnetic fly ash fractions: Strength development of cement-fly ash mortars. **Waste Management**, v. 16, n. 1–3, p. 119–124, 1996.

PEREIRA, A. et al. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, v. 41, n. 10, p. 13012–13024, 2015.

RODIER, L. et al. Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement. **Materials and Structures/Materiaux et**

**Constructions**, v. 50, n. 1, 2017.

RODIER, L. et al. Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 54–63, 2019.

RODRIGUEZ, C.; TOBON, J. I. Influence of calcined clay/limestone, sulfate and clinker proportions on cement performance. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 119050, 2020.

ROSELLÓ, J. et al. Microscopy Characterization of Silica-Rich Agrowastes to be used in Cement Binders: Bamboo and Sugarcane Leaves. **Microscopy and Microanalysis**, v. 21, n. 5, p. 1314–1326, 2015.

SABIR, B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.

SANTOS, J. A. et al. Influence of PZT insertion on Portland cement curing process and piezoelectric properties of 0–3 cement-based composites by impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117675, 2020.

SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. March 2017, p. 49–56, 2018.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. June, p. 2–26, 2018a.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, n. March, p. 2–26, 2018b.

SETAYESH, P.; SURESH, N.; BINDIGANAVILE, V. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 929–936, 2017.

SHARMA, M.; MUKUNDA, H. S.; SRIDHAR, G. Solid fuel block as an alternate fuel for cooking and barbecuing: Preliminary results. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 4, p. 955–961, 2009.

SHI, Z. et al. Sulfate resistance of calcined clay – Limestone – Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 116, n. March 2018, p. 238–251, 2019.

SINGH, N. B. et al. Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, v. 14, n. 1, p. 69–76, 2007.

SNIC, P. Indústria do Cimento. p. 31, 2020.

SOHEL, M. S. I. et al. Carbon storage in a bamboo (*Bambusa vulgaris*) plantation in the degraded tropical forests: Implications for policy development. **Land Use Policy**, v. 49, p. 142–151, 2015.

TASHIMA, M. Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. **Aleph**, 2006.

TECHNOLOGY, L. A. et al. Sample Preparation Sample Preparation. **Light Scattering from Polymer Solutions and Nanoparticle Dispersions**, p. 2–3, 2012.

THE, B.; CLARA, S.; CLARA, V. Solid Fuel Block Out of Waste. p. 1–21, 2002.

TROUT, E. A. R. **The history of calcareous cements**. 5. ed. [s.l.] Elsevier Ltd., 2019.

UMASABOR, R. I.; OKOVIDO, J. O. Fire resistance evaluation of rice husk ash concrete. **Heliyon**, v. 1, n. August, p. e01035, 2018.

VAFAEI, M.; ALLAHVERDI, A. Influence of calcium aluminate cement on

geopolymerization of natural pozzolan. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 290–296, 2016.

VICENTINI, A. H. **Ilha Solteira 2018**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” Campus de Ilha Solteira, 2018.

VILLAR-COCIÑA, E. et al. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 68–73, 2011.