

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA FÉCULA DE MANDIOCA  
PARA EMPREGO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

**FILIFE BITTENCOURT FIGUEIREDO**

**DOURADOS**  
**MATO GROSSO DO SUL**  
**2023**

**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA FÉCULA DE MANDIOCA  
PARA EMPREGO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

**FILIFE BITTENCOURT FIGUEIREDO  
DOUTORADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

Orientador: Prof. Dr. Eriton Rodrigo Botero

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (área de concentração: ciência ambiental e tecnologia ambiental), para obtenção de título de doutor.

**DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2023**

## Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central - UFGD

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F475c Figueiredo, Filipe Bittencourt

CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA FÉCULA DE MANDIOCA PARA  
EMPREGO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS [recurso eletrônico] / Filipe Bittencourt  
Figueiredo. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Eriton Rodrigo Botero.

Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Ambiental) -Universidade Federal da Grande  
Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Agrosíduos. 2. Agrocimento. 3. massa da mandioca. 4. resíduo sólido da fécula. I.  
Botero, Eriton Rodrigo. II. Título.

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

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**Fundação Universidade Federal da Grande Dourados**  
 Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologias



## TERMO DE APROVAÇÃO

Após apresentação, arguição e apreciação pela banca examinadora, foi emitido o parecer aprovado, para a tese intitulada: "**CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA FÉCULA DE MANDIOCA PARA EMPREGO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**", de autoria de **Filipe Bittencourt Figueiredo**, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Grande Dourados.

Documento assinado digitalmente  
 **ERITON RODRIGO BOTERO**  
 Data: 28/08/2023 12:34:32-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Eriton Rodrigo Botero  
 Presidente da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 **FLAVIO PAULO MILTON**  
 Data: 28/08/2023 16:15:13-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Flavio Paulo Milton  
 Membro Examinador - UFGD

Documento assinado digitalmente  
 **Fabiana Raupp**  
 Data: 28/08/2023 13:33:06-0300  
 CPF: \*\*\*.138.706-\*\*  
 Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Fabiana Raupp  
 Membro Examinador - UFSC

Documento assinado digitalmente  
 **ANDRE FELIPE APARECIDO DE MELLO**  
 Data: 28/08/2023 16:29:58-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Andre Felipe Aparecido de Mello  
 Membro Examinador - UFGD

Documento assinado digitalmente  
 **BRUNO PERUQUI GUIDIO**  
 Data: 28/08/2023 15:56:19-0300  
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Peruqui Guidio  
 Membro Examinador - CMU

Dourados/MS, 28 de agosto de 2023.

## DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Nathalia,

Pelo seu constante amor, apoio incondicional e paciência infinita. Você foi minha rocha durante esta jornada, me inspirando a persistir mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus queridos filhos Samuel e Noah,

Vocês são minha fonte de alegria e motivação. Cada passo que dei em direção a este doutorado foi pensando em um futuro melhor para vocês. Que esta conquista possa inspirá-los a buscar seus próprios sonhos com paixão e determinação.

Este trabalho é uma manifestação do nosso amor e da nossa crença no poder do conhecimento. Que ele possa ser uma lembrança do que podemos alcançar quando trabalhamos juntos e apoiamos uns aos outros.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que Ele faz em nossas vidas diariamente, pela renovação do ânimo e pela capacitação diária.

Agradeço aos meus amados pais Ana Valeska Souza Bittencourt, José Manuel de Figueiredo Rodrigues (*in memoriam*) e Wilson Roberto Lussari. Desde o início, vocês foram minhas fontes inesgotáveis de inspiração e encorajamento. As lições de resiliência, dedicação e perseverança que aprendi com vocês moldaram não apenas minha trajetória acadêmica, mas também a pessoa que me tornei. O sacrifício e comprometimento de vocês para me proporcionar oportunidades e recursos para crescer e aprender são tesouros que carregarei para sempre. Meus queridos pais, este é um tributo a vocês tanto quanto é uma celebração da minha jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Eriton Rodrigo Botero, pela confiança, apoio e direcionamentos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a Vó Maria Ideuza que muitas vezes renunciou ao seu descanso para estar presente diariamente nos ajudando com tanto amor e carinho.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios, Sérgio, André, Mari, Lígia e Geison que tão prontamente me atenderam e tantas oportunidades.

Agradeço a COPASUL em nome do Engenheiro de Produção, Egídio, que motivou e disponibilizou a matéria prima para realização dessa pesquisa.

Agradeço a todos que, de forma direta ou indiretamente, contribuíram para tornar esta conquista possível.

## RESUMO

A crescente conscientização sobre a necessidade de práticas sustentáveis na indústria da construção civil tem impulsionado a busca por alternativas mais ecológicas na confecção de materiais de construção, particularmente quando se trata da redução do uso de cimento Portland convencional, devido à sua alta emissão de carbono. O objetivo desta pesquisa é correlacionar um aproveitamento para o uso do resíduo sólido do processo de beneficiamento da fécula de mandioca (bagaço da fécula de mandioca), propondo-lhe uma destinação adequada no seu ciclo de vida dentro da sua cadeia produtiva, paralelamente a concepção de matrizes cimentícias (argamassas) com inserção da cinza do bagaço da fécula da mandioca (CBFM). Nesta tese, foi investigado o potencial da CBFM como substitutos parciais do cimento, visando aprimorar a sustentabilidade e desempenho das matrizes cimentícias. Foram realizados ensaios de caracterização da CBFM como Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raio X (DRX), Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), índice de atividade pozolânica (IAP), perda ao fogo e teor de umidade. Ademais, realizou-se a investigação de seus efeitos nas propriedades mecânicas e físicas das matrizes cimentícias de argamassas, incluindo os ensaios de massa específica, resistência à compressão, tração por compressão diametral e absorção. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, tração e absorção revelaram um desempenho similar da argamassa com substituição de até 5% do cimento pela CBFM aos 28 dias de idade. A argamassa com CBFM a 10% apresentaram redução na resistência mecânica e aumento da absorção de água e índice de vazios. Observou-se uma tendência no aumento da absorção e diminuição na massa específica aparente, conforme o aumento da substituição do cimento pela CBFM, o que sugere um potencial aumento na permeabilidade e menor compactidade nas matrizes contendo o agrosresíduo estudado. No entanto, se faz necessário a continuidade de pesquisas para otimizar as proporções e características da CBFM, bem como sua influência nas diferentes propriedades das matrizes cimentícias. Essas descobertas abrem caminho para abordagens mais ecologicamente corretas na indústria da construção, impulsionando a busca por soluções mais sustentáveis e eficazes.

**Palavras-chave:** Agrosresíduos; agrocimento; massa da mandioca; resíduo sólido da fécula.

## ABSTRACT

The increasing awareness of the need for sustainable practices in the construction industry has driven the search for more environmentally friendly alternatives in construction materials, particularly the reduction of conventional Portland cement usage due to its high carbon emission. This research aims to establish a purpose for utilizing the solid residue from the cassava starch beneficiation process (cassava starch residue) by proposing a suitable disposal within its life cycle in the production chain. Simultaneously, the design of cementitious matrices (mortars) incorporating cassava starch residue ash (CSRA) is conceived. This research investigated the potential of CSRA as a partial substitute for cement, aiming to enhance the sustainability and performance of cementitious matrices. Characterization tests were performed on CSRA, including FTIR, XRD, EDS, DSC, pozzolanic activity index (PAI), loss on ignition, and moisture content. Furthermore, an investigation of its effects on mortar cementitious matrices' mechanical and physical properties was conducted, including tests for bulk density, compressive strength, diametral compression tensile strength, and water absorption. The compression strength, tensile strength, and absorption tests revealed similar performance between the mortar without substitution and the mortar with 5% cement replacement by CSRA at 28 days of age. Mortar with 10% CSRA showed reduced mechanical strength and increased water absorption and void index. A trend of increased absorption and decreased apparent bulk density was observed as the cement replacement by CSRA increased, suggesting a potential increase in permeability and lower compactness in matrices containing the studied agro residue. However, further research is necessary to optimize the proportions and characteristics of CSRA and its influence on the various properties of cementitious matrices. These findings pave the way for more environmentally conscious approaches in the construction industry, driving the pursuit of more sustainable and practical solutions.

**Keywords:** Agro-waste; agro-cement; cassava mass; starch solid residue; CSRA.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Processo de Fabricação da Fécula de mandioca .....	9
Figura 2 - Processo de fabricação do cimento .....	12
Figura 3 - Esquema do Processo metodológico.....	20
Figura 4 - Demonstração do ensaio de resistência a compressão realizado nos CPs de argamassa.....	37
Figura 5 - Ensaio de tração por compressão diametral do cp. ....	38
Figura 6 - Estágios do resíduo durante o processo de preparo.....	44
Figura 7 – Resultados da variação da massa após ensaio de perda ao fogo. .	45
Figura 8 - Aparência visual do resíduo da fécula após queima em mufla. ....	46
Figura 9 – Curva do espectro de FTIR do pó do bagaço da fécula de mandioca. ....	47
Figura 10 - Curva do espectro de FTIR do CBFM após queima em 650°C e 900°C. ....	47
Figura 11 – Curva de fluxo de calor em função da temperatura obtido por calorimetria diferencial de varredura (DSC) do pó do bagaço da fécula de mandioca e da CBFM após 650°C. ....	48
Figura 12 – Perfis de difração de raios X do CBFM após queima em 650°C e 900°C e 1000°C.....	49
Figura 13 - Padrão de difração de um material pozolânico. ....	51
Figura 14 – Perfil de DRX do CBFM 650°C destacando o halo amorfo. ....	51
Figura 15 - Imagem de microscopia óptica realizada na CBFM após queima a 650°C com magnificação de 5x. ....	56

Figura 16 - Imagem de microscopia óptica realizada na CBFM após queima a 650°C com magnificação de 50x.....	56
Figura 17 - Gráfico de resistência a compressão das argamassas A e B. ....	59
Figura 18 - Gráfico dos resultados do ensaio de absorção nas argamassas...	62
Figura 19 - Gráfico dos resultados do ensaio de índice de vazios nas argamassas.....	63
Figura 20 - Imagem de microscopia óptica realizada na Argamassa piloto, e com 5 e 10% de CBFM. ....	64
Figura 21 – Gráfico dos resultados do ensaio de compressão nas argamassas. ....	66
Figura 22 - Gráfico dos resultados do ensaio de tração por compressão diametral nas argamassas. ....	68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Produção do cimento. ....	13
Quadro 2 - Informações das principais Fecularias Brasil e Mundo. ....	20
Quadro 3 - Nomenclatura, temperatura e tempo de exposição das amostras. ....	25
Quadro 4 - Quantidades do traço para IAP com cal. ....	30
Quadro 5 - Quantidades em massa de material para modelagem dos corpos de prova. ....	31
Quadro 6 - Referências para escolha de traços em argamassas. ....	34
Quadro 7 - Referências para escolha de substituição do cimento pelo agrosíduos. ....	35
Quadro 8 - Quantidade de material para os traços de argamassas. ....	36
Quadro 9 – Resultados da análise composicional via EDX do CBFM queimado a 650°C. ....	52
Quadro 10 - Resultado da análise composicional via EDX para o cimento CP-V (ARI). ....	54
Quadro 11 - Resultados do ensaio de massa específica NM 23/2000. ....	57
Quadro 12 - Resultado IAP com cal para a CBFM. ....	58
Quadro 13 - Comparação das propriedades da CBFM com os limites estabelecidos pela NBR 12653. ....	61
Quadro 14 - Resultados de Massa Específica Seca, Saturada e Real em Argamassas. ....	65

**LISTA DE ABREVEATURA E SIMBOLOS**

#	Mesh
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
kg	Quilograma
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
°C	Graus <i>Celsius</i>
NaCl	Cloreto de sódio
C-S-H	Representação genérica da hidratação do C <sub>3</sub> S (Alita) e C <sub>2</sub> S (Belita)
MPa	Mega Pascal
mL	Mililitro
K	Potássio
Na	Sódio
Ca	Cálcio
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfato
OH <sup>-</sup>	Hidroxila
Fe	Ferro
Al	Alumínio
Si	Silício
Cl <sup>-</sup>	Cloreto
KOH	Hidróxido de potássio
Ca (OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
C	Carbono
e	Elétron
H <sub>2</sub> O	Água
O <sub>2</sub>	Gás oxigênio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro 2
mm	Milímetro
nm	Nanometro
FeOOH	Hidróxido de ferro

**LISTA DE SIGLAS**

a/c	Relação água cimento
AAS	<i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Absorção Atômica)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Associação Americana de Testes e Materiais)
CA	Concreto Armado
CBC	Cinzas do Bagaço da Cana-de-açúcar
CBFM	Cinza do Bagaço da Fécula de Mandioca
CCA	Cinza da casca do arroz
CPs	Corpos de prova
CPV - ARI	Cimento Portland Tipo V – Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EDX	Espectroscopia de raios X por dispersão em energia
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PIB	Produto Interno Bruto
RC	Resistência à Compressão
REF	Referência

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Escopo e Motivação para a pesquisa .....	1
1.2	Objetivos da Pesquisa .....	6
1.2.1	Objetivo Geral .....	6
1.2.2	Objetivos Específicos .....	7
<b>2.</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>8</b>
2.1	Processamento e resíduos da fécula de mandioca .....	8
2.2	Agrocimento .....	10
2.2.1	A produção de cimento .....	11
2.2.2	Resíduos agrícolas na produção de matrizes cimentícias .....	14
<b>3.</b>	<b>3. PROGRAMA METODOLÓGICO DA PESQUISA E ROTEIRO DA TESE .....</b>	<b>19</b>
3.1	Pesquisa realizada junto às fecularias .....	20
3.2	Caracterização do resíduo <i>in natura</i> .....	24
3.3	Produção e caracterização da cinza .....	25
3.3.1	Caracterização por FTIR (Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) .....	25
3.3.2	Caracterização por DRX (Difração de raios X) .....	26
3.3.3	Caracterização por EDX (Espectroscopia de energia dispersiva por raios X) .....	26
3.3.4	Caracterização por DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial) .....	27
3.3.5	Caracterização por Microscopia Óptica .....	28
3.3.6	Massa específica .....	28
3.3.7	Ensaio de Pozolanicidade .....	29
3.4	Produção dos corpos de prova de argamassa .....	33
3.4.1	Materiais .....	33
3.4.2	Traço de argamassa escolhido .....	33
3.4.3	Mistura, molde e cura .....	36
3.5	Análises físicas e mecânicas dos corpos de prova de argamassa .....	37
3.5.1	Ensaio de resistência a compressão (NBR 7215) .....	37
3.5.2	Ensaio de tração por compressão diametral (NBR 7222/2011) .....	38
3.5.3	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica para a argamassa (NBR 9778) .....	39
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>

4.1	Informações sobre a quantidade produzida, gestão do bagaço da fécula de mandioca e a possibilidade de aproveitamento.....	41
4.1.1	Idade e Experiência das Empresas: .....	41
4.1.2	Volume e Processamento da Matéria-Prima: .....	42
4.1.3	Gestão de Resíduos e Sustentabilidade: .....	42
4.1.4	Energia Renovável e Uso Eficiente: .....	42
4.1.5	Desafios na Secagem do Resíduo Sólido: .....	42
4.1.6	Alternativas para o Resíduo: .....	43
4.2	Caracterização do resíduo <i>in natura</i> .....	44
4.3	Produção e caracterização da cinza .....	45
4.3.1	Caracterização por FTIR.....	46
4.3.2	Caracterização por DSC .....	48
4.3.3	Caracterização por DRX.....	49
4.3.4	Caracterização por EDX .....	52
4.3.5	Caracterização por Microscopia.....	55
4.3.6	Massa específica.....	57
4.4	Caracterização de CPs .....	58
4.4.1	Pozolanicidade .....	58
4.4.2	Resultados das análises físicas e mecânicas dos corpos de prova de argamassa ....	61
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXO A .....</b>	<b>89</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Escopo e Motivação para a pesquisa

O aumento populacional e o desenvolvimento tecnológico mundial fizeram com que cada vez mais fosse necessário explorar os recursos naturais, renováveis e não renováveis do planeta, para satisfazer as necessidades humanas recorrentes. Foster, Roberto e Igari (2016), destacam que a interação entre o meio ambiente e a cadeia produtiva ocorre no decurso do processo de incorporação e retirada de materiais e energia. Os mesmos autores ressaltam que o aumento substancial da produtividade aconteceu após a Revolução Industrial no século XVIII, culminando no aumento da extração de recursos naturais e, conseqüentemente, no descarte dos resíduos criados na produção e nos pós consumo.

Estabeleceu-se, a partir daí, uma economia linear baseada na extração-consumo-descarte, que caminha para um cenário de escassez e destruição ambiental. Acentua-se essa problemática com fatores como o crescimento populacional, a incapacidade da natureza de repor os recursos naturais extraídos para satisfazer as necessidades presentes de consumo, e a capacidade atual de gerir todo resíduo produzido pela sociedade (COSENZA; DE ANDRADE; DE ASSUNÇÃO, 2020; SILVA et al., 2021; STEFFEN et al., 2015).

Sabendo-se que as adversidades atreladas aos resíduos sólidos ainda são recorrentes na sociedade, tem-se a necessidade de não somente achar soluções para o descarte correto destes materiais, como também de criar procedimentos capazes de reinseri-los sistematicamente na produção. Um dos conceitos que trabalha a prática de reaproveitamento de recursos descartados no ciclo produtivo é a Economia Circular. A Economia Circular pode ser uma boa alternativa para a gestão dos restos sólidos, contudo, para desenvolvê-la é necessário levantar possíveis usos para os insumos em questão e validar a eficiência ambiental e econômica de cada opção proposta (COSENZA; DE ANDRADE; DE ASSUNÇÃO, 2020; FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016; SILVA et al., 2021).



Assim, a utilização de recursos renováveis, a redução do consumo de recursos não renováveis, o seu reaproveitamento e reciclagem, torna menos agressivo o impacto do homem sobre o meio ambiente. Nesse contexto, a Lei 12.305/2010 do Brasil (BRASIL, 2010) é importante na medida em que prevê a elaboração de planos integrados de gerenciamento de resíduos e recomenda o desenvolvimento de sistemas de gestão que busquem melhorar os processos produtivos e aproveitar os resíduos sólidos. Assim, todo produtor de resíduos deve se preocupar com a quantidade e a qualidade dos resíduos gerados e devem desenvolver planos para gerenciá-los (FIGUEIREDO *et al.*, 2022a; PINTO *et al.*, 2019)

Diante disso, espera-se que o desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos esteja vinculado não apenas a aspectos econômicos, mas também ambientais e sociais, baseados no desenvolvimento sustentável e em modelos cíclicos de produção e consumo que permitam o reaproveitamento de resíduos antes que sejam descartados.

Nesse sentido, a construção civil tem se mostrado capaz de incorporar resíduos e subprodutos em vários de seus segmentos, substituindo agregados naturais por reciclados, utilizando materiais alternativos ao cimento, aproveitando subprodutos industriais e encapsulando resíduos no contexto de políticas que promovem uma economia circular (AUGUSTO JUNIOR *et al.*, 2017; BOTOSSO *et al.*, 2019; CARVALHO BONILHA *et al.*, 2018; FERREIRA *et al.*, 2016; FIGUEIREDO *et al.*, 2022a, 2022b, 2022c; FIGUEIREDO; REIS; MAIA, 2022; FRIOL GUEDES DE PAIVA *et al.*, 2021; GARCIA LODEIRO *et al.*, 2020; PINAFFI *et al.*, 2013).

Contudo, a construção civil também contribui em grande parte para a degradação ambiental, pois o crescimento populacional favorece diretamente o aumento pela demanda por moradias e edificações socialmente utilitárias, levando ao aumento do uso de recursos naturais e a geração de resíduos (MELO; SILVA, 2021). Para a produção de cimento no Brasil, por exemplo, são necessárias cerca de 1,15 toneladas de calcário para produzir uma tonelada de clínquer, que acarreta cerca de 510 kg de CO<sub>2</sub>. Esse valor não leva em consideração o CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustíveis fósseis, cuja

intensidade de carbono ( $\text{CO}_2/\text{J}$ ) é altamente variável (JOHN, 2010).

Em relação ao consumo de energia, o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), informa que para produzir uma tonelada de cimento é gasto cerca de 1MWh, com a produção também de cerca de uma tonelada de  $\text{CO}_2$ . Assim, considerando que no ano de 2021 foram produzidos 66 milhões de toneladas de cimento no Brasil, e na China cerca de 2 bilhões de toneladas em 2022, torna-se alarmante a quantidade nociva equivalentes de  $\text{CO}_2$  emitidos na atmosfera por um setor da construção civil que ainda tem projeções de crescimento, favorecendo direta e indiretamente para o aquecimento global (TRADINGECONOMICS.COM, 2022).

O maior desafio que o indústria do concreto enfrenta durante este século é alcançar um padrão sustentável de crescimento, ou seja, reduzir suas emissões de gases de efeito estufa e extração de recursos naturais enquanto atente a demanda crescente de concreto.

A concepção de um cimento com viés sustentável deveria ser o primeiro objetivo para minimizar o consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Embora o uso de misturas de cimento Portland contendo subprodutos pozolânicos, como agregado moído, escória de alto-forno e cinzas volantes tenha crescido constantemente, quantidades significativas desses subprodutos ainda acabam em aterros sanitários e sub-base de estradas, ou são simplesmente descartados em lagoas.

De acordo com Mehta (2001), há três formas de tornar a indústria do cimento sustentável, sendo elas:

- a) diminuição do consumo de concreto, através da criação e do aprimoramento de projetos estruturais modernos;
- b) diminuição do consumo de cimento no concreto com a inserção de superplastificante, ação que eleva a durabilidade e a resistência mecânica, também assegurando a trabalhabilidade durante a concretagem;
- c) diminuição do consumo de clínquer<sup>1</sup>, trocando parte do cimento da mistura

---

<sup>1</sup> O clínquer é obtido a partir da mistura de matérias-primas, como calcário, argila e minerais contendo sílica, alumina e ferro. O clínquer contém compostos como silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e ferro, são utilizados para produzir o cimento Portland.

por insumos de menor impacto ambiental.

Paralelamente, a crescente industrialização e urbanização têm promovido a poluição por resíduos industriais depositados indiscriminadamente na natureza, ocasionando um aumento significativo da degradação ambiental (HAO *et al.*, 2020; KELES, 2011; RAIHAN *et al.*, 2022). Um dos maiores desafios é determinar a destinação e o uso adequado desses resíduos.

Reciclar e usar subprodutos industriais como aditivos ao cimento Portland, economiza energia e contribui para uma menor exploração dos recursos naturais. O uso de subprodutos da indústria é de grande interesse na produção, pois pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> diretamente na produção de cimento e concreto (BELLMANN; STARK, 2009; BENITTEZ, 2020; GUPTA; SIDDIQUE; BELARBI, 2021; KELES, 2011; SANTHOSH; SUBHANI; BAHURUDEEN, 2021).

Nesse contexto, um resíduo que atualmente é gerado em grande quantidade no Brasil, que possui potencial para adquirir características compatíveis às da construção civil e ainda carece de pesquisas e aplicações é o bagaço da fécula de mandioca, subproduto do beneficiamento da mandioca para produção da fécula. Coelho *et al.* (2020), constataram que a análise da composição química do bagaço da mandioca não tem sido estudada e aproveitada, reduzindo o encontro de possíveis potenciais do material.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a alimentação – FAO, a produção mundial de mandioca no ano de 2018 foi de 277,8 milhões de toneladas. A estimativa da produção brasileira de raiz de mandioca para o ano de 2023, de acordo com o Levantamento Sistemático da Produção (LSPA) de maio de 2023, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, é de 18,40 milhões de toneladas. Comparando-se com 2022, em que a produção foi de 18,2 milhões de toneladas, os dados apontam um crescimento de 1,10% (NACIONAL, 2023).

O Brasil encontra-se entre os maiores produtores mundiais de fécula de mandioca, atrás apenas da Nigéria, com uma produção de aproximadamente 47 milhões de toneladas, Tailândia, com 30 milhões de toneladas, e Indonésia, com 23 milhões de toneladas (ALBUQUERQUE, 2022).

Entretanto, o processamento da mandioca e os resíduos gerados nas

diferentes etapas do processo representam fontes de contaminação ambiental e são considerados como pontos críticos de desperdício dentro do processo produtivo (BARROS; SANTOS; BATISTOTE, 2019; OLIVEIRA, 2013).

Existe um desconhecimento por grande parte das empresas processadoras de mandioca sobre o balanço dos seus processos produtivos, não possuindo dados qualitativos e quantitativos quanto às perdas sólidas e líquidas (AMARAL; JAIGOBIND; JAISINGH, 2007).

Quando se trata de resíduos líquidos, compostos pela água de extração da fécula e a manipueira, podem ser considerados como problema ambiental, já que para a extração do amido é adicionada água, o que reduz sua carga orgânica e teor de cianeto, mas aumenta consideravelmente o volume (BOTELHO, 2019; GONÇALVES; RAMALHO, 2021; JESUS, 2022). Posteriormente, parte desse resíduo líquido é enviado ao sistema de tratamento de efluentes, contudo, a maior parte é lançada diretamente no meio ambiente sem tratamento, causando impactos ambientais (PEIXOTO; RESCH, 2018; VILHALVA et al., 2011).

O resíduo sólido, por sua vez, denominado como massa ou bagaço de mandioca, é constituído por material fibroso da raiz e 85% de água. Do ponto de vista econômico, não existe nenhum método amplamente aceito como viável, e que, poderia ser utilizado em larga escala pelas empresas processadoras de fécula de mandioca no Brasil, com o objetivo de recuperar o máximo de amido possível e processar os subprodutos da conversão do bagaço. Apenas uma pequena parte é destinada à complementação alimentar de animais por um simbólico valor comercial, pois além do teor de umidade do bagaço, e da dificuldade de transporte e armazenamento, este material é altamente perecível e só é utilizado pelos produtores na falta de ração ou pasto como complementação alimentar (PEIXOTO; RESCH, 2018; WOICIECHOWSKI et al., 2013).

Assim, combinar a possibilidade de descobrir novos usos para o bagaço da fécula de mandioca, juntamente com a necessidade de minimizar os efeitos negativos no meio ambiente causados pela indústria da construção civil ao buscar materiais, parece se apresentar como uma opção viável.

O cimento é o principal constituinte do concreto e das argamassas. Para

resolver e minimizar os problemas ambientais, pesquisas buscam aproveitar a grande disponibilidade de resíduos agrícolas, como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha de cana-de-açúcar, óleo de palma, entre outros; e finalmente trazer soluções sustentáveis aliadas as propriedades admissíveis do concreto. Inserir resíduos industriais ou agroindustriais na argamassa e no concreto é uma ação eficaz na resolução dos problemas ambientais e do gerenciamento de resíduos (BARROSO, 2011; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007; HE; KAWASAKI; ACHAL, 2020) (HE; KAWASAKI; ACHAL, 2020).

Barroso (2011) e Reis *et al.* (2020) apontam que o reaproveitamento dos resíduos agroindustriais na fabricação do cimento é um ato relevante na realidade brasileira, tendo em vista as quantidades consideráveis produzidas todo ano no país. A queima desses resíduos provoca a calcinação e gera cinzas que podem conter sílica e, por conseguinte, adquirir propriedades pozolânicas<sup>2</sup> (BARROSO, 2011; NEVILLE, 2016; REIS *et al.*, 2020). A adição de subprodutos agroindustriais, ainda, pode melhorar as propriedades dos compósitos produzidos e reduzir o consumo de clínquer por metro cúbico do concreto ou da argamassa, reduzindo assim o consumo de matéria prima e as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O uso de aditivos pozolânicos podem além de reduzir os custos apresentar uma melhora das propriedades físicas e mecânicas das estruturas de concreto (RESENDE, 2013).

## **1.2 Objetivos da Pesquisa**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa foi apresentar uma solução para alta demanda de bagaço de fécula de mandioca produzidos diariamente nas

---

<sup>2</sup> As propriedades pozolânicas estão relacionadas a certos materiais que têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio (cal) liberado durante a hidratação do cimento Portland, formando novos compostos com características ligantes. Esses materiais são chamados de pozolanas e são frequentemente usados como adições ao cimento para melhorar suas propriedades.

fecularias, propondo-lhe uma destinação adequada no seu ciclo de vida dentro da sua cadeia produtiva paralelamente a concepção de matrizes cimentícias.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Realizar uma pesquisa com as empresas produtoras da fécula de mandioca para obter informações sobre a gestão do bagaço da fécula de mandioca e a quantidade produzida;
- Caracterizar o resíduo em seu estado *in natura*;
- Definir o melhor processo para obtenção da cinza;
- Produzir corpos de prova de argamassa com substituição de 5 e 10% de cinza no cimento;
- Caracterizar o compósito cimentício com resíduo;
- Analisar fisicamente e mecanicamente os corpos de provas;
- Apresentar a melhor solução encontrada com base na pesquisa desenvolvida.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 Processamento e resíduos da fécula de mandioca

A *Manihot esculenta* Crantz, também conhecida como mandioca, aipim ou macaxeira é uma planta cultivada amplamente na América Latina, África e nas regiões tropicais da Ásia, como uma importante fonte de alimento.

A produção mundial de mandioca é de cerca de 277 milhões de toneladas por ano, com a África sendo o maior produtor. A mandioca tem uma vantagem competitiva e se tornou um dos principais alimentos energéticos, sendo considerada a terceira maior fonte de calorias depois do arroz e do milho (VILHALVA *et al.*, 2011).

A mandioca é utilizada em muitos pratos típicos da culinária brasileira e é uma fonte importante de carboidratos, fibras, amido, gorduras, proteínas e vitaminas para muitas comunidades rurais.

A região sul do Estado de Mato Grosso do Sul, além de apresentar clima e solos adequados para o cultivo da mandioca, concentra também o parque industrial processador desta tuberosa. Esta região, juntamente com os estados do Paraná e São Paulo, constituem a maior região produtora de fécula de mandioca do país (PARANÁ, 2020).

Além da produção de fécula, a mandioca também é utilizada na produção de farinha, óleo e outros produtos e subprodutos do processo de industrialização que podem ser utilizados como matéria-prima para indústrias da construção (GIN *et al.*, 2014; OGUNBODE, 2012).

A fécula é um tipo de amido, utilizado como espessante e estabilizante em diversos alimentos e bebidas. É obtida a partir de fontes como batatas, milho, arroz e mandioca entre outros tubérculos. A fécula é solúvel em água, tem uma textura suave e transparente e é amplamente utilizada em cozinhas industriais e caseiras.

A fécula de mandioca é produzida a partir da extração do amido da raiz da mandioca. O processo envolve cinco passos que também são esquematizados na Figura 1:

1. Preparação da mandioca: a lavagem e descascamento da

mandioca são realizados para remover as impurezas e a casca.

2. Moagem: a mandioca é cortada em pequenos pedaços e moída para liberar o amido.

3. Extravação do amido: a polpa resultante da moagem é centrifugada para separar o amido do suco.

4. Lavagem: o amido é lavado para remover as impurezas restantes.

5. Secagem: o amido é secado e moído para formar a fécula de mandioca<sup>3</sup>.

Figura 1- Processo de Fabricação da Fécula de mandioca



Fonte: O autor.

Os resíduos gerados no processo incluem o suco residual da centrifugação (manipueira), a casca descartada da mandioca e as impurezas removidas durante a lavagem do amido (bagaço da fécula da mandioca).

Durante o processo de industrialização da mandioca, são gerados cerca de 300 a 600 L de águas residuais por tonelada de raiz processada (MADEIRA *et al.*, 2017; MAGDALENA *et al.*, 2010). Nesse processo são criados cerca de

<sup>3</sup> Depois de retirado o amido, o bagaço passa por um ciclo complementar de peneiras rotativas para baixar a umidade. Algumas fecularias secam o bagaço da fécula em fornos.



929 kg de bagaço com umidade de 85%, constituído de 79% de amido, 15% de fibras, 2% de proteína, 1% de açúcares, 0,8% de matéria graxa e 2,2% não determinados, expressos em base seca (FIORDA; SOARES; JÚNIOR, 2013).

Apenas cerca de 20 a 30% da produção mundial de raiz de mandioca não é processada, ou seja, 70% ou mais são industrializadas (SOUZA *et al.*, 2021). A produção média anual brasileira está entre 18 a 22 milhões de toneladas aproximadamente (NACIONAL, 2022; SOUZA, 2021), isso corresponde a geração mínima de 5.400 milhões de litros (L) de resíduo líquido (manipueira), e praticamente 16,7 milhões de toneladas de resíduo sólido (bagaço da fécula de mandioca) por ano.

Neste contexto, as preocupações com as mudanças climáticas, com a preservação dos recursos naturais e com o reaproveitamento de resíduos agroindustriais para geração de energia, vão além das questões energéticas e se candidata como uma possível solução para adequar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), transformando passivos ambientais em ativos econômicos.

As tecnologias disponíveis para o aproveitamento energético desses resíduos agroindustriais são através da incineração, uso do biodigestor com aproveitamento do biogás e a gaseificação (SOUZA *et al.*, 2021).

Atualmente, a maioria das fecularias lança a manipueira da mandioca numa lagoa, que é coberta para reter o gás metano produzido com a decomposição da matéria orgânica. Posteriormente esse gás é queimado para aquecer as caldeiras dos secadores da indústria atendendo parcialmente sua demanda energética nas caldeiras (WATTHIER *et al.*, 2019).

## **2.2 Agrocimento**

Devido ao alto custo dos constituintes convencionais da argamassa e do concreto, como o cimento, os desafios ambientais e a exploração excessiva dos recursos naturais exigiram a procura de alternativas viáveis para a indústria da construção (OGBONNA; MBADIKE; ALANEME, 2020). Como resultado do uso massivo compósitos cimentícios, alguns resíduos de produtos de concreto e argamassas são descartados, uma vez que a maioria deles não é reciclável.

O consenso de que os recursos naturais são limitados sugere a necessidade de seu reaproveitamento, ocasionando um aumento significativo nas pesquisas relacionadas ao aproveitamento de resíduos. Nesse sentido, pesquisas na área da construção civil tem grande importância no estudo de materiais para a inclusão destes resíduos na composição, principalmente, do cimento. Estudos como o uso da cinza de madeira no concreto (TAMANNA *et al.*, 2020; TEIXEIRA; CAMÕES; BRANCO, 2019), concreto com cinza de casca de amendoim (CHANDRAMOULI *et al.*, 2022), cinza de sabugo de milho no concreto (OLAFUSI; OLUTOGE, 2012; PATEL *et al.*, 2020), concreto com cinza de casca de mandioca (OGBONNA; MBADIKE; ALANEME, 2020; OLUBUNMI A; TAIYE J.; TOBI, 2022), concreto com a cinza do bagaço da cana de açúcar (AHMAD *et al.*, 2021; RODRÍGUEZ-DÍAZ *et al.*, 2015), concreto com a cinza da casca do arroz (MOUNIKA; BASKAR; SRI KALYANA RAMA, 2022; WANG *et al.*, 2021) e areia para fornecer um concreto de bom desempenho (OGBONNA; MBADIKE; ALANEME, 2020).

Materiais cimentícios suplementares, extraídos de resíduos sólidos industriais agrícolas com comportamento pozolânico, ajudam a substituir parcialmente a quantidade de cimento Portland usado na produção de concreto, aumentando assim a recuperação e reutilização de resíduos sólidos e seus derivados para infraestrutura de engenharia sustentável (OGBONNA; MBADIKE; ALANEME, 2020; ONYELOWE *et al.*, 2019). Também ajuda a gerenciar os impactos econômicos e ambientais associados ao descarte diferenciado desses resíduos industriais/agrícolas. Reciclar e reutilizar esses resíduos pode ajudar a fornecer alternativas mais viáveis e promissoras, especialmente na área de produção sustentável e verde de material de concreto (ALANEME GEORGE; MBADIKE ELVIS, 2019).

### **2.2.1 A produção de cimento**

O cimento Portland, ou somente cimento, ganhou espaço na construção civil mundialmente, principalmente pelo fato de que as matérias primas necessárias para a sua fabricação são encontradas em praticamente todos os países (NEVILLE, 2016).

O processo de fabricação do cimento consiste em termos práticos e técnicos na moagem da matéria prima e na queima a altas temperaturas (cerca de 1450°C) em fornos rotativos onde o material é calcinado formando o clínquer. A síntese do clínquer pode ser realizada por dois processos principais: via úmida ou via seca, dependendo da umidade das matérias primas (IBC, 2012). Após o resfriamento é adicionado ao material uma pequena concentração de sulfato de cálcio retornando a moagem (NEVILLE, 2016). A ilustração das etapas da produção do cimento pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Processo de fabricação do cimento



Fonte: (OLIVEIRA, 2020).

Assim, a composição química do cimento é em sua maioria representada pelo calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Com exceção de uma pequena parcela de resíduo do óxido de calcário, esses elementos interagem entre si na formação de produtos mais complexos. É importante destacar que a velocidade de resfriamento interfere no grau de cristalização e o percentual de material

amorfo presente no clínquer frio. As propriedades do material amorfo, diferem completamente dos compostos cristalinos de mesma composição química (NEVILLE, 2016).

A produção de cimento no Brasil foi de aproximadamente 61 milhões de toneladas em 2020, e 66 milhões de toneladas em 2021. O Quadro 1, apresenta os dados de produção de cimento no primeiro trimestre dos anos de 2020, 2021 e 2022 em nível de país (Brasil), região (Centro-oeste) e estado (Mato Grosso do Sul).

Quadro 1 - Produção do cimento.

<b>Produção de cimento no primeiro trimestre (tonelada)</b>			
<b>Ano</b>	2020	2021	2022
<b>Brasil</b>	12.854.090	15.229.426	14.656.391
<b>Centro-Oeste</b>	1.310.771	1.628.593	1.656.284
<b>Mato Grosso do Sul</b>	157.117	188.365	211.417

**Fonte:** Adaptado a partir do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2022a).

Na China a produção de cimento que já chegou a aproximadamente 2,5 bilhões de toneladas é estimada em cerca de 2 bilhões de toneladas anuais nos dois últimos anos (2021 e 2022) (TRADINGECONOMICS.COM, 2022).

Nota-se a partir da interpretação dos dados do Quadro 1 que em 2021 houve um crescimento para as três regiões em análise: Brasil (18%), Centro-Oeste (24%) e Mato Grosso do Sul (20%). O primeiro trimestre de 2022 apresentou uma ligeira queda de 4% aproximadamente em relação ao ano de 2021, embora ainda apresente valores de produção superior ao do ano de 2020 (SNIC, 2022b). Destaca-se que apesar da ligeira queda no primeiro trimestre de 2022 em termos de Brasil, o Centro Oeste obteve um modesto crescimento de 1,7% em relação ao primeiro trimestre de 2021. O estado de Mato Grosso do Sul se sobressaiu com um crescimento de aproximadamente 12% na produção de cimento.

Durante o processo de fabricação do cimento, há três fontes principais de emissão de dióxido de carbono que totalizam aproximadamente 1 tonelada de

emissão de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de cimento fabricada. Cerca de 525 kg/ton CO<sub>2</sub> são liberados na descarbonatação do calcário (aproximadamente 1500 kg de matéria prima), 325 kg/ton CO<sub>2</sub> são gerados no forno de combustão de combustível e outros 50 kg/ton CO<sub>2</sub> produzidos no durante o consumo de energia (MAMATHA; NARAYANA; KUMAR, 2017; ÖZBAY; ERDEMIR; DURMUŞ, 2016). O cimento é o terceiro material no mundo que mais consome energia, atrás apenas do aço e do alumínio, primeiro e segundo respectivamente (TEJA; SAI; MEENA, 2017).

### **1.2.2 Resíduos agrícolas na produção de matrizes cimentícias**

Reações pozolânicas são entendidas como aquelas em que há uma reação mineral com o hidróxido de cálcio durante a hidratação, formando-se cálcio hidratado no cimento. Alguns resíduos agrícolas possuem propriedades pozolânicas que ajudam a melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios, já que estes resíduos apresentam lignina e celulose, que podem ser convertidas em sílica e proporcionar uma reação pozolânica. Quando a cinza do resíduo agrícola é misturada ao cimento Portland, ele reage com a cal, reduzindo assim a quantidade de cal necessária para uma concentração adequada de cálcio no cimento. Em contrapartida, a quantidade de gel CSH aumenta, melhorando assim a qualidade do cimento (AREL; AYDIN, 2018; SHAMEEM BANU; KARTHIKEYAN; JAYABALAN, 2020).

Devido as finas partículas da cinza do resíduo agrícola, a porosidade da matriz cimentícia durante a reação química também diminui. Assim, o cimento, a partir da cinza do resíduo agrícola (agrocimento), preenche uma quantidade maior de vazios com hidratação e forma uma estrutura mais densa, com a formação de gel CSH adicional possibilitando uma ligação forte na matriz, aumentando a capacidade de resistência do concreto a compressão (HE; KAWASAKI; ACHAL, 2020).

Como o cimento agrícola contém grande quantidade de sílica, aumenta a possibilidade de reação com moléculas de água na matriz do cimento para formar Ca(OH)<sub>2</sub>, aumentando assim a resistência do concreto. Além disso, o silicato de cálcio hidratado (CSH), forma-se ao redor dos grãos de areia,

influenciando na distribuição do tamanho dos poros da matriz (AREL; AYDIN, 2018). O cimento agrícola contendo partículas finas de SiO<sub>2</sub> melhora a estrutura porosa do concreto porque essas partículas são distribuídas homoganeamente na matriz de agregados de cimento (JAYA PRITHIKA; SEKAR, 2016).

As contribuições da cinza da casca do arroz (CCA) para o sistema cimentício, por exemplo, se refletem principalmente no aumento da resistência à compressão conforme (ANTIOHOS; PAPADAKIS; TSIMAS, 2014; BIE *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2021) e na melhoria da durabilidade, resistência à penetração de cloretos e resistência ao sulfato (LE; SIEWERT; LUDWIG, 2015; ZAHEDI; RAMEZANIANPOUR; RAMEZANIANPOUR, 2015). Os teores 10%, 15% e 20% de cinza da casca de arroz em substituição do cimento foram ótimos para a melhora das propriedades físicas e mecânicas.

Já o bagaço da cana de açúcar, outro resíduo agrícola amplamente estudado, quando queimado a temperaturas de 600-800°C, produz uma cinza rica em sílica amorfa com excelentes propriedades pozolânicas. É importante destacar que a quantidade de sílica nas cinzas varia de acordo com fatores como o tempo e temperatura de incineração, tipo de solo e as propriedades da própria matéria prima (KUMARI; KUMAR, 2015). Srinivasan e Sathiya (2010), realizaram um experimento em que examinaram o efeito do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como substituto do cimento no concreto em acréscimos graduais de 5% de substituição em traços que variaram de 5% até 25% em peso. Os resultados mostraram que o concreto com 5% e 10% de CBC como substituto do cimento apresentou maior resistência à compressão (aproximadamente 37% e 15% respectivamente) do que o concreto de referência (piloto). Os autores concluíram que 5 % de CBC foi a taxa de substituição ideal para o concreto C20 (resistência característica de 20 MPa aos 28 dias de idade).

A melhora na resistência à compressão pode ser atribuída ao efeito de preenchimento, devido ao menor tamanho de partícula, e à reação pozolânica, respectivo à presença de sílica amorfa na CBC, e justificam a redução da resistência a compressão em teores de substituição maiores de 10%, alegando que quantidade de sílica amorfa na mistura era maior do que a quantidade necessária para reagir com o Ca(OH)<sub>2</sub> produzido durante a reação de hidratação,

reduzindo assim a resistência geral da amostra (SRINIVASAN; SATHIYA, 2010).

Outros autores como Kiran e Kishore (2017) e Ranjith, Sanjith e Kiran (2015) também constaram que a melhor porcentagem de substituição da CBC no cimento Portland é de 5%. Ahmad et al (2021), observaram que a maioria dos pesquisadores definiu que a taxa de substituição ideal da CBC é de 10%, embora na literatura registrem algumas pesquisas que observaram 5% e 15% de CBC como a taxa de substituição ideal.

Bagcal e Baccay (2019), investigaram a utilização da cinza do sabugo de milho como material cimentício suplementar, através da avaliação das propriedades mecânicas de argamassas de cimento para obras de construção civil. A cinza do milho foi adicionada à mistura em proporções variáveis de 0% a 20% com um fator  $a/c^4$  de 0,6. Os resultados apontaram para um aumento no tempo de pega, com diminuição da plasticidade da massa. Os resultados de resistência à compressão mostraram a queda da resistência com o incremento da cinza do milho no traço de concreto. Adebisi et al (2019), em seu trabalho de revisão sobre as cinzas de sabugo de milho, constatou uma substituição média ótima permitida de cimento por cinza de sabugo de milho de 14%.

Nos últimos tempos, esforços têm sido direcionados para a utilização da mandioca como material pozolânico, em substituição ao cimento na produção de concreto. A reutilização das cinzas do processamento da mandioca ajudaria a resolver entre outros problemas, a poluição ambiental (OLUBUNMI A; TAIYE J.; TOBI, 2022). Salau, Ikponmwoşa e Kolawole (2012), avaliaram as propriedades de resistência do concreto misturado com cimento da cinza da casca da mandioca (CCM) calcinada a 700°C por 90 minutos. Com incremento de 5% do cimento substituído parcialmente em uma proporção que variou de 5 a 25%. As propriedades de resistência à compressão do concreto misturado com cimento da CCM aumentaram com o período de hidratação, mas as propriedades de resistência diminuíram com o aumento do teor de CCM. O aumento da CCM necessitava uma quantidade maior de água para obter uma trabalhabilidade adequada do concreto.

---

<sup>4</sup> Fator  $a/c$  – É a relação entre a massa de água (a) e a massa de cimento (c) utilizado na mistura.

Ogbonna, Mbadike e Alaneme (2020), investigaram misturas de concreto com proporções variáveis de substituição da cinza da casca da mandioca, variando de 0 a 40%, a fim de verificar a resistência à flexão e à compressão em diferentes períodos de hidratação (de 3 dias a 90 dias). O  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fornecidos pela cinza da casca da mandioca reagem com  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ocorre quando o  $\text{CaO}$ , principal radical livre do cimento, é hidratado). A cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) irá então reagir com o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para formar uma propriedade de ligação que é alcançada através da reação pozolânica (OGBONNA; MBADIKE; ALANEME, 2020). Por meio da avaliação estatística para avaliar o efeito da CCM como material cimentício e da avaliação experimental, o traço que apresentou os melhores resultados foi uma taxa de substituição de 5%.

Ibrahim et al (2020), estudaram as propriedades físicas, morfológicas e térmicas do amido de mandioca (AM), casca de mandioca (CM) e bagaço de mandioca (BM) obtidos de plantas da Malásia. Estudos de características térmicas usando analisador termogravimétrico (TGA) e calorimetria exploratória diferencial mostraram que o amido, a casca e o bagaço da mandioca eram termicamente estáveis com um ponto de fusão de  $172,87^\circ\text{C}$ ,  $177,76^\circ\text{C}$  e  $169,23^\circ\text{C}$ , respectivamente. O estudo da superfície morfológica indicou que os amidos de mandioca eram arredondados e ovalados, bagaço de forma poligonal, e a casca exibia tanto arredondamento quanto poligonal.

Adam et al (2022), constataram em sua pesquisa que os traços de concreto contendo farinha de mandioca são mais fortes que o traço de controle em termos de resistência à compressão. O teor de mandioca de 3% resultou no maior ganho de resistência à compressão de 31,88%, ganho de resistência à tração na flexão de 15,78% e na diminuição da absorção de água à medida que o teor de farinha de mandioca aumentou na mistura.

Outros estudos como a investigação do efeito da fécula de mandioca nas características de retração do concreto usando farinha de mandioca em até 2% de substituição do peso do cimento conduzido por Akindahunsi e Schimidt (2017), e o efeito da fécula de mandioca e da cinza da casca de arroz nas propriedades físicas e mecânicas do concreto contendo 2% de fécula de mandioca adicionada em peso de cimento, e 20% de cinza de casca de arroz



em substituição ao cimento onde a cinza da casca do arroz foi incinerado a temperatura de 650 °C realizado por (KONE; MWERO; RONO, 2022), obtiveram resultados satisfatórios para substituição de 1% de fécula de mandioca e 10% para a cinza da casca do arroz, obtendo resultados superiores a resistência da referência.

No estudo de AKINDAHUNSI E SCHMIDT (2017), a fécula de mandioca afetou positivamente a resistência à compressão e conferiu mais rigidez na forma de coesão e estabilidade, resultando em menor retração no concreto e, para Kone *et al.* (2022), a trabalhabilidade do concreto diminuiu o tempo de pega foi prolongado e as resistências à compressão e à tração foram melhoradas em comparação com as amostras de mistura de controle. Outro resultado importante constatado por Salau *et al.* (2012) foi a resistência a compressão aos 28 dias para as substituições de 5, 10 e 15% obtiveram 83, 82 e 79% da resistência do padrão de análise (piloto). Entretanto, após 120 dias de cura, a resistência aumentou com a idade proporcionando resistência à compressão muito próxima do concreto padrão com desempenho de 99, 95 e 87% da resistência do piloto, indicando que, com um tempo maior de cura, o concreto com a CCM apresenta condições de igualar ou mesmo superar as propriedades do concreto apenas com cimento Portland (SALAU; IKPONMWOSA; KOLAWOLE ADISA OLONODE, 2012).

Olubunmi, Taiye e Tobi (2022), investigaram a substituição parcial do cimento por cinzas de madeira e da cinza da casca de mandioca na produção de concreto. Os autores concluíram que a resistência à compressão adequada do concreto com material pozolânico, como cinza de madeira e cinza de casca de mandioca, pode ser alcançada substituindo 5%, 10% e 15%, do cimento, enquanto a substituição de 20% e 25% não resultará em um concreto adequado em conformidade com a norma britânica e nem com a norma brasileira, que afirma que todo concreto estrutural não deve ter resistência inferior à 20 MPa aos 28 dias de idade (ABNT, 2014). Assim, chegaram à conclusão de que o uso de cinza de casca de mandioca e cinza de madeira pode reduzir consideravelmente a quantidade de cimento usado em produção de concreto quando parcialmente substituído por cimento Portland comum.

Portanto, diante de tantos casos na literatura de agrosólidos com resultados promissores quando inseridos em matrizes cimentícias (argamassas e concretos), o estudo do uso da CBFM em substituição ao cimento, se apresenta como uma alternativa plausível e com potencial inexplorado e desconhecido.

### **3. PROGRAMA METODOLÓGICO DA PESQUISA E ROTEIRO DA TESE**

Do ponto de vista da sua natureza, a metodologia utilizada classifica-se como uma pesquisa aplicada, ou seja, tem o objetivo de gerar conhecimento para aplicação prática a solução de um problema específico, no caso, solução para destinação/uso do resíduo sólido da produção da fécula de mandioca (SILVA; MENEZES, 2005).

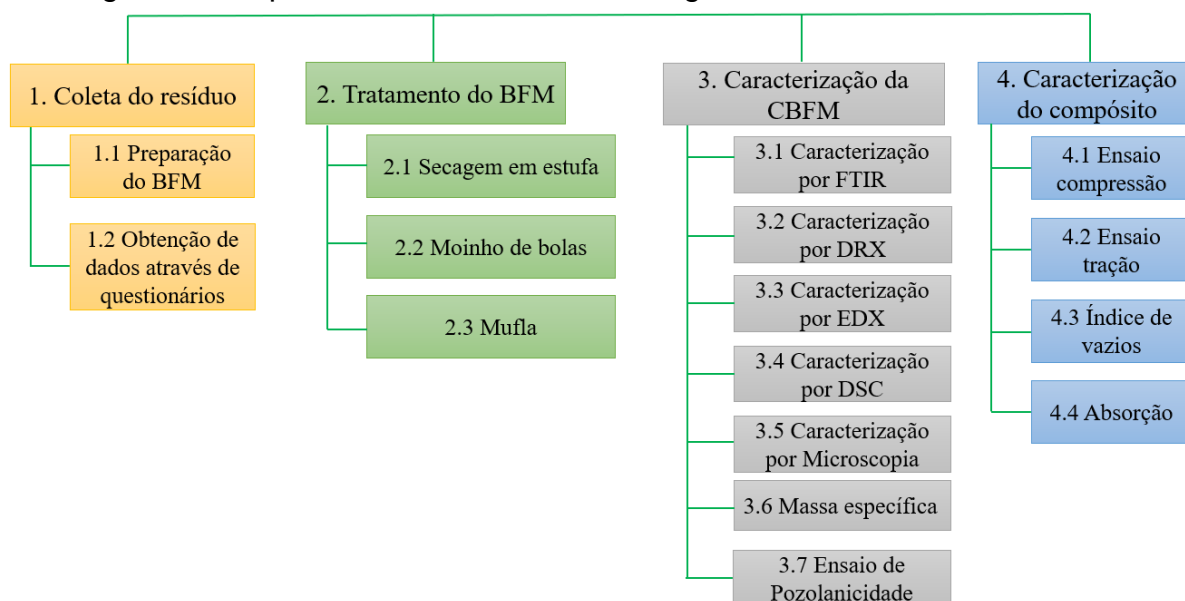
Com relação à abordagem do problema, a pesquisa tem caráter quantitativo e qualitativo. Quantitativo, pois visa fornecer dados estatísticos da análise dos resultados da produção e uso da CBFM, e qualitativo, pois considera a relação dinâmica entre o problema e o sujeito e suas interpretações subjetivas dos acontecimentos (SILVA; MENEZES, 2005).

A metodologia, na perspectiva de seus objetivos, pode ser classificada como uma pesquisa explicativa, isso porque visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos analisados (GIL, 2002).

Por fim, quanto à natureza da pesquisa em relação aos procedimentos técnicos utilizados, a metodologia aplicada consiste em um estudo experimental comparativo que altera uma variável (a substituição do cimento por Cinza do Bagaço da Fécula de Mandioca - CBFM) e assim permite delimitar o fenômeno, formular hipóteses, determinar métodos e submeter o fenômeno a condições de controle de experimentação (LAKATOS; MARCONI, 2017).

Para atingir os objetivos estabelecidos neste estudo, o programa experimental foi dividido em quatro etapas, conforme indicado na Figura 3, e descritos detalhadamente nas seções seguintes.

Figura 3 - Esquema do Processo metodológico.



Fonte: O autor.

### 3.1 Pesquisa realizada junto às fecularias

Para realizar a pesquisa junto às fecularias, inicialmente foi realizado um levantamento das principais empresas em funcionamento no Brasil, totalizando 28 empresas, sendo 6 empresas pertencentes ao estado de Mato Grosso do Sul, 9 empresas do estado do Paraná, 6 do estado de São Paulo, 2 de Santa Catarina, 2 do estado de Minas Gerais, 1 da Bahia, 1 de Goiás e 1 de Mato Grosso. No exterior, foram catalogadas 1 empresa da Nigéria (maior produtor de fécula do mundo), 10 empresas na Tailândia (segundo maior produtor) e 1 da Indonésia (terceiro maior produtor). Os detalhes de cada empresa estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Informações das principais Fecularias Brasil e Mundo.

Nº	NOME	CONTATO	LOCALIZAÇÃO	SITE
01	Fecularia Pantanal	sac@feculariapantanal.com.br	Ivinhema - MS	<a href="http://feculariapantanal.com.br/">http://feculariapantanal.com.br/</a>
02	Copasul	copasul@copasul.coop.br	Naviraí - MS	<a href="http://copasul.coop.br/">http://copasul.coop.br/</a>
03	Cassava S/A	sac@cassava.com.br	Glória de Dourados -MS	<a href="https://www.cassava.com.br/">https://www.cassava.com.br/</a>

04	Fecularia Loanda	<a href="http://fecularialoanda.com.br/contato">http://fecularialoanda.com.br/contato</a>	Loanda PR	<a href="http://fecularialoanda.com.br">http://fecularialoanda.com.br</a>
05	Fecularia Subida	subida@opcaonet.com.br	Nova Santa Rosa - PR	<a href="https://www.feculariasubida.com.br/">https://www.feculariasubida.com.br/</a>
06	Fecularia Amidos Mundo Novo	Fone +55 (67) 3474-2990 +55 (67) 99938-2271 contato@mundonovo.ind.br	Mundo Novo - MS	<a href="http://www.amidosmundonovo.com.br/">http://www.amidosmundonovo.com.br/</a>
07	Fecularia Pasquini	Fone: +55 44 3252-4121 comercial@amidospasquini.com.br qualidade@amidospasquini.com.br	Nova esperança - PR	<a href="http://www.amidospasquini.com.br/">http://www.amidospasquini.com.br/</a>
08	Fecularia Siriema	67)34831341 (67)99768350	Cel. Sapucaia - PR	<a href="https://fecularia-siriema.negocio.site/">https://fecularia-siriema.negocio.site/</a>
09	Fecularia 3 Fronteiras	(44) 3432-1136	Itaúna do Sul - PR	<a href="http://3fronteiras.ind.br/">http://3fronteiras.ind.br/</a>
10	Amifec	55 44 3432-1080 falecom@amifec.com.br	Maria Helena - PR Nova Olimpia - PR	<a href="https://www.amifec.com.br/">https://www.amifec.com.br/</a>
11	Alimentos Lopes	(44) 3432-1466 (Matriz) (44) 3432-1435 <a href="https://alimentoslopes.com.br/fale-conosco">https://alimentoslopes.com.br/fale-conosco</a>	Nova Londrina - PR Acaírama - PR	<a href="https://alimentoslopes.com.br/">https://alimentoslopes.com.br/</a>
12	Incol	+55 44 3432-8800 incol@incol.com.br	Nova Londrina PR	<a href="http://www.incol.com.br/site/">http://www.incol.com.br/site/</a>
13	PODIUM ALIMENTOS	Fones: 44 3421-5000 / 44 3421-5010 <a href="https://podiumalimentos.com.br/contato/">https://podiumalimentos.com.br/contato/</a>	Tamboara – PR Laje – BA	<a href="https://podiumalimentos.com.br/">https://podiumalimentos.com.br/</a>
14	Pilão Amidos Ltda	<a href="http://pilaoamidos.com.br/paginas/contato">http://pilaoamidos.com.br/paginas/contato</a>	Guaíra - PR	<a href="http://pilaoamidos.com.br/">http://pilaoamidos.com.br/</a>
15	Comasan	comercial@comasan.com.br (65) 99604-7775	Paranatinga - MT	<a href="http://www.comasan.com.br/">http://www.comasan.com.br/</a>

16	FEBELA AGROINDUSTRIA LTDA	febela@febela.com.br (62)3551-2021 (62)3239-1400	Bela Vista de Goiás - GO	<a href="http://febela.solosite.com.br/home">http://febela.solosite.com.br/home</a>
17	Bahiamido S/A	(71) 3206-1150	Laje - BA	<a href="https://www.solutudo.com.br/empresas/ba/laje/industria-alimenticia/bahiamido-16666420">https://www.solutudo.com.br/empresas/ba/laje/industria-alimenticia/bahiamido-16666420</a>
18	Fecularia Ouro Branco	(48) 3534-1212	Santa Rosa do Sul - SC	<a href="https://applocal.com.br/empresa/fecularia-ouro-branco/santa-rosa-do-sul/sc/306875">https://applocal.com.br/empresa/fecularia-ouro-branco/santa-rosa-do-sul/sc/306875</a>
19	Fecularia Scheffer Ltda	4835399139	Vila Conceição - SC	<a href="https://www.scheffer.agr.br/">https://www.scheffer.agr.br/</a>
20	Fecularia Mani	faleconosco@casamani.com.br	Ocaçu - SP	<a href="http://www.casamani.com.br/">http://www.casamani.com.br/</a>
21	Fecularia TechnoAmido Indústria e Comércio de Amidos e Derivados	technoamido@technoamido.com.br +55 14 3377-7206	São Pedro do Turvo - SP	<a href="https://site.technoamido.com.br/">https://site.technoamido.com.br/</a>
22	Fecularia Flor De Lotus	T: (18) 3341-2828 / 3341-1521 contato@feculaflordelotus.com.br T: (18) 3341-5373	Cândido Mota - SP	<a href="https://www.feculaflordelotus.com.br/">https://www.feculaflordelotus.com.br/</a>
23	Fecularia Rio Preto	(35) 3655-1074	Santo Antônio do Pinhal - SP	<a href="https://feculariap.negocio.site/">https://feculariap.negocio.site/</a>
24	Fecularia Melo	(35) 3734-1055	Santa Rita de Caldas - MG	
25	Sanjer	E-mail: sanjer.pedidos@hotmail.com SAC : (0xx19) 3863 0733 / 38431639	Itapira - SP	<a href="http://www.sanjer.alimentos.com.br/index.html">http://www.sanjer.alimentos.com.br/index.html</a>
26	Fecularia Santo Antônio	Telefone: (35) 3431-2792 E-mail:	Cambuí - MG	<a href="http://feculariasantoantonio.com.br/">http://feculariasantoantonio.com.br/</a>

		contato@feculariasa ntoantonio.com.br		
27	Ibiúna Alimentos	contato@ibiunaalim entos.com.br	Ibiúna -SP	<a href="http://www.ibiun&lt;br/&gt;aalimentos.com&lt;br/&gt;.br/">http://www.ibiun aalimentos.com .br/</a>
28	Amidos Lua Clara	(67) 3448-3120	Deodópolis - MS	
29	Matna Foods Ltd. Nigeria's	<a href="tel:+2348097969329">+234 809 796 9329</a>	Nigéria	<a href="http://www.matn&lt;br/&gt;afoods.com/">http://www.matn afoods.com/</a>
30	EIAMHENG TAPIOCA STARCH INDUSTRY CO., LTD.	<a href="http://eiamheng.com&lt;br/&gt;/home/en/#contact">http://eiamheng.com /home/en/#contact</a>	Tailândia	<a href="http://eiamheng&lt;br/&gt;.com/home/en/">http://eiamheng .com/home/en/</a>
31	Lopburi Starch Company	<a href="tel:+6636462361">(+66)36-462361</a> <a href="mailto:lopburi_starch@hotmail.com">lopburi_starch@hotmail.com</a>	Tailândia	<a href="https://lsstarch.&lt;br/&gt;com">https://lsstarch. com</a>
32	Chaiyaphum Starch Co.,LTD.	Escritório: (662)- 540-1200 <a href="mailto:info@cpp.co.th">info@cpp.co.th</a> Fábrica: <a href="mailto:factory@cpp.co.th">factory@cpp.co.th</a>	Tailândia	<a href="https://www.cpp&lt;br/&gt;.co.th">https://www.cpp .co.th</a>
33	Tapioca Starch (PT. Surya Pati Kencana)	0852-2626-1819 <a href="mailto:ahmad_mangkubum&lt;br/&gt;i@yahoo.com">ahmad_mangkubum i@yahoo.com</a>	Indonesia	<a href="https://tepung-&lt;br/&gt;tapioka.indonet&lt;br/&gt;work.co.id">https://tepung- tapioka.indonet work.co.id</a>
34	P.S.C. Starch Products PCL	<a href="http://www.pscstarc&lt;br/&gt;h.com/index.html">http://www.pscstarc h.com/index.html</a>	Tailândia	<a href="http://www.pscs&lt;br/&gt;tarch.com/">http://www.pscs tarch.com/</a>
35	New Diamond Starch CO.,LTD.	<a href="mailto:new_diamond_starc&lt;br/&gt;h@hotmail.com">new_diamond_starc h@hotmail.com</a>	Tailândia	<a href="https://newdiam&lt;br/&gt;ondstarch.com/&lt;br/&gt;en/">https://newdiam ondstarch.com/ en/</a>
36	General Starch Limited	<a href="mailto:info@gsl-th.com">info@gsl-th.com</a>	Tailândia	<a href="http://www.gsl-&lt;br/&gt;th.com/en/home&lt;br/&gt;-2/">http://www.gsl- th.com/en/home -2/</a>
37	Siam Quality Starch Co., Ltd.	<a href="mailto:info@smscor.com">info@smscor.com</a> <a href="https://www.siamqu&lt;br/&gt;alitystarch.com/cont&lt;br/&gt;act-us/">https://www.siamqu alitystarch.com/cont act-us/</a>	Tailândia	<a href="https://www.sia&lt;br/&gt;mqualitystarch.&lt;br/&gt;com/">https://www.sia mqualitystarch. com/</a>
38	Asia Modified Starch Co.,Ltd.	<a href="https://www.amsco.c&lt;br/&gt;o.th/en/contact-us">https://www.amsco.c o.th/en/contact-us</a>	Tailândia	<a href="https://www.am&lt;br/&gt;sco.co.th/">https://www.am sco.co.th/</a>

39	tongjit starch co.,ltd.	info@tongjitstarch.com	Tailândia	<a href="https://www.tongjitstarch.com/home">https://www.tongjitstarch.com/home</a>
40	Premier Quality Starch Co., Ltd.	pqstarch@yahoo.com c_somyot@yahoo.com asaenkhot@hotmail.com	Tailândia	<a href="https://www.pqsstarch.com/">https://www.pqsstarch.com/</a>

Fonte: O autor.

Sequencialmente, visando estudar as possibilidades da reutilização do material descartado, aplicando o mesmo na construção civil, foi realizado um questionário com o intuito de conhecer o processamento da mandioca e como são realizados o descarte de seus resíduos. O questionário foi enviado nos e-mails das empresas catalogados acima, uma versão em português para as empresas no Brasil e uma versão em língua inglesa para as empresas da Nigéria, Indonésia e Tailândia. Além do contato via e-mail, foi realizado o contato via telefone com gerentes e proprietários de algumas empresas da lista.

Após essa etapa, foi possível tratar as respostas e traçar um cenário atual da situação dentro das empresas, contribuindo para a busca de uma solução compatível com a maior parte das empresas produtoras da fécula de mandioca.

Os resultados desta pesquisa e suas discussões estão presentes no capítulo 4 e o questionário aplicado encontra-se no apêndice A, no final deste trabalho.

### **3.2 Caracterização do resíduo *in natura***

O resíduo utilizado neste estudo foi fornecido por uma empresa beneficiadora da mandioca (COPASUL), uma fecularia localizada no município de Naviraí, no estado de Mato Grosso do Sul. O material resulta do processo de industrialização da raiz da mandioca para produção do amido. O bagaço gerado foi recolhido e armazenado em bombonas de plástico de 80 litros, sendo posteriormente encaminhada para o laboratório de Engenharia de Produção e Produto (LEPP) no prédio da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia (FACET), campus 2 da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD),

Dourados em Mato Grosso do Sul.

O bagaço da fécula foi então disposto em bandejas para secagem em estufas por 8 horas a 160°C. Após a secagem, o material foi retirado, pesado e encaminhado para o moinho de bolas, onde permaneciam durante 30 minutos para serem moídos e adquirirem uma granulometria semelhante ao cimento, um pó fino correspondente a uma granulometria passante na peneira de 75 µm.

Após esta etapa, o pó do resíduo foi submetido a testes de caracterização como perda ao fogo, umidade e perda de massa na estufa.

### 3.3 Produção e caracterização da cinza

Posteriormente, o pó do bagaço da fécula (PBF) foi levado ao tratamento térmico em muflas, sendo submetido à queima em diferentes temperaturas, 650°C, 900°C e 1000°C. As amostras foram dispostas em cadinhos com massa de 70g cada, permanecendo a temperatura máxima por 2 horas e, a 3 e 4 horas, para as temperaturas de 900 e 1000°C respectivamente. As amostras descritas foram denominadas conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Nomenclatura, temperatura e tempo de exposição das amostras.

Amostras		
Nomenclatura	Temperatura	Tempo de exposição à temperatura máxima
CBFM1	650°C	2 horas
CBFM2	900°C	2 horas
CBFM3	900°C	3 horas
CBFM4	1000°C	2 horas
CBFM5	1000°C	4 horas

Fonte: O autor.

#### 3.3.1 Caracterização por FTIR (Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier)

A caracterização por FTIR foi realizado no Laboratório de Óptica e fotônica (LOF-GOA), no prédio da FACET, na UFGD Dourados-MS e os dados resultantes foram referentes a dois tipos de gráficos: absorbância versus número de onda e transmitância versus número de onda. A análise dos picos presentes



nesses gráficos e a comparação desses picos com a bibliografia existente permitem a identificação dos compostos químicos do material, tais como, SiO<sub>2</sub> e SiOH.

A análise foi realizada por meio de pastilhas produzidas através de uma prensa manual, as pastilhas consistiam em uma mistura da adição/aglomerante com KBr puro na proporção de 1:200.

### **3.3.2 Caracterização por DRX (Difração de raios X)**

A análise por difração de raios X identifica qualitativamente as fases cristalinas dos minerais constituintes das amostras, a partir da interação de raios X que difratam com os planos cristalinos para cada ângulo de incidência. Ela fornece informações sobre a estrutura, fase, orientação, tamanho médio de grão, cristalinidade, tensão e defeitos do cristal em uma amostra.

Os picos de difração de raios X, resultam da interferência construtiva de feixes de raios X monocromáticos espalhados em ângulos específicos de um conjunto de planos atômicos em uma determinada rede em uma amostra. O resultado se apresenta em um gráfico (difratograma) que apresenta picos característicos da estrutura cristalina de cada espécie química (SILVA, 2020).

Sob essa perspectiva, as amostras, foram expostas aos raios X no equipamento Shimadzu Lab X XRD 6000 que conta com um tubo de raio X de Cu com saída máxima de 2 kW e goniômetro do tipo vertical com raio de varredura de 185 mm do departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). A medida foi realizada entre 10° e 60°, com passo angular de 2° por minuto.

### **3.3.3 Caracterização por EDX (Espectroscopia de energia dispersiva por raios X)**

Empregada em diversas áreas como ciência dos materiais e engenharias, a técnica de EDX (Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios X) é uma técnica analítica utilizada para a identificação e caracterização de elementos químicos presentes em uma amostra.

O princípio básico da técnica de EDX envolve a interação entre raios X de alta energia e a amostra em estudo, no caso a CBFM. Quando um feixe de raios X incide sobre a cinza do bagaço da fécula de mandioca, ocorrem processos de interação entre os raios X e os átomos da amostra. Essas interações resultam na emissão de raios X secundários de energia característica, que são detectados e analisados pelo sistema de detecção do espectrômetro.

A partir do espectro de energia obtido, é possível determinar a presença e a quantidade relativa de elementos químicos na amostra.

Para realização da técnica, a amostra foi exposta aos raios X no equipamento Shimadzu EDX-720 com capacidade de análise qualitativa e quantitativa de elementos com pesos atômicos entre o Na e o Urânio, do Grupo de Materiais Ferroicos (GMF) da UFSCar.

### **3.3.4 Caracterização por DSC (Calorimetria Exploratória Diferencial)**

A Calorimetria Exploratória Diferencial é uma técnica termo analítica utilizada para investigar as propriedades térmicas de materiais, e envolve a comparação da quantidade de calor fornecida ou liberada pelas amostras de CBFM e PBF de mandioca em relação a um material de referência, à medida que a temperatura é variada.

A partir disso, informações valiosas sobre as propriedades térmicas dos materiais são obtidas, auxiliando no estudo de características como estabilidade térmica, pureza, polimorfismo, reatividade química e comportamento de transições de fase (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2020).

A técnica foi realizada para avaliar o comportamento do pó do bagaço da fécula de mandioca e da CBFM no Laboratório de Controle de Qualidade e análise térmica (LabCAT), da UFGD. O equipamento utilizado foi o Calorímetro Exploratório Diferencial Q-20 *Ta Instruments* (DSC), que permitiu determinar com precisão a variação de entalpias dos materiais em função da temperatura e tempo. A análise foi realizada entre as temperaturas de 0 °C a 600 °C (temperatura máxima do equipamento disponível para pesquisa), utilizando razões de aquecimento predeterminadas de 5 °C min<sup>-1</sup>.

### 3.3.5 Caracterização por Microscopia Óptica

A microscopia óptica é uma técnica de imagem que utiliza a luz visível e sistemas ópticos, como lentes, para visualizar e analisar amostras em níveis microscópicos.

A técnica foi importante para determinar o tamanho médio dos grãos da CBFM, a existência ou não de aglomerados e determinar se a amostra apresenta ordem de grandeza similar ao cimento.

O ensaio foi realizado no laboratório do Grupo de Materiais Ferroicos (GMF) da UFSCar.

### 3.3.6 Massa específica

O ensaio de massa específica foi realizado para os seguintes materiais: cal, cimento e CBFM. Para a sua execução fez-se uso do frasco volumétrico de *Le Chatelier*, de vidro de borossilicato com capacidade de 250 cm<sup>3</sup> e leituras com precisão de 0,05 cm<sup>3</sup>. Foi utilizado querosene como fluido para determinar a massa específica do cimento, da CBFM e do Hidróxido de cálcio PA.

O frasco com querosene foi submerso em posição vertical durante 30 minutos em água natural à temperatura ambiente para que se tivesse o equilíbrio térmico dos líquidos. Após esse tempo, foi adicionada ao frasco a massa do material, o qual, desejava-se descobrir a massa específica, massa suficiente para deslocar o líquido para o volume entre 18 cm<sup>3</sup> e 24cm<sup>3</sup>. Sequencialmente, o frasco foi tampado e suavemente girado em forma circular em posição inclinada.

Para o cálculo da massa específica, a Equação 1 foi utilizada conforme ABNT NM 23:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que,

$\rho$ , é a massa específica do material ensaiado (g/cm<sup>3</sup>);

$m$ , é a massa do material ensaiado (g);

$V$ , é o volume deslocado pela massa do material ensaiado (cm<sup>3</sup>).

### **3.3.7 Ensaio de Pozolanicidade**

Para enquadrar o CBFM como material pozolânico, seguiu-se os requisitos prescritos pela NBR 12653 (ABNT, 2014) – materiais pozolânicos – os parâmetros que indicam quais requisitos devem ser atendidos para que o material destinado a este uso com cimento Portland possa ser considerado pozolânico.

De acordo com a referida norma, os materiais pozolânicos são divididos em três classes N, C e E. A classe N é composta por materiais pozolânicos naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de natureza ácida petrográfica e argila calcificada. A classe C engloba as cinzas produzidas pela queima do carvão em usinas termelétricas.

Por fim, a Classe E abrange qualquer material pozolânico não contemplado nas classes anteriores, que obedece aos requisitos da NBR 12653/2014.

Existem diferentes testes para determinar a reatividade das cinzas. Ambos são padronizados pela ABNT: Teste do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) da Cal, Teste do Índice de Atividade Pozolânica do Cimento e Teste de Chapelle Modificado. Há também aqueles que ainda não estão padronizados, como a difração de raios X, que reconhece a natureza amorfa da adição.

Nesta tese, foram realizado os ensaios de IAP com cal, e IAP com cimento, além dos testes físicos de teor de umidade da CBFM, perda ao fogo e porcentagem passante na peneira 45 µm, conforme previstos na NBR 12653 (2014).

#### **3.3.7.1 Índice de atividade pozolânica da cal (NBR 5751/2015)**

O índice de atividade pozolânica da cal é realizado de acordo com a NBR 5751/15, que descreve o método de teste de atividade pozolânica pelo índice de atividade da cal. O método especifica a conformação e subsequente fratura por compressão de três corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Os ensaios foram realizados em argamassa misturada com as adições a serem testadas (dobro do volume de hidróxido de cálcio utilizado),

areia normal ABNT NBR 7214/2015 (sendo 234 g de cada fração de areia 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), 104 g hidróxido de cálcio e 180 g de água.

O Quadro 4 apresenta as quantidades da mistura das argamassas para o Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal para a CBFM tratada a temperatura de 650°C. O traço foi definido de acordo com a NBR 5751/15.

Quadro 4 - Quantidades de massa do traço para IAP com cal.

Argamassa	Massa dos materiais (g)				Relação A/F (gg)
	Hidróxido de cálcio	Areia Normal	Adição mineral	Água	
CBFM1	104	936	156	180	0,69

Fonte: O autor.

A relação água/finos é o quociente entre a massa de água e a soma das massas de hidróxido de cálcio e adição mineral contidas na argamassa. A adição mineral é baseada na Equação 2:

$$m = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \times 104g \quad (\text{Eq.2})$$

Em que,

$\delta_{poz}$  é o valor da massa específica do material pozolânico em ensaio, determinado pela ABNT NBR NM 23 (2000).

$\delta_{cal}$  é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio P.A. utilizado no ensaio, determinado pela ABNT NBR NM 23 (2000).

A quantidade de água para mistura foi equivalente a um índice de consistência de 225 ±5 mm, obtido do ensaio de abatimento, conforme ABNT NBR 7215/2019.

A mistura dos materiais e a confecção dos corpos de prova seguiram as prescrições da NBR 7215 (2019), posteriormente, os corpos de provas (CPs) foram curados nos próprios moldes durante 24 h a temperatura de 23 °C e durante seis dias a temperatura de 55 ± 2 °C. Após os 7 dias de cura, os CPs foram retirados da estufa ainda nos moldes, onde permaneceram 2 horas a temperatura ambiente para só então, serem desmoldados, preparados e

submetidos aos ensaios de ruptura à temperatura de 23 °C. De acordo com a NBR 12653/2014, para um material evidenciar a pozolanicidade é necessário alcançar resistência à compressão superior a 6 MPa.

### 3.3.7.2 Índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/2014)

O ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento foi realizado em conformidade com a NBR 5752/14, que orienta a metodologia para realização do ensaio de atividade pozolânica através do índice de atividade com cimento.

Para tanto, foi preparado, uma argamassa A de referência contendo apenas cimento Portland (CP II 32F), areia normal e água. Posteriormente, foi realizado a argamassa B contendo 25% em massa de material pozolânico, em substituição à igual porcentagem de cimento CP II 32F, areia normal e água.

Para cada dosagem de argamassa estabelecida (A e B) foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100 mm de altura para ruptura (aos 28 dias). O Quadro 5, contém as proporções de cada material para a confecção dos seis corpos de prova cilíndricos.

Quadro 5 - Quantidades em massa de material para modelagem dos corpos de prova.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II 32F	624	468
CBFM 1	-	156
Areia Normal	1872	1872
Água	300	300
Aditivo superplastificante	-	12 ml

Fonte: ABNT NBR 5752/2014 (adaptado).

Para a realização do traço da argamassa B, a CBFM e o cimento foram previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, conforme preconiza a norma supracitada durante 2 minutos.

A areia normal foi constituída por quatro frações de 468g de cada fração

de areia 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm, conforme a NBR 7214 (2015), e houve a necessidade do uso de aditivo líquido plastificante e/ou redutor de água (não havendo nenhuma restrição previa quanto ao tipo de cimento utilizado), para que o índice de consistência da argamassa B fosse semelhante ao da argamassa A.

Para realização da mistura, inicialmente colocou-se toda quantidade de água e cimento na cuba, a mistura desses materiais foi realizada com misturador em baixa rotação durante 30 segundos. Transcorridos os 30 segundos iniciais de mistura, deu-se início à colocação da areia, que foi inserida na mistura em até 30 segundos, nunca superior a esse tempo.

Posteriormente ao término da inserção de toda areia na mistura, o misturador foi colocado na rotação máxima durante 30 s e então desligado pelo intervalo de 90 s. Os primeiros 30 segundos com o misturador desligado serviram para, com auxílio de uma colher de pedreiro, retirar a massa que ficava aderida na pá e nas paredes da cuba; nos demais 60 s a NBR 7215 (2019) recomenda que a argamassa permaneça em repouso. Passados os 60 segundos de descanso da massa, o misturador era religado e funcionava em rotação máxima pelo tempo equivalente de 1 minuto.

A moldagem dos corpos de prova iniciou-se logo ao término de mistura descrito anteriormente. A argamassa era depositada nos moldes em 4 partes aproximadamente de igual altura, cada camada recebia 30 golpes uniformes e distribuídos homogeneamente.

A cura dos corpos de prova foi realizada nos moldes durante 24 horas em câmara úmida a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, posteriormente, os CPs foram desformados, identificados e colocados dentro de um tanque de cura contendo água e cal, onde permaneceram até o momento dos ensaios destrutivos durante 27 dias a temperatura de  $23 \pm 2$  °C.

Para o ensaio de ruptura a máquina de ensaio foi limpa, os corpos de prova colocados diretamente sobre o prato inferior da prensa, devidamente centrado em relação ao eixo de carregamento e a velocidade da transferência de carga para os corpos de prova foi de aproximadamente 0,25 MPa/s conforme preconiza a NBR 7215/2019.

Após a ruptura dos CPs foi calculado o índice de desempenho com

cimento Portland determinado pela NBR 5752/2014, conforme Equação 3:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que,

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

$f_{cA}$  corresponde à média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa A (MPa);

$f_{cB}$  corresponde a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B (MPa).

### **3.4 Produção dos corpos de prova de argamassa**

#### **3.4.1 Materiais**

O cimento utilizado neste estudo foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V). Este cimento foi escolhido por não possuir escória e material pozolânico em sua composição, o que evidencia os efeitos da adição de CBFM à mistura, além de sua disponibilidade no mercado local e seu uso comum na construção civil.

Em termos de agregado, foi utilizado areia normal conforme NBR 7214/2015, proveniente de empresa localizada na cidade de Dourados, MS. Para as reações de hidratação do concreto, bem como a cura da amostra, utilizou-se água da torneira do fornecedor local.

#### **3.4.2 Traço de argamassa escolhido**

O uso de argamassas para a substituição do cimento por resíduos é uma abordagem comum em pesquisas e desenvolvimento de novos materiais na indústria da construção, devido a algumas razões destacadas, como:

- Escala reduzida: argamassas são misturas mais simples e em menor escala do que o concreto. Isso permite que os pesquisadores avaliem rapidamente os efeitos da adição de resíduos sem o risco e o custo associados a grandes volumes de concreto.
- Menor influência de propriedades estruturais: as argamassas são usadas principalmente para assentar tijolos, blocos ou revestir superfícies. Elas não têm



a mesma função estrutural que o concreto, que é usado para suportar cargas. Portanto, mudanças nas propriedades mecânicas da argamassa podem ser mais facilmente controladas e avaliadas sem comprometer a segurança estrutural.

- Melhor entendimento dos efeitos do resíduo: iniciar a caracterização do resíduo com argamassas ajuda os pesquisadores a entenderem como os resíduos afetam propriedades específicas da mistura, como trabalhabilidade, resistência à compressão, durabilidade, entre outras. Com essa compreensão, é mais fácil ajustar a proporção de resíduos de forma mais precisa antes de incorporá-los em concretos a posteriori.

Nesse sentido, os corpos de prova de argamassa de referência foram executados de acordo com o traço 1:3 (cimento:areia), em massa, e fator água/cimento (fator a/c) de 0,50, comumente adotada na literatura e em pesquisas similares conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 - Referências para escolha de traços em argamassas.

<b>Autores</b>	<b>Traço</b>	<b>Fator a/c</b>	<b>Resíduo</b>
(GUIMARÃES, 2022)	1:3	0,48	CCA
(SELVARANJAN et al., 2021)	1:3	0,50	CCA
(LOMBARDI, 2019)	1:3	0,55	CBC
(POTTY et al., 2014)	1:3	0,50	CCA
(PAULA et al., 2009)	1:3	0,48	CBC
(DEGIRMENCI; YILMAZ, 2009)	1:3	0,50	Diatomito

Fonte: O autor.

As porcentagens utilizadas para substituir o cimento por CBFM foram definidas com base nos resultados dos trabalhos listados no Quadro 7, que, em sua maioria, obtiveram propriedades mecânicas satisfatórias com as substituições variando de 5% a 10% em relação ao compósito convencional usado como referência para os seus respectivos agrosresíduos. Com base nestes estudos, para se avaliar o efeito de substituição da CBFM na argamassa, foram escolhidos e analisados 3 traços (0%, 5% e 10%), nos quais houve variações na

CBFM usada para substituir o cimento em massa (g).

Quadro 7 - Referências para escolha de substituição do cimento pelo agrosíduos.

<b>Autor</b>	<b>% de substituição ótima</b>	<b>Agro resíduo</b>	<b>Ensaio realizados</b>
(ADESANYA; RAHEEM, 2009)	<15%	Cinza da espiga de milho	Composição química da cinza e clínquer. Finura, Solidez, Consistência, tempo de pega inicial, tempo de pega final.
(RAHEEM et al., 2018)	5%	Cinza da casca do milho	Densidade, Resistência a compressão, Absorção de água e abrasão.
(RAHEEM et al., 2017)	10%	Cinza do talo do milho	DRX da cinza, resistência a compressão, absorção de água, abrasão e densidade.
(RAMESH KUMAR; KESAVAN, 2020)	5%	Cinza da fibra de coco	Ensaio de compressão, tração e flexão; Ensaio de consistência do concreto (Slump test).
(BERENQUER et al., 2020)	15%	Cinza do bagaço da cana de açúcar	Composição química, mineralógica e morfológica da CBC, MEV, DRX, Ensaio de tração e compressão em argamassa.
(GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2008)	20%	Cinza da casca do arroz	Ensaio de tração e compressão em concretos e argamassas, absorção de água, penetração de cloreto. Maior resistência a compressão a 20% de substituição.
(KIRAN; KISHORE, 2017)	15%	Cinza do bagaço da cana de açúcar	Ensaio de compressão, tração e flexão. Melhores resultados de resistência com 5% de substituição.
(RANJITH; SANJITH; KIRAN, 2015)	5%	Cinza do bagaço da cana de açúcar	Avaliou o desempenho do concreto com CBC em diferentes ambientes de cura.
(SRINIVASAN; SATHIYA, 2010)	10%	Cinza do bagaço da cana de açúcar	Slump test, resistência a compressão, resistência a tração, resistência a flexão e modulo de elasticidade.

Fonte: O autor.

As misturas foram feitas para um volume de aproximadamente 1,5 litros de argamassa, suficientes para modelar 7 corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm. As proporções utilizadas encontram-se no Quadro 8.

Quadro 8 - Quantidade de material para os traços de argamassas.

Argamassa	CIMENTO <sup>1</sup> (g)	CBFM (g)	AREIA <sup>2</sup> (g)	ÁGUA (g)	ADITIVO <sup>3</sup> (ml)
Piloto 0%	728	0,00	2184	364	0
CBFM 5%	691,6	36,4	2184	364	14,5
CBFM 10%	655,2	72,8	2184	364	14,5

1- Cimento CPV-ARI.

2- Foi utilizado areia normalizada, sendo 546g de cada fração determinada pela norma (NBR 7214/2015).

3- Aditivo plastificante/reductor de água, composto de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso. Densidade de 1,06kg/l e pH de 6 ±1. Consumo de 1 litro para cada 50 kg de cimento.

Fonte: O autor.

### 3.4.3 Mistura, molde e cura

Para produzir a argamassa foi utilizado o misturador mecânico (argamassadeira), seguindo o mesmo processo para adição dos materiais. Inicialmente, foi colocada toda quantidade de água da mistura seguida da inserção do cimento (ou cimento mais resíduo CBFM)<sup>5</sup>. Logo em seguida, foram misturados durante 30 segundos em rotação baixa. Após os 30 segundos iniciais, fez-se a inclusão da areia, colocada gradualmente em um tempo máximo de 30 segundos. Após o término da inclusão da areia, o misturador foi colocado em alta rotação durante outros 30 segundos. A massa descansava por um minuto e meio e depois o misturador era ligado na rotação máxima por mais um minuto, para só então iniciar a moldagem dos corpos de prova.

O preenchimento dos moldes foi feito em quatro camadas iguais com cada camada recebendo 30 golpes uniformes para o adensamento manual utilizando-se um soquete. Finalizada as camadas foi realizado o rasamento da superfície com a borda do molde utilizando uma colher de pedreiro.

A cura dos corpos de prova (CPs) iniciou imediatamente após a sua moldagem. Durante as primeiras 24 horas os receptáculos de ensaio ficavam em cura úmida ainda nos moldes a uma temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Transcorrido o primeiro dia, os CPs foram desmoldados, identificados e submersos em água saturada com cal até a data de seus ensaios destrutivos.

---

<sup>5</sup> Nos traços com a substituição do cimento pela CBFM, o cimento e o resíduo eram misturados e homogeneizados previamente à mistura com a água.

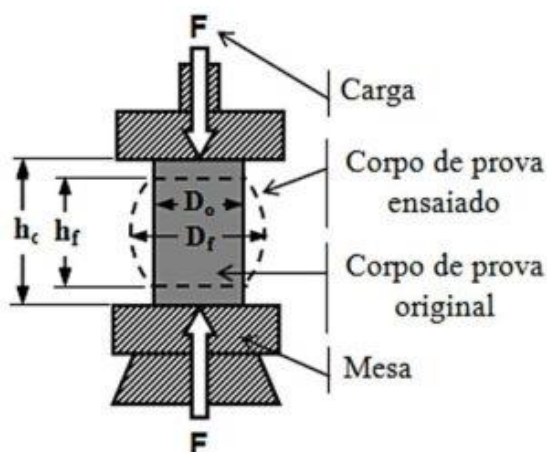
### 3.5 Análises físicas e mecânicas dos corpos de prova de argamassa

Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão e ensaio de resistência a tração por compressão diametral. Os ensaios físicos trataram de determinar a massa específica do compósito, índice de vazios e absorção de água conforme normas e procedimentos descritos nos tópicos a seguir.

#### 3.5.1 Ensaio de resistência a compressão (NBR 7215)

O ensaio de resistência a compressão para corpos cilíndricos de argamassa foi realizado conforme preconiza a NBR 7215 (ABNT, 2015). A Figura 4 exemplifica como é realizado o ensaio e a maneira que a força é aplicada no corpo de prova.

Figura 4 - Demonstração do ensaio de resistência a compressão realizado nos CPs de argamassa.



Fonte: Otmiza.com.

O carregamento de ensaio foi aplicado continuamente, sem impacto ou choque, com velocidade de carregamento constante de 0,25 MPa/s e só foi interrompido após a queda de força que indicava a ruptura do corpo de prova.

Após a ruptura de cada amostra foi calculada a resistência à compressão conforme a Equação 4:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que,

$f_c$  é a resistência à compressão (MPa);

F é a força máxima alcançada (N);

D é o diâmetro do corpo de prova (mm);

Determinado os valores de resistência à compressão para os corpos de prova, realizou-se uma avaliação estatística de desempenho do ensaio calculando o desvio relativo máximo (DRM).

O DRM foi calculado dividindo o valor absoluto da diferença entre a resistência média (RM) e a resistência individual (RI) que mais se afaste da média, pela RM e multiplicando por cem, conforme a Equação 5:

$$DRM = \frac{RM-RI}{RM} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

O cálculo do desvio relativo máximo (DRM), deve ser menor que 6%. Caso o valor seja maior, o ensaio deverá ser repetido para aquela idade.

### **3.5.2 Ensaio de tração por compressão diametral (NBR 7222/2011)**

O método para determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de argamassa é prescrito pela NBR 7222 (ABNT, 2011) e é aplicado conforme Figura 5 a seguir.

Figura 5 - Ensaio de tração por compressão diametral do cp.



Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram posicionados de forma que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas recebesse o carregamento coincidindo com o eixo de aplicação de carga de forma homogênea. A carga foi aplicada de maneira contínua, sem impactos ou choques a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura.

A resistência a tração por compressão diametral foi definida pela expressão calculada de acordo com a Equação 6:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot l} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que,

$f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F é a força máxima obtida no ensaio (N);

D é o diâmetro do corpo de prova (mm);

l é o comprimento do corpo de prova (mm).

### **3.5.3 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica para a argamassa (NBR 9778)**

Para realizar os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, primeiramente os corpos de prova de argamassa foram colocados na estufa e mantidos a temperatura de 105°C por um período de 72h, processo que permitiu determinar a massa seca ( $m_s$ ) da amostra.

Sequencialmente, os corpos de prova foram levados a um tambor de água onde ficaram submersos durante 72h a temperatura de 23°C. Concluída a etapa de saturação, os corpos de prova foram colocados em uma panela cheia de água e levada à ebulição, que ocorreu entre o tempo de 15 e 30 min após a inserção dos CPs, como preconiza a norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Os CPs foram mantidos em ebulição durante o período de 5 horas, observando e mantendo o volume de água do recipiente constante durante o período. Terminado o tempo de ebulição o fogo foi desligado e aguardou-se a água atingir a temperatura ambiente (25°C) de forma natural.

Após atingir a temperatura ambiente os corpos de prova foram retirados da panela e levados a uma balança hidrostática onde foi possível determinar sua massa saturada imersa em água ( $m_i$ ).

Retiradas da água da balança hidrostática, as amostras foram secas com pano úmido, apenas para tirar o excesso de água e pesadas em balança convencional para determinar a massa saturada ( $m_{sat}$ ).

Para calcular a absorção (A) de água em porcentagem, utilizou-se a Equação 7:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Eq.7})$$

O índice de vazios ( $I_v$ ), em porcentagem foi determinado pela Equação 8:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (\text{Eq.8})$$

Por fim, as massas específicas (seca, saturada e real) da amostra de argamassa foi calculado em conformidade com as Equações 9, 10 e 11 respectivamente, proposta na NBR 9778/2005:

Massa específica seca-  $\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Eq.9})$

Massa específica saturada-  $\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Eq.10})$

Massa específica real-  $\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (\text{Eq.11})$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no capítulo 3, contendo suas respectivas discussões e análises.

Inicialmente será apresentado e discutido o resultado da pesquisa realizada junto as fecularias, em sequência, os resultados da caracterização do resíduo *in natura* e caracterização da CBFM respectivamente, e por fim os resultados do desempenho mecânico e físico das amostras de argamassas confeccionadas na presente pesquisa.

Os resultados dos ensaios mecânicos, físicos e do índice de pozolânica foram realizados para a CBFM tratada para a temperatura de 650°C durante duas horas, por apresentar a presença de um halo amorfo discutido e apresentado no subtópico 4.3.3.

### 4.1 Informações sobre a quantidade produzida, gestão do bagaço da fécula de mandioca e a possibilidade de aproveitamento

O questionário foi respondido por um total de 12 empresas, sendo 4 empresas pertencentes ao estado do Paraná, 4 empresas do Estado do Mato Grosso do Sul, 3 de São Paulo e uma do Mato Grosso. Nenhuma das empresas estrangeiras responderam ao questionário. Levando-se em consideração as respostas das empresas, foi traçado um perfil:

#### 4.1.1 Idade e Experiência das Empresas:

A pesquisa destaca que a maioria (75%) das empresas tem uma história de operação de 25 anos ou mais. Isso indica uma longa trajetória de experiência e possivelmente estabilidade no mercado. Por outro lado, um número significativo de empresas (25%) tem menos de 10 anos de funcionamento, sugerindo um ambiente de negócios dinâmico e possivelmente mais inovador.



#### **4.1.2 Volume e Processamento da Matéria-Prima:**

As empresas envolvidas trabalham com quantidades substanciais de raiz de mandioca processada diariamente, com a média de produção de bagaço de fécula de mandioca sendo 137,5 toneladas por dia. Isso indica uma operação de grande escala, com a capacidade de processar até 350 toneladas de raiz de mandioca por dia em uma das empresas. Isso pode apontar para um setor que contribui significativamente para a indústria de fécula de mandioca.

#### **4.1.3 Gestão de Resíduos e Sustentabilidade:**

A manipueira, um subproduto do processamento da mandioca, é um resíduo líquido gerado em quantidades substanciais. Apesar disso, mais de 25% das empresas não possuem dados sobre essa geração de resíduos, o que pode indicar uma falta de monitoramento ou atenção à gestão ambiental. No entanto, é positivo notar que todas as empresas destinam a manipueira para uma lagoa de tratamento com biodigestor, o que demonstra um esforço em adotar práticas mais sustentáveis.

#### **4.1.4 Energia Renovável e Uso Eficiente:**

O fato de que as empresas utilizam biogás produzido a partir da manipueira para gerar energia nas caldeiras de secagem do processo de fécula é um indicador de um compromisso com fontes de energia renovável. No entanto, é importante notar que ainda existe uma dependência significativa de lenhas e madeiras para manter o fogo, sugerindo uma oportunidade de melhoria na direção de uma pegada de carbono mais baixa.

#### **4.1.5 Desafios na Secagem do Resíduo Sólido:**

Embora a quantidade de bagaço de fécula de mandioca produzida seja considerável, a pesquisa aponta que apenas três empresas entrevistadas possuem um processo de secagem para esse resíduo. A principal razão citada por 75% das empresas para não realizar a secagem é o alto custo de aquisição de secadores e a falta de argumentos que justifiquem a secagem para obtenção

da massa seca. Isso sugere um obstáculo financeiro e possivelmente uma falta de conhecimento sobre os benefícios da secagem.

#### **4.1.6 Alternativas para o Resíduo:**

A única opção apresentada em relação ao bagaço de fécula de mandioca é a venda ou doação para alimentação animal. Além disso, é mencionado que a empresa com maior lucro vende uma tonelada desse resíduo por R\$ 25,00. Isso ressalta uma falta de diversificação nas estratégias de gestão de resíduos e possíveis oportunidades não exploradas para reutilização ou valorização do resíduo.

Em resumo, os resultados indicam um setor de produção de fécula de mandioca com empresas que variam em idade e tamanho, mas que compartilham desafios comuns relacionados à gestão de resíduos, eficiência energética e viabilidade econômica. A sustentabilidade, a inovação e a exploração de alternativas para o resíduo são áreas que podem ser focadas para melhorar o desempenho geral do setor.

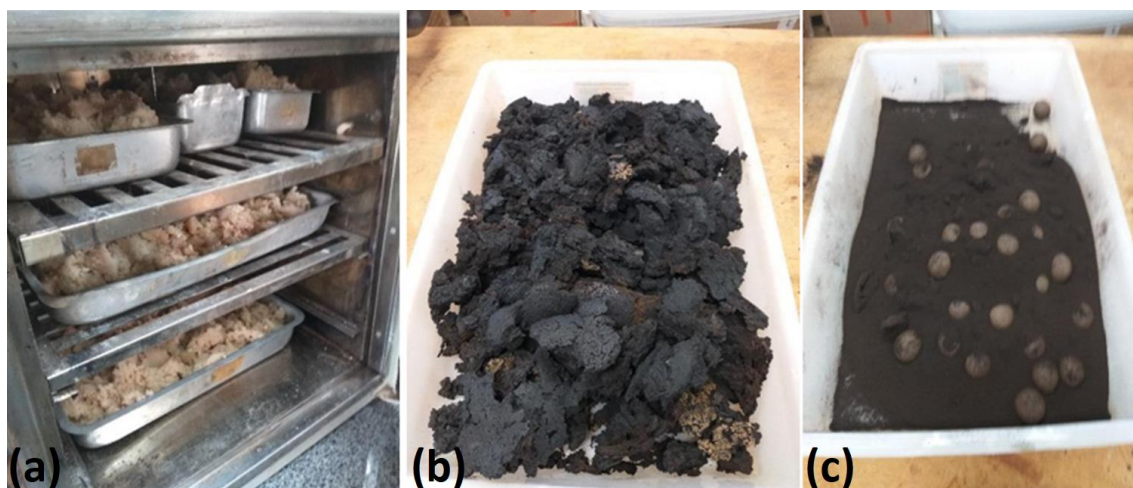
Neste contexto, após da retirada do amido, seria importante dar um destino mais economicamente vantajoso para o bagaço da fécula de mandioca. Com um ciclo complementar de peneiras rotativas e secadoras mecânicas, o bagaço da fécula de mandioca teria a umidade e granulometria reduzidas. Após este processo, a massa seca poderia ser utilizada para fornecer a demanda energética complementar das caldeiras de secagem do próprio processo de industrialização da fécula, uma vez que já se mostra ser um material inflamável.

Sendo assim, os dois resíduos principais da cadeia produtiva (manipueira e bagaço) seriam consumidos na própria geração do produto. Ademais, a queima reduziria em grande parte a massa do resíduo, e a cinza produzida pela queima, ainda possui prospecção de utilização na construção civil, por poder possuir características pozolânicas semelhantes à de outros agrosíduos testados como a cinza do bagaço da cana de açúcar e a cinza da casca do arroz.

## 4.2 Caracterização do resíduo *in natura*

O resíduo do bagaço da fécula de mandioca *in natura*, apresenta uma coloração bege, com textura semelhante a massa de bolo, moldável, úmida e com odor. A Figura 6a ilustra o subproduto úmido, a Figura 6b ilustra o resíduo seco e a Figura 6c representa o material após moagem por esferas por 30 minutos.

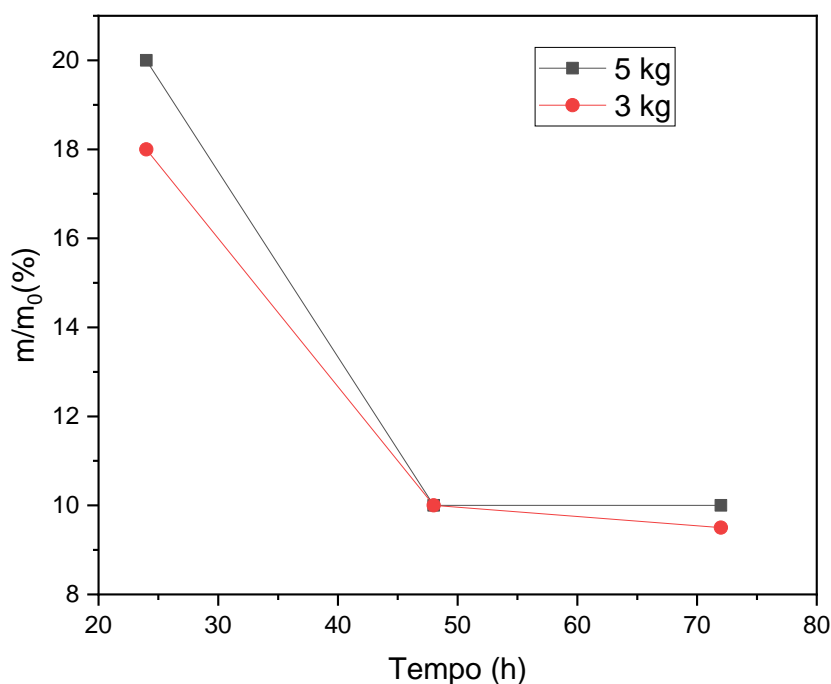
Figura 6 - Estágios do resíduo durante o processo de preparo.



Fonte: O autor.

O resultado do teste de perda ao fogo da amostra úmida, foi analisada a perda de massa do material úmido quando seco em estufa à temperatura de 105° C por 24, 48 e 72 horas, em duas quantidades distintas dispostas sobre o mesmo recipiente (3kg e 5kg). Após as primeiras 24 horas o material já apresenta uma perda de massa superior a 80%. Contudo, o material ainda possui um aspecto muito fibroso e de difícil segmentação, o que não favorece a formação de pó. Sabendo que a quantidade de água presente no resíduo, conforme apontado por (FIORDA; SOARES; JÚNIOR, 2013), em torno de 85%, a estabilização da perda só pode ser vista após 48h, com perda de massa de em torno de 90%, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 – Resultados da variação da massa após ensaio de perda ao fogo.



Fonte: O autor.

### 4.3 Produção e caracterização da cinza

Para uma garantia sobre a secagem ter sido suficientemente eficaz e que o resultado, antes da moagem, seja um material homogêneo e seco, a metodologia de secagem do BF foi otimizado para um tempo menor com uma temperatura maior, realizando uma secagem de 8 horas a 160°C.

Após a secagem, o material foi moído em moinho de bolas durante 30 minutos. Só assim o bagaço foi queimado em uma mufla em temperaturas de 650°C, 900°C e 1000°C por duas horas, com rampas de aquecimento de 100°C por hora conforme mostrado no Quadro 3.

A aparência visual da cinza do bagaço da fécula tinha duas colorações características, uma parte branca e uma parte preta, conforme pode ser observado na Figura 8, referentes a queima do pó do bagaço da fécula de mandioca a 650°C durante duas horas.

Figura 8 - Aparência visual do resíduo da fécula após queima em mufla.



Fonte: O autor.

#### 4.3.1 Caracterização por FTIR

Para a determinação estrutural do pó (material após a secagem) e das cinzas (material após a queima) foi utilizada a técnica FTIR. A Figura 9 mostra o perfil do espectro de FTIR com identificação de picos que foram indexados conforme as referências da literatura.

As bandas presentes nos comprimentos de onda próximas a 1090 são referentes a ligação O-Si-O (CHANDRASEKHAR *et al.*, 2002; REAL, 2018). O trecho CN da benzamida é visto no pico 1384  $\text{cm}^{-1}$ . O pico da amida primária é visto em 1618,95  $\text{cm}^{-1}$  e, no geral, esse pico cai de 1650 para 1620  $\text{cm}^{-1}$ .

No espectro das cinzas<sup>6</sup>, apresentado na Figura 10, nota-se que os grupos característicos do amido não aparecem mais, indicando que uma possível carbonização explicada também pela perda de massa do material após tratamento térmico. Outros grupos visíveis são as hidroxilas (OH), identificada, a partir de um padrão de um vale longo e largo no espectro. Já a banda em 1432  $\text{cm}^{-1}$  é atribuída as bandas de absorção visíveis em 1432  $\text{cm}^{-1}$  são devidas às vibrações no carbonato iônico ( $\text{CaCO}_3$ ) (ČIULADIENĚ *et al.*, 2018).

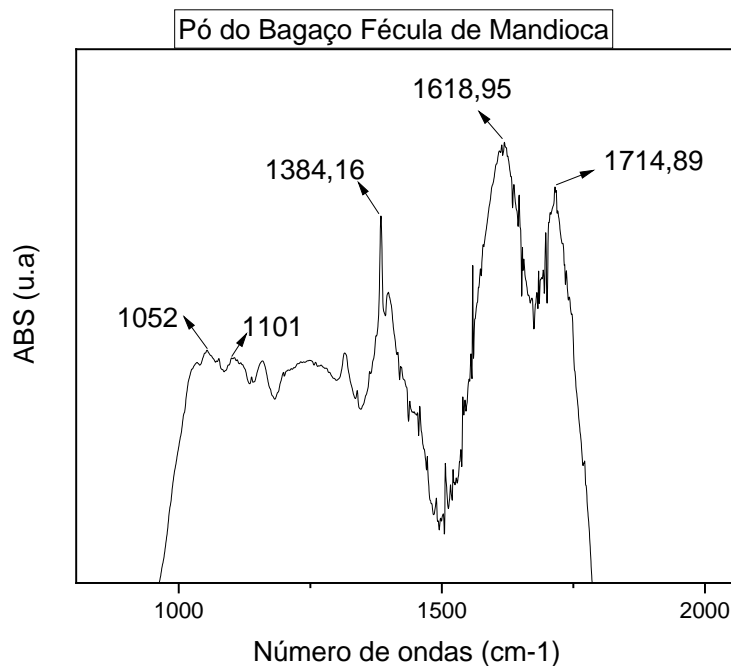
O pico identificado em 2359  $\text{cm}^{-1}$ , está na fase carbonática correspondendo a -OH, -CH alongamento de -CH<sub>2</sub> e -CH<sub>3</sub>, flexão N-H e Alongamento C-N conforme (HAQ *et al.*, 2019) já o pico de 1117  $\text{cm}^{-1}$

---

<sup>6</sup> São apresentados apenas os espectros de FTIR da cinza após a queima a 650°C e 900°C. O espectro da cinza após a queima a 1000°C apresenta as mesmas características de picos e intensidades que o espectro da cinza após queima a 900°C.

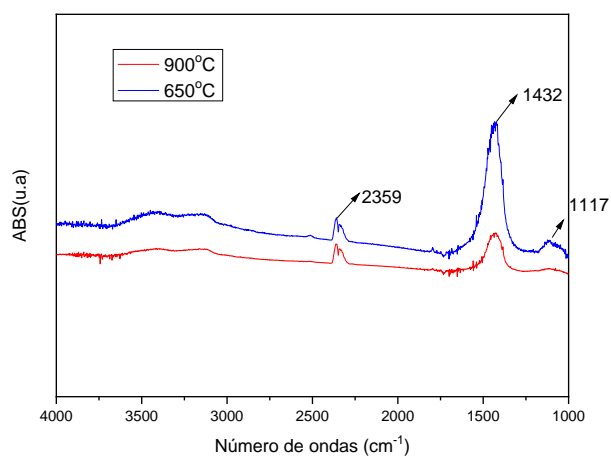
corresponde a existência de sulfato como sulfato de potássio como definido por (VERMA; DEB, 2007).

Figura 9 – Curva do espectro de FTIR do pó do bagaço da fécula de mandioca.



Fonte: O autor.

Figura 10 - Curva do espectro de FTIR do CBFM após queima em 650°C e 900°C.



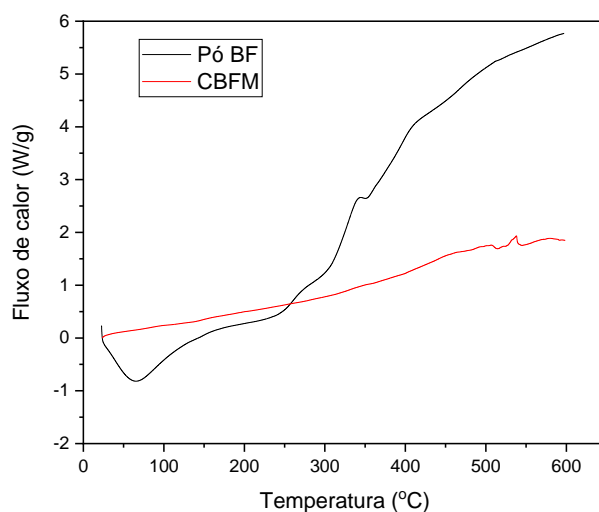
Fonte: O autor.

### 4.3.2 Caracterização por DSC

Na análise de ganho e/ou perda de calor do pó do bagaço (BF), como pode ser observado no gráfico da Figura 11, anteriormente a 100°C o calor detectado encontra-se abaixo de linha de base (valores negativos) indicando que o processo liberou calor (direção exotérmica do eixo). Por outro lado, acima de 100°C os eventos térmicos ocorrem acima da linha de base indicando que o processo liberou calor (direção endotérmica do eixo). No intervalo de 0° a 100°C, é realizada a perda de água da amostra conforme observado também por Nascimento et al (2015) em ensaio de DSC realizado para uma amostra da CCA.

Ainda é possível observar transformações e oscilações de perda de calor acontecem até 350°C, possivelmente devido a queima de orgânicos e/ou a transformação química de alguns componentes da amostra. Para Ernesto (2009), no intervalo de temperaturas de 150 a 320 °C, acontece a decomposição da sacarose e parcial de celulose, hemicelulose e lignina, fornecendo como resíduo um material preto resultado da carbonização do bagaço. Nas temperaturas em torno de 510°C e 540°C aproximadamente, a CBFM tem uma perda de calor, provavelmente referente a queima de resquícios do amido Figura 11, que a amostra tem a essa temperatura.

Figura 11 – Curva de fluxo de calor em função da temperatura obtido por calorimetria diferencial de varredura (DSC) do pó do bagaço da fécula de mandioca e da CBFM após 650°C.



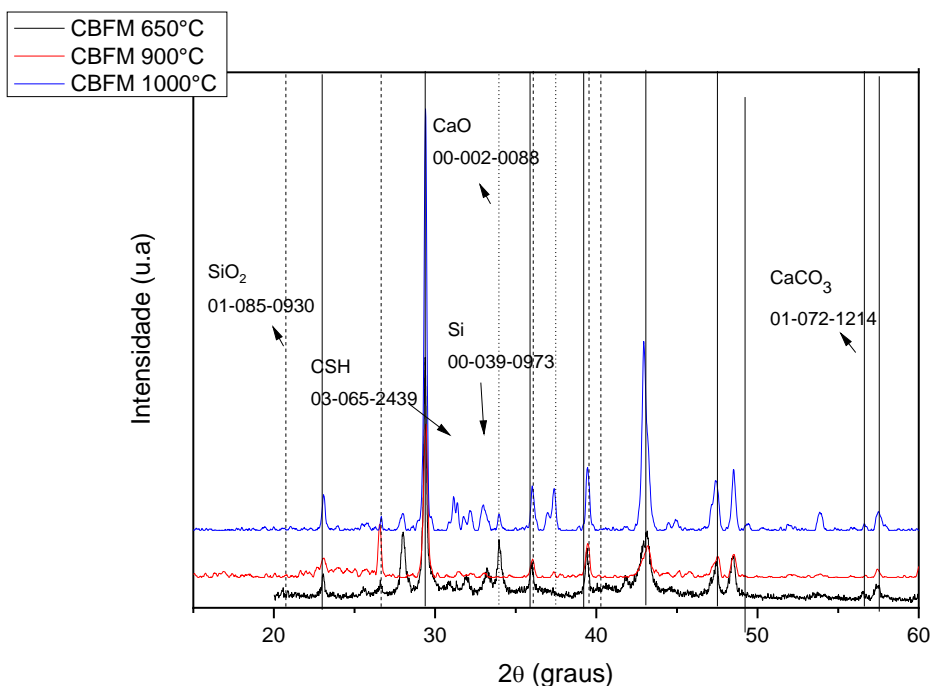
Fonte: O autor.

No caso do uso em compósitos cimentícios, o comportamento termométrico do pó do bagaço da fécula de mandioca justifica a necessidade da queima do material para a formação da CBFM, pois não apresenta a mesma estabilidade termométrica encontrada na cinza, favorecendo a formação de pontos críticos de calor no material. A CBFM apresenta um gráfico linear de calorimetria diferencial de varredura, ressaltando que a CBFM permanece calorimetricamente estável, ou seja, não apresenta nenhuma anomalia que possa prejudicar a cura do compósito cimentício, ou mesmo gerar pontos críticos frágeis de calor.

### 4.3.3 Caracterização por DRX

Os perfis de difração de raios X das amostras da CBFM são apresentados na Figura 12.

Figura 12 – Perfis de difração de raios X do CBFM após queima em 650°C e 900°C e 1000°C.



Fonte: O autor.



Os picos de difração foram indexados seguindo as fichas do *International Centre of Diffraction Data* (ICDD). Foram encontrados picos característicos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ).

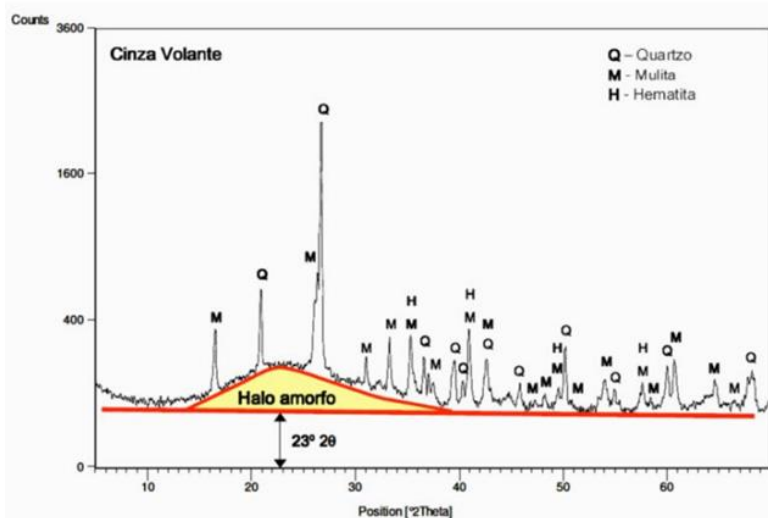
O pico localizado próximo a  $31^\circ$  ( $2\theta$ ) pode ser resultado de uma sobreposição de picos associados ao Silicato de Cálcio Hidratado (CSH) conforme Hoppe Filho et al (2017), Menezes et al (2020) e Romano et al (2018), e aos silicatos tricálcio e dicálcio (GHODDOUSI; ADELZADE SAADABADI, 2017; MENEZES *et al.*, 2020). O CSH principal fase proveniente da hidratação do cimento Portland, tem grande influência na maioria das propriedades físicas e mecânicas dos materiais cimentícios (PELISSER; GLEIZE; MIKOWSKI, 2009). Os silicatos de tricálcio ou Alita ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) possuem propriedades como rápido endurecimento, alto calor de hidratação, alta resistência inicial, em contrapartida o dicálcio ou Belita ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) possuem propriedades de endurecimento lento, baixo calor de hidratação, baixa resistência inicial mas alta resistência final (RIBEIRO, 2002). Ambos também são constituintes do cimento Portland.

De acordo com Menezes et al (2020) e Serpell e Lopez (2015), picos adicionais de silicatos dicálcio e tricálcio ainda podem ser observados entre  $29^\circ$  e  $35^\circ$  ( $2\theta$ ). Resultados semelhantes de DRX também foram obtidos por Batool, Masood e Ali (2020), Jha, Sachan e Singh (2021) e por Schettino e Holanda (2015). O pico máximo de sílica na forma de quartzo é observado em aproximadamente  $29,3^\circ$  ( $2\theta$ ). Os ângulos de difração comuns ( $2\theta$ ) encontrados em materiais semelhante (resíduos agroindustriais) como a CBC e a CCA foram observados em picos com faixa de  $26,64^\circ$ ,  $27,5^\circ$ ,  $28,6^\circ$  e  $30,86^\circ$ , respectivamente, por Khan et al (2012), Alavéz-Ramírez et al (2012), Jha, Sachan e Singh (2021) e Castaldelli et al (2013).

Sabe-se que a reatividade das pozolanas é influenciada pela quantidade de Si amorfo presente, que pode ser identificado por difração de raios X por um halo característico, como mostrado na Figura 13. Não houve evidências protuberantes na formação deste halo em torno de  $29^\circ$  ( $2\theta$ ) para as amostras CBFM  $900^\circ\text{C}$  e  $1000^\circ\text{C}$  observa-se, entretanto, um estreitamento do pico conforme o aumento de temperatura de queima, característico da formação cristalina do  $\text{SiO}_2$ . O aumento da largura meia altura reflete na cristalinidade do

material, quanto menor a largura meia altura, mais cristalino o elemento se apresenta (MIRANDA, 2016).

Figura 13 - Padrão de difração de um material pozolânico.

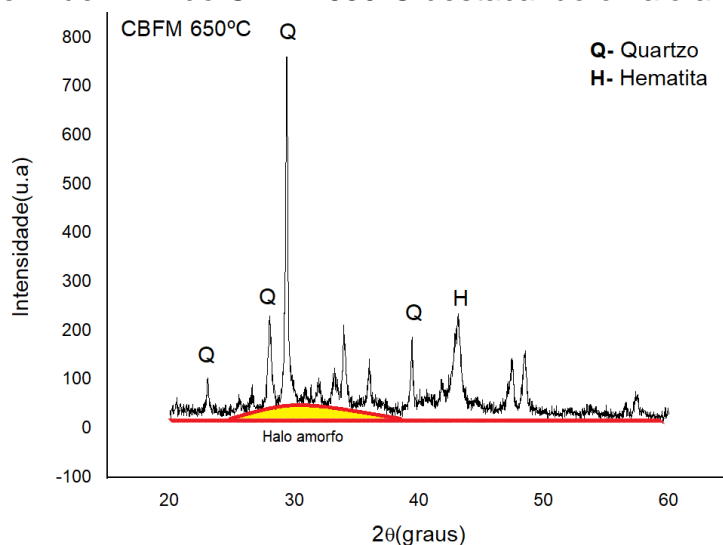


Fonte: (HOPPE FILHO, 2008).

Contudo, quando se analisa o difratograma da amostra CBFM 650°C (Figura 14), observa-se a formação discreta, mas evidente, deste halo amorpho, prospectando a existência de sílica amorfa nessa região. Indicando que esta temperatura seria a ideal para a queima do material, quando se pretende a obtenção de Si amorfo.

Sendo assim, foi usado a queima a 650°C por 2 horas para a obtenção das CBFM para incorporação na massa cimentícia.

Figura 14 – Perfil de DRX do CBFM 650°C destacando o halo amorpho.



Fonte: O autor.

No perfil de difração da CBFM queimada a 650°C é possível observar também a identificação de picos referentes à cristobalita, uma das formas polimórficas do dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) presente em 2θ aproximadamente igual 23°, como também foi observado por (HOPPE FILHO *et al.*, 2017) na cinza da casca de arroz. Ainda pode-se observar a formação de um segundo halo amorfo proveniente do pico da hematita, provavelmente relacionado a presença do Fe ou ainda de alginato como registrado por Candido (2019), em halo amorfo próximo 40° (2θ).

#### 4.3.4 Caracterização por EDX

O resultado da análise composicional por EDX da amostra da CBFM queimada a 650°C revelou a presença de três elementos principais: Cálcio (Ca), Potássio (K) e silício (Si), além da presença de Fósforo (P), Ferro (Fe) e Enxofre (S) em menores proporções conforme exibido na Quadro 9.

Quadro 9 – Resultados da análise composicional via EDX do CBFM queimado a 650°C.

Elemento	Concentração (%)
CaO	60,50%
K <sub>2</sub> O	25,90%
SiO <sub>2</sub>	4,20%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,23%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,06%
SO <sub>3</sub>	1,14%
TiO <sub>2</sub>	0,59%
MnO	0,57%
ZnO	0,39%
Sr	0,34%
Cu	0,08%

Fonte: O autor.

Verificou-se que o cálcio (Ca) apresentou a maior concentração, seguido pelo potássio (K) e pelo silício (Si). Isso sugere que a amostra é predominantemente composta por materiais dos grupos 1 da tabela periódica, K (metal alcalino); grupo 2, Ca (metal alcalino-terroso) e grupo 14, Si (não metal). Apesar de não apresentar uma semelhança direta entre si, cada um destes elementos desempenha funções importantes em diferentes contextos químicos

e podem formar compostos com outros elementos para criar materiais para diversas aplicações.

O cálcio e o silício desempenham um papel fundamental na reação química que ocorre durante o processo de endurecimento do cimento Portland. O cimento Portland é composto principalmente de clínquer, que é uma mistura de silicatos de cálcio, como a alita (C3A) e a belita (C2S) (NEVILLE, 2016). Quando água é adicionada ao cimento Portland, ocorre uma série de reações químicas conhecidas como hidratação. Durante a hidratação, o cálcio presente no cimento reage com a água para formar compostos hidratados. A reação mais significativa é a hidratação do silicato tricálcico (C3S), o principal componente do clínquer. A reação do C3S com a água forma hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H é o principal produto do endurecimento do cimento e é responsável por sua resistência mecânica (NEVILLE, 2016).

O aluminato tricálcico (C3A), outro componente do clínquer, também reage com a água para formar hidróxido de cálcio e compostos de alumínio hidratados. Além disso, durante a hidratação do cimento Portland, a sílica reativa presente nos agregados ou adicionada como aditivo pode reagir com o hidróxido de cálcio, formando um gel de sílica. Esse gel de sílica preenche os poros do concreto, melhorando sua densidade e impermeabilidade, além de aumentar a resistência à penetração de agentes agressivos, como íons sulfato e cloreto (HEWLETT; LISKA, 2019).

Portanto, o cálcio e o silício desempenham um papel crucial na reação de hidratação do cimento Portland, formando compostos hidratados que são responsáveis por sua resistência e durabilidade. Em contrapartida, a presença excessiva de cálcio no cimento pode levar a algumas consequências indesejáveis, como o retardamento da hidratação, isso ocorre porque altas concentrações de cálcio podem formar uma camada protetora em torno das partículas de cimento, impedindo a reação com a água (STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF et al., 2002). Outra consequência do excesso de cálcio no cimento é o aumento da temperatura de hidratação que aumenta a taxa de liberação de calor durante a hidratação podendo causar

problemas como fissuras por retração térmica, bem como o risco de expansão tardia e, conseqüentemente a redução da resistência e da durabilidade (HEWLETT; LISKA, 2019). É importante ressaltar que a quantidade ideal de cálcio e silício no cimento varia de acordo com as proporções dos outros componentes e as características desejadas do concreto.

A presença de sílica reativa nos agregados combinada com altos teores de álcalis (sódio e potássio) no cimento podem levar à reação álcali-sílica (RAS). Essa reação pode causar expansão e rachaduras no concreto devido à formação de gel expansivo, prejudicando sua durabilidade. Para mitigar a RAS, é importante controlar os teores de álcalis no cimento e utilizar agregados adequados (HEWLETT; LISKA, 2019; NEVILLE, 2010).

Portanto, o controle adequado da composição do cimento é essencial para garantir um desempenho adequado e evitar problemas causados pelo excesso destes elementos. A fins comparativos, o Quadro 10 evidencia a composição química do cimento CP-V (ARI).

Quadro 10 - Resultado da análise composicional via EDX para o cimento CP-V (ARI).

<b>Elemento %/ Autor</b>	<b>CaO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Mg O</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
(ALEXANDRE; LUZ, 2020)	54,75	22,38	6,45	4,66	3,41	2,68	-
(BORGES; MELO NETO; MENDONÇA, 2021)	64,60	17,00	6,90	0,90	2,70	3,40	1,30
(BEHERA; NOMAN; PETRŮ, 2020)	63,5	19,10	4,44	2,32	2,68	2,63	1,10

Fonte: O autor.

O cimento Portland CP-V (ARI) apresenta praticamente a mesma porcentagem de Ca que a CBFM. Outros elementos também estão presentes na composição de ambos os materiais, como o Si, Fe, K e o S. A principal diferença é a porcentagem de Si encontrado nos dois materiais, enquanto o cimento Portland CP V (ARI) possui em média 19,50% de Si, a CBFM possui apenas 4,20%, e, enquanto o cimento possui potássio em reduzidas porcentagens, a CBFM possui 25,90% de potássio.

O potássio não é um componente direto do cimento Portland, mas pode estar presente em pequenas quantidades como impureza ou adição intencional. A reação do potássio com o cimento Portland depende da forma química em que está presente e da quantidade envolvida. Uma das interações possíveis deste elemento com o cimento é o efeito acelerador, quando presente como íon  $K^+$  dissolvido na água de amassamento. Isso significa que a presença de potássio em concentrações adequadas pode acelerar o processo de endurecimento e ganho inicial de resistência do concreto (HEWLETT; LISKA, 2019).

Em quantidades moderadas, o potássio pode contribuir para a formação de hidratos adicionais, como aluminossilicato de potássio (K-A-S-H), que pode melhorar a resistência e a durabilidade do concreto. No entanto, é importante manter as proporções adequadas e não ultrapassar a quantidade recomendada, pois altas concentrações de potássio podem ter efeitos adversos como a ação com sulfatos (HEWLETT; LISKA, 2019; STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF *et al.*, 2002).

O potássio também pode reagir com sulfatos, que podem estar presentes na água ou no solo, formando compostos como o silicoaluminato de potássio ( $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3$ ). Essa reação pode levar à expansão do concreto e à formação de produtos indesejáveis, como etringita, causando danos e rachaduras (NEVILLE, 2010).

O excesso de potássio no concreto e na argamassa pode levar a alguns efeitos indesejáveis, como a redução da resistência mecânica, o aumento da reação álcali-agregado, a diminuição da durabilidade do concreto e problemas com acabamento superficial (HEWLETT; LISKA, 2019).

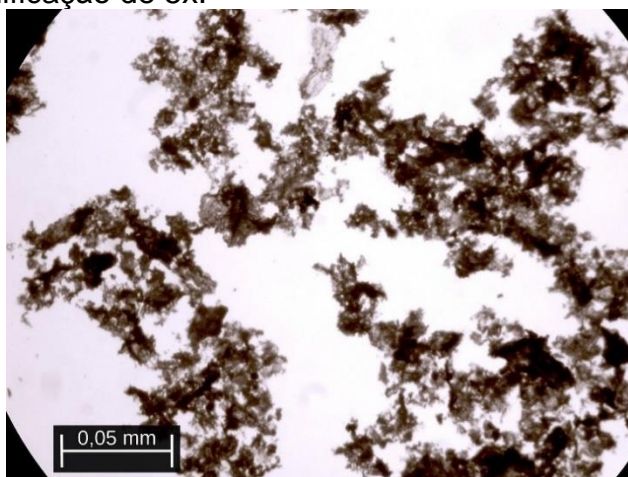
Destaca-se que a presença de potássio no concreto não é necessariamente prejudicial, desde que esteja dentro dos limites adequados. O controle adequado da dosagem de aditivos, seleção de materiais e proporções corretas de componentes são cruciais para evitar problemas causados pelo excesso de potássio no concreto.

#### **4.3.5 Caracterização por Microscopia**

Para esta caracterização da CBFM foi realizado uma análise de microscopia óptica para investigar a morfologia das partículas da cinza.

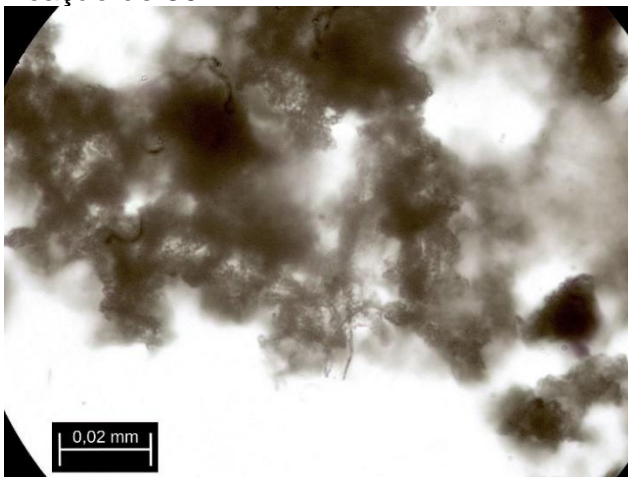
Nas Figuras 15 e 16 é possível observar a CBFM em duas magnificações onde é possível constatar que não há a formação de grandes aglomerados, com uma boa dispersão das partículas com tamanhos estimado, médios na ordem de 0,02 a 0,05 mm (20 a 50  $\mu\text{m}$ ) em função da CBFM ter passado pela peneira de 45  $\mu\text{m}$  para realização das análises.

Figura 15 - Imagem de microscopia óptica realizada na CBFM após queima a 650°C com magnificação de 5x.



Fonte: O autor.

Figura 16 - Imagem de microscopia óptica realizada na CBFM após queima a 650°C com magnificação de 50x.



Fonte: O autor.

Os resultados estão em conformidade com as características esperadas para o cimento. A granulometria do cimento Portland no Brasil, regida pela norma NBR 11579 (ABNT, 2012), estabelece que majoritariamente o cimento Portland

normal deve apresentar tamanho máximo de 75  $\mu\text{m}$ . Portanto, a CBFM possui ordem de grandeza de suas partículas semelhante ao cimento, favorecendo a possibilidade de substituição e se adequando as normativas previstas.

#### 4.3.6 Massa específica

A partir da normativa ABNT NM 23/2000 foi possível determinar a massa específica do cimento, do hidróxido de cálcio e da CBFM queimada a 650°C por duas horas. O Quadro 11, apresenta a quantidade de massa ensaiada, e o resultado da massa específica obtido a partir da técnica utilizada.

Quadro 11 - Resultados do ensaio de massa específica NM 23/2000.

Material	Massa ensaiada (g)	Volume deslocado ( $\text{cm}^3$ )	Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Cimento	60	20	3
Hidroxido de Calcio	50	20,8	2,40
CBFM 1	37	20,6	1,80

Fonte: O autor.

A massa específica do cimento é uma característica essencial para a produção de concretos e argamassas de alta qualidade. Uma densidade adequada pode contribuir para a obtenção de concretos com resistências mecânicas desejadas e argamassas com boa trabalhabilidade, além de possibilitar a realização cálculos mais precisos para a proporção dos materiais na mistura.

Os resultados encontrados para a massa específica do cimento e do hidróxido de cálcio P.A, vão de encontro com os resultados encontrados na literatura (HOPPE FILHO *et al.*, 2017; MEDEIROS *et al.*, 2015; PÁDUA, 2012; PAULA *et al.*, 2009), o que evidencia a confiabilidade e reprodutibilidade dos ensaios realizados.

A partir dos resultados é possível concluir que a CBFM possui 60% da massa específica do cimento, ou seja, para uma aplicação direta de substituição do cimento pela cinza, seria possível reduzir aproximadamente 40% da massa



específica. Portanto, entende-se que a possibilidade de substituição do cimento pela cinza do bagaço da fécula de mandioca, mesmo em pequenas proporções poderá contribuir para redução do peso próprio das estruturas, o que implicará em menores gastos com fundações.

#### 4.4 Caracterização de CPs

##### 4.4.1 Pozolanicidade

###### 4.4.1.1- Índice de atividade pozolânica com cal (NBR 5751)

Os métodos recomendados na norma não possuem restrições quanto ao volume de água nas amostras para obter um índice de consistência pré-determinado. Conseqüentemente, adição da CBFM de alta área superficial tendem a exigir um maior volume de água de amassamento, reduzindo conseqüentemente a resistência à compressão da argamassa (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

O Quadro 12 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas contendo o hidróxido de cálcio, areia normalizada e a adição da CBFM.

Quadro 12 - Resultado IAP com cal para a CBFM.

Corpo de Prova	Resistência (MPa)
1	1,08
2	1,02
3	1,02
<b>Média</b>	<b>1,04</b>

Fonte: O autor

As argamassas contendo cinza do bagaço da fécula de mandioca não atingiram a resistência à compressão mínima de 6,0 MPa preconizada pela NBR 12.653/2014 e, portanto, com base na metodologia de avaliação da atividade pozolânica proposta pela NBR 5.751/2015, não há atividade química significativa entre o hidróxido de cálcio e a CBFM.

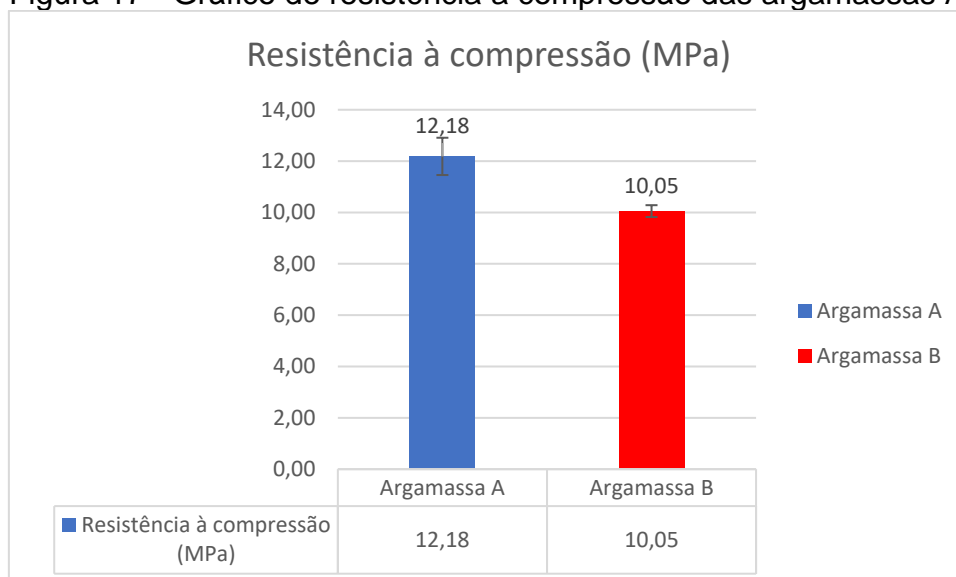
Esse resultado era esperado uma vez que a análise composicional por EDX mostrou a baixa quantidade de silício (Si), apenas 4,20%, e a análise estrutural, por DRX, revelou apresentou baixa concentração deste material na fase amorfa, responsáveis pelas reações químicas de hidratação que resultam

na formação de compostos como o silicato de cálcio hidratado (CSH) além dos supracitados C3S e C2S. Essas reações de hidratação são essenciais para o endurecimento do concreto, tornando-o um material resistente (HEWLETT; LISKA, 2019; NEVILLE, 2010).

#### 4.4.1.2- Índice de atividade pozolânica com cimento (NBR 5752/2014)

A Figura 17 apresenta a resistência à compressão da argamassa A (cimento Portland) e da argamassa B contendo a CBFM. A argamassa A atingiu, em média, a resistência à compressão de 12,18 MPa, enquanto a substituição de 25% do cimento pela CBFM, conforme previsto na norma (NBR 5752/2014), para o ensaio, reduziu a resistência para 10,05 MPa.

Figura 17 - Gráfico de resistência a compressão das argamassas A e B.



Fonte: O autor.

O índice de desempenho com cimento Portland ( $I_{\text{cimento}}$ ) foi de 82,51%, ou seja, uma queda da resistência de 17,49% aproximadamente. As prescrições da norma NBR 12.653/2014 estabelecem um percentual mínimo de 90% da resistência à compressão da argamassa de referência para atribuir potencial pozolânico à CBFM ensaiada. Assim, para o cimento utilizado neste trabalho, a argamassa com CBFM deveriam atingir uma resistência mínima de 10,96 MPa, o que não ocorreu e, portanto, não são consideradas pozolana. Esse resultado

corroborar com o resultado obtido pelo índice de atividade pozolânica (IAP) com cal e com os demais ensaios supracitados no tópico anterior. Embora não tenha atingido o valor mínimo de 90% da resistência da argamassa A, o resultado do teste de resistência a compressão da argamassa B, sugere que a CBFM, que não interagiu suficientemente com o hidróxido de cálcio no ensaio de IAP com cal, reagiu positivamente com cimento com resistência equivalente a 82,51% da resistência da argamassa A em uma substituição de 25% do cimento no traço.

#### 4.4.1.3- Propriedades limites para diferentes classes de material pozolânico (NBR 12653)

Para a caracterização das propriedades da CBFM mediante ao comportamento de material pozolânico foram realizados ensaios complementares de determinação, como o teor de umidade, perda ao fogo e porcentagem retida na peneira 45  $\mu\text{m}$ .

Os resultados destes ensaios bem como as características físicas da CBFM foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 12653/2014 para constatação da hipótese da CBFM se enquadrar em alguma das classes de materiais pozolânicos. De acordo com os resultados apresentados no Quadro 13, a CBFM não pode ser classificado como material pozolânico, pois, excetuando-se a porcentagem retida na peneira 45  $\mu\text{m}$ , esteve fora de todos os limites estabelecidos pela norma.

Quadro 13 - Comparação das propriedades da CBFM com os limites estabelecidos pela NBR 12653.

Propriedades	Limites para diferentes materiais pozolânicos			CBFM	Método de ensaio
	N	C	E		
Teor de umidade	≤3%	≤3%	≤3%	6,00%	NM 24
Perda ao fogo	≤10%	≤6%	≤6%	52,18%	NM 18
% máxima retida na peneira 45 µm	<20%	<20%	<20%	16,54%	NBR15894-3
Índice de atividade pozolânica:					
com a cal aos 7 dias, em MPa	≥6	≥6	≥6	1,04	NBR 5751
com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	82,51	NBR 5752

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (2014).

Embora a CBFM não tenha se enquadrado nos limites estabelecido na norma, os materiais não pozolânicos também podem oferecer outras maneiras de beneficiar a argamassa. Materiais não pozolânicos podem influenciar em características como aumento ou redução da trabalhabilidade, pode reduzir a segregação, melhora da aderência, controle da retração, reações de hidratação tardia, aumento da resistência inicial ou até mesmo na melhoria estética das estruturas construídas (BARBOZA, 2018; RIGHI; NAKANISHI; MOHAMAD, 2017; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2011).

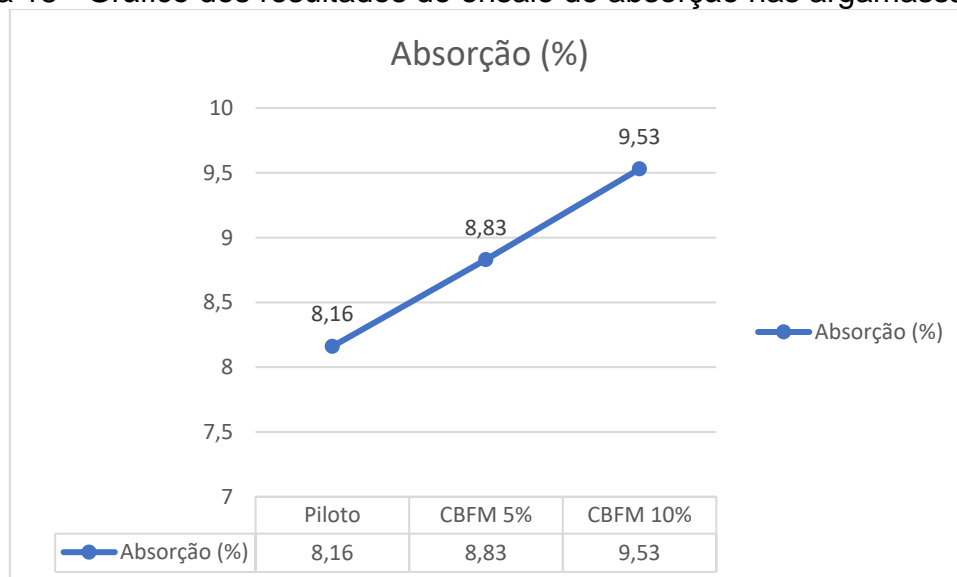
#### **4.4.2- Resultados das análises físicas e mecânicas dos corpos de prova de argamassa**

4.4.2.1- Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica para a argamassa (NBR 9778/2005)

Os resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios são fundamentais para entender a porosidade e a capacidade de retenção de água em concretos e argamassas. Essas propriedades têm implicações diretas na durabilidade, resistência e no desempenho geral do material (MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021; NEVILLE, 2016; RIBEIRO, 2002; SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986).

Os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios para as amostras de argamassa Piloto, CBFM 5% e CBFM 10% são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Gráfico dos resultados do ensaio de absorção nas argamassas.



Fonte: O autor.

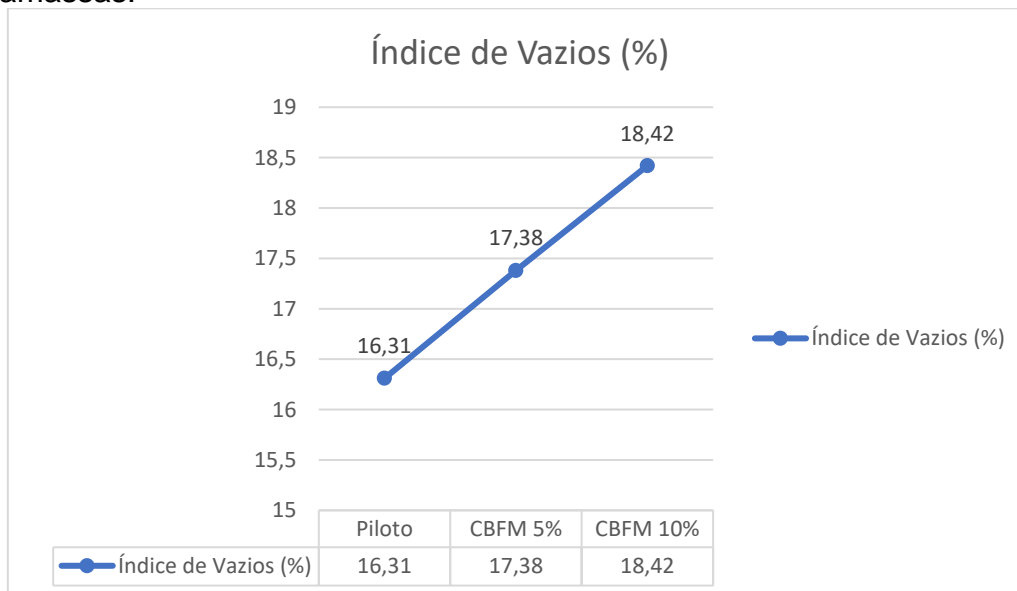
Observa-se que conforme aumenta a substituição da CBFM no traço, maior é a absorção da argamassa. O gráfico na Figura 18 apresenta uma reta linear de aumento da absorção em relação ao aumento da substituição do cimento pela CBFM, tendenciando que, quanto maior for a substituição, maior será a absorção da argamassa.

A argamassa Piloto apresentou o menor, e, portanto, o melhor índice de absorção seguido pela argamassa CBFM 5% e a CBFM 10%, que apresentou o pior desempenho.

Segundo a *International Tunnelling Association* o índice de absorção entre 8% e 9% indicam que o material apresenta qualidade aceitável (ASSOCIATION INTERNATIONAL TUNNELLING, 1993). Neste contexto, as argamassas Piloto e CBFM 5% apresentam qualidade aceitável do ponto de vista do índice de absorção apresentado, enquanto a CBFM 10% encontra-se fora dos valores toleráveis.

Os resultados do ensaio de índice de vazios para as argamassas estão apresentados na Figura 19:

Figura 19 - Gráfico dos resultados do ensaio de índice de vazios nas argamassas.



Fonte: O autor.

O resultado do ensaio do índice de vazios reforça os resultados de absorção, quanto maior a substituição do cimento pela CBFM, maior o índice de vazios e, portanto, maior a absorção. O gráfico na Figura 19 também apresenta uma reta de crescimento linear do índice de vazios de acordo com o aumento de substituição.

O índice de vazios da argamassa CBFM 5% aumentaram em 6,56% em relação a argamassa Piloto, enquanto a CBFM 10% apresentou um aumento de 12,94%.

A relação entre o aumento na substituição do cimento pela CBFM e o aumento do índice de vazios e absorção é praticamente direta, o dobro de substituição apresentou praticamente o dobro de aumento no índice de vazios e de absorção em relação a argamassa Piloto.

O aumento da absorção e do índice de vazios pode influenciar diretamente no tempo de vida útil das estruturas e deve ser observado para as substituições do cimento pela CBFM, pois a grande parte dos processos de degradação em materiais cimentícios está intimamente ligada à presença de

água em sua microestrutura (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020; MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021; MEHTA, P.K., MONTEIRO, 2006).

A Figura 20 apresenta as imagens ampliadas dos CPs após a ruptura, sem incorporação do resíduo (Figura 20A) e com a substituição de 5 e 10% do cimento pela CBFM (Figuras 20 B e C respectivamente).

Figura 20 - Imagem de microscopia óptica realizada na Argamassa piloto, e com 5 e 10% de CBFM.



Fonte: O autor.

Do ponto de vista microestrutural não houve diferenças significativas analisadas nas fraturas. A substituição do cimento pelo resíduo não apresentou propagação de fissuras nem zonas preferenciais de ruptura e baixa porosidade.

O ligante permaneceu homogêneo e interagiu adequadamente com o agregado (areia normal), não foi possível analisar pela imagem diferenças de porosidade entre as amostras.

Nesse sentido, a avaliação da massa específica seca, saturada e real é fundamental para entender a porosidade, a densidade e a capacidade de absorção de água das argamassas. Essas propriedades influenciam diretamente a resistência, a durabilidade e a capacidade de isolamento térmico e acústico do material.

Os resultados dos cálculos de massa específica seca, saturada e real para diferentes amostras de argamassa estão apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 - Resultados de Massa Específica Seca, Saturada e Real em Argamassas.

<b>Amostra</b>	<b>Massa Específica Seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Específica Saturada (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Piloto</b>	2,00	2,16	2,39
<b>CBFM 5%</b>	1,97	2,14	2,38
<b>CBFM 10%</b>	1,93	2,12	2,37

Fonte: O autor.

A massa específica seca representa a densidade da argamassa em seu estado natural, sem considerar a influência da umidade. A amostra Piloto possui a maior massa específica seca, indicando uma densidade mais elevada em comparação com as outras amostras. Essa previsão era esperada, uma vez que, a massa específica da CBFM é bem menor do que a massa específica do cimento.

A massa específica saturada reflete a capacidade máxima de absorção de água da argamassa. Embora a argamassa Piloto tenha obtido o maior valor de massa específica saturada, foi a argamassa CBFM 10% que apresentou o maior ganho de massa específica em porcentagem em relação a massa específica seca, indicando uma maior porosidade e capacidade de retenção de água em comparação com as amostras Piloto e CBFM 5%.

A massa específica real considera tanto a umidade da argamassa quanto sua porosidade. A amostra Piloto possui a maior massa específica real, seguida pela argamassa CBFM 5% e CBFM 10%.

Novamente, a relação entre a massa específica seca e a real indica que a amostra CBFM 10%, tem uma maior quantidade de água absorvida e, uma maior porosidade em comparação com as outras amostras, o que foi comprovado nos cálculos de absorção e índice de vazios supracitados.

#### 4.4.2.2- Ensaio de resistência à compressão (NBR 7215/2019)

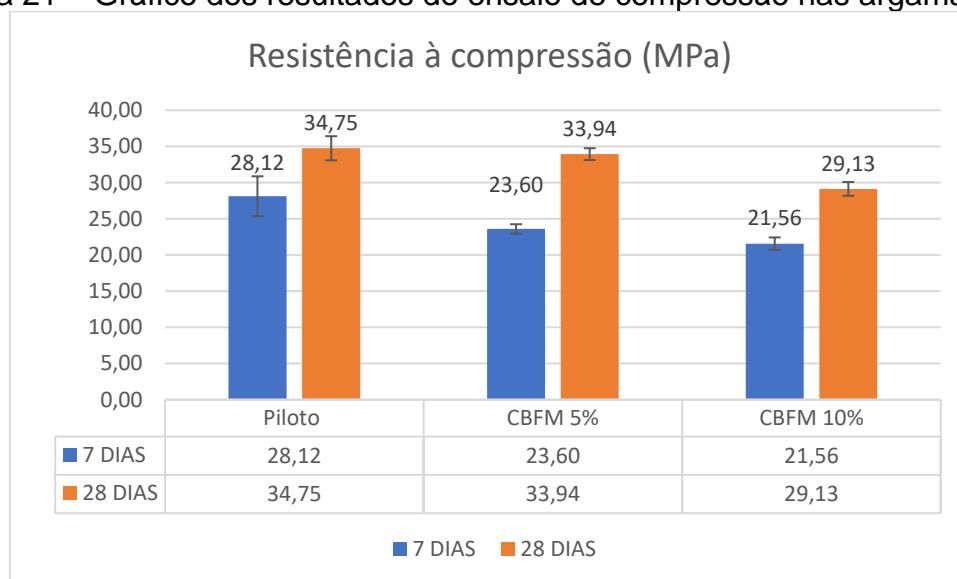
O ensaio de compressão foi realizado para avaliar a resistência mecânica das amostras de argamassa com e sem a substituição do cimento pela CBFM.



A resistência à compressão é um indicador fundamental da capacidade da argamassa de suportar cargas e estresses.

As amostras de argamassa piloto, CBFM 5% e CBFM 10% foram testadas e suas resistências à compressão foram medidas em 7 e 28 dias após a moldagem. Os resultados do ensaio de compressão estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico dos resultados do ensaio de compressão nas argamassas.



Fonte: O autor.

Todos os resultados apresentaram desvio relativo máximo (DRM), menor que 6%, conforme indicado na NBR 7215/2019. A resistência a compressão aumentou nas argamassas conforme a idade. As argamassas com substituição de 5 e 10% de cimento representaram respectivamente, 97,64% e 83,83% da resistência obtida pela argamassa piloto, ou seja, uma queda de resistência final na ordem de 2,36% e 16,17% respectivamente.

A diminuição das resistências para as amostras de CBFM 5% e CBFM 10% era esperada, já que houve um aumento da absorção e índice de vazios para as amostras analisadas na idade de 28 dias. Destaca-se, que a resistência à compressão tende a diminuir à medida que a porosidade do concreto aumenta (MEHTA, P.K., MONTEIRO, 2006; NEVILLE, 2016).

Embora tenha apresentado uma resistência aos 28 dias de idade menor do que a argamassa piloto, as argamassas com CBFM, apresentaram maior

ganho de resistência entre 7 e 28 dias do que a argamassa piloto, o que pode significar um ganho de resistência tardio das massas com a substituição. A argamassa da CBFM 5% teve um ganho de 30% da sua resistência nesse período, a CBFM 10% teve um aumento de 25,99% enquanto a argamassa piloto teve um ganho de resistência apenas de 19,08%.

O ganho tardio de resistência das argamassas com substituição do cimento, superior ao da argamassa sem substituição, pode indicar que, em idades superiores aos 28 dias, a substituição da CBFM pode igualar ou até mesmo superar a resistência das argamassas sem substituição.

Casos semelhantes são encontrados na literatura como na pesquisa de (ZAPARTE, 2020) com a cinza da casca do arroz (CCA). Nas idades iniciais, a argamassa sem substituição (referência), alcançou melhores resultados dentre todas as argamassas produzidas com CCA. Entretanto, a partir dos 28 dias, as argamassas com CCA, alcançaram valores próximos e até superiores ao da argamassa de referência. Após 90 dias, todas as argamassas com CCA superaram o valor de resistência à compressão atingido pela referência.

A explicação para esse fenômeno, segundo (FAPOHUNDA; AKINBILE; SHITTU, 2017), está relacionada a estrutura porosa do resíduo que absorve mais água durante a mistura, fazendo com que a pozolana reaja mais lentamente, reduzindo assim a taxa de hidratação do cimento nas primeiras idades.

Portanto, a redução inicial da taxa de hidratação do cimento pode interferir nos resultados de resistência à compressão obtidos aos 7 dias de idade, mascarando possíveis potenciais de ganho mecânico da CBFM, como ocorreu com a cinza de casca de arroz na pesquisa de Zaparte (2020).

Ainda, para Zaparte (2020), a completa interação da sílica com o  $\text{Ca(OH)}_2$  pode ocorrer em até 28 dias, enquanto que com cinzas volantes pode demorar mais que 90 dias.

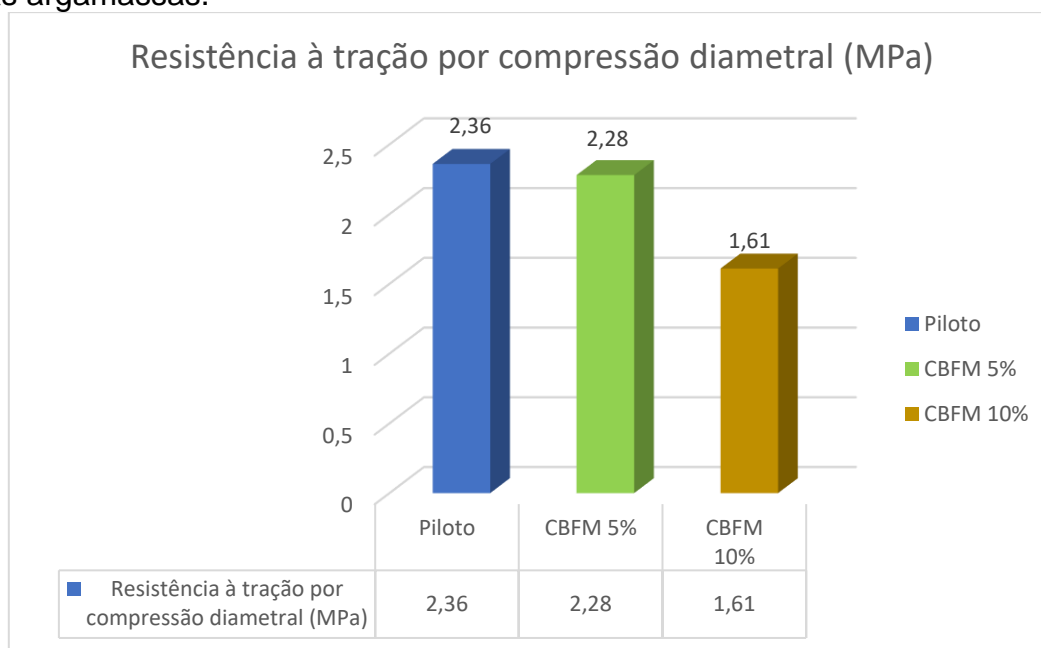
#### 4.4.2.3- Ensaio de tração por compressão diametral (NBR 7222/2011)

O ensaio de tração por compressão diametral foi conduzido com o objetivo de avaliar a resistência à tração indireta das amostras de argamassa. Esse ensaio é fundamental para determinar como a argamassa resiste a forças de

tração, o que é essencial para entender as propriedades mecânicas do material, garantir sua qualidade e segurança em diferentes aplicações e contribuir para o avanço da engenharia de materiais e construção (CAMPELO, 2023).

As amostras de argamassa Piloto, CBFM 5% e CBFM 10% foram ensaiadas com 28 dias de idade. Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral são apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico dos resultados do ensaio de tração por compressão diametral nas argamassas.



Fonte: O autor.

As argamassas com substituição de 5 e 10% de cimento, apresentaram uma redução da resistência a tração em relação a argamassa Piloto. A queda de resistência apresentada pela CBFM 5% e pela CBFM 10% é de 3,39% e 31,78% respectivamente.

Pode-se observar que a argamassa CBFM 5% se aproximam bastante da resistência obtida pela argamassa piloto, enquanto a argamassa da CBFM 10% se afasta vertiginosamente dadas as proporções de substituição.

Os valores de resistência à tração relatados na literatura, estimam valores iguais ou superiores a 2,00 MPa (CAMPELO, 2023). Os resultados obtidos para a argamassa Piloto e para CBFM 5% se enquadram dentro desta expectativa, e,

portanto, atente ao requisito de resistência à tração, enquanto o resultado da CBFM 10% difere do esperado.

Ainda segundo a literatura, a relação típica da resistência à tração por compressão diametral pela resistência à compressão axial é em média de 7 a 8% podendo chegar até 10% da resistência à compressão (MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021; NEVILLE, 2016; SCANDIUZZI; ANDRIOLO, 1986).

Nas argamassas testadas nesta pesquisa, a relação entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência a compressão, representou para a argamassa piloto, CBFM 5% e CBFM 10%, os valores de 6,79%, 6,72% e 5,53% respectivamente. Novamente a argamassa com 5% de substituição do cimento apresentou características mecânicas similares ao traço sem a CBFM.

Destaca-se que alguns agrosólidos têm maior capacidade de absorção de água do que os agregados convencionais. A maior necessidade de hidratação pode resultar em inchaço e expansão das partículas, causando maiores vazios, aumentando a porosidade e conseqüentemente a absorção de água e, reduzindo a resistência à tração (MEERT; HASTENPFLUG; ANDRADE, 2021).

## 5. CONCLUSÕES

Os estudos de caracterização e aplicação da cinza do bagaço da fécula de mandioca permitiram compreender profundamente as propriedades do resíduo e qual a sua influência em substituições de 5 e 10% do cimento em argamassas.

A pesquisa realizada junto as fecularias, possibilitou quantificar a geração do resíduo sólido na produção da fécula, e seu atual panorama como destinação, custo, além de propiciar a percepção e como poderia ser empregado a reutilização do resíduo na própria cadeia produtiva da fécula.

Após a secagem do bagaço em estufa, o material perdeu cerca de 90% de massa e se apresentou de maneira semelhante a um carvão natural, capaz de ser utilizado nas caldeiras de secagem da fécula como energia suplementar para manter o fogo em substituição das lenhas utilizadas atualmente.

Com os processos de secagem e queima, o volume do resíduo é reduzido drasticamente, resolvendo um problema inicial das fecularias que é a destinação e a estocagem desse resíduo além de proporcionar energia nas caldeiras evitando uma queima extra com liberação de gases do efeito estufa.

O produto da queima, a cinza do bagaço da fécula de mandioca (CBFM), ainda foi colocado sobre a ótica de pesquisa na possibilidade de apresentar propriedades interessantes para matrizes cimentícias como outros casos de sucesso encontrados na literatura.

O ensaio de FTIR apresentou picos característicos principalmente de elementos como Si e Ca, o que se confirmou com o ensaio de DRX e EDX, além do Ca e do Si, a CBFM possui bastante K em sua composição química. A queima a 650°C foi a escolhida por apresentar o maior halo característico de presença de sílica amorfa.

Embora a CBFM, tenha apresentado alguns elementos bem similares ao cimento Portland CPV- ARI, a baixa presença de Si (4,20%) foi determinante para os resultados mecânicos observados até a idade de 28 dias das argamassas com substituição de 5 e 10%.

O ensaio de DSC realizado na CBFM, mostrou que o material é estável calorimetricamente quando submetido a temperaturas até 500°C, e, portanto,

poderia ser aplicado a matrizes cimentícias sem apresentar pontos frágeis de calor.

Através do ensaio de microscopia óptica aplicada a CBFM, foi possível constatar que o material não fica aglomerado e possui grandeza semelhante as partículas do cimento. Quando analisado as fraturas de argamassas, não foi possível relatar diferenças observáveis a magnitude aplicada, as argamassas CBFM 5% e CBFM 10% não apresentaram propagação de fissuras nem zonas preferenciais de ruptura.

Ensaída ao índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento, a CBFM proporcionou uma eficiência de 82,51%, abaixo dos 90% estabelecidos na norma NBR 5752/2014 para ser caracterizado como material pozolânico, resultado semelhante foi obtido pelo IAP com cal que corroboram com a análise das propriedades de teor de umidade, perda ao fogo e porcentagem retida na peneira 45 µm e com os resultados analisados pelo DRX, EDX e FTIR.

As argamassas com a CBFM apresentaram maior índice de vazios e absorção de água em relação a argamassa sem CBFM. Entretanto, a CBFM 5% se enquadra dentro dos parâmetros de absorção estabelecidos pela *International Tunnelling Association*.

As argamassas com substituição de 5 e 10% de cimento representaram respectivamente, 97,64% e 83,83% da resistência obtida pela argamassa piloto, sendo que apresentaram maior ganho de resistência entre 7 e 28 dias. Há expectativa de que a devido ao ganho maior entre o período de cura de 7 e 28 dias, a CBFM 5% possa alcançar ou mesmo superar a resistência da argamassa Piloto.

Todavia, os resultados de resistência à compressão e tração por compressão diametral são coerentes com os resultados de absorção e índice de vazios. Quanto menor a absorção, maior a resistência mecânica analisada.

A argamassa CBFM 5%, apresentou desempenho satisfatório no ensaio de tração por compressão diametral e esteve dentro dos parâmetros esperados, tanto de resistência absoluta, quanto relativa à resistência a compressão axial.

Mediante a todos os ensaios realizados, conclui-se que o bagaço da fécula poderia ser reinserido no processo de industrialização da fécula e a cinza

resultante da queima, possui propriedades mecânicas e físicas próximas ao compósito cimentício sem substituição quando em porcentagem de substituição de até 5%.

Dentre as argamassas com CBFM a amostra com 5% de substituição obteve os melhores resultados, estando sempre muito próximo ao desempenho da argamassa Piloto, e atendendo os mesmos requisitos. Portanto, o compósito cimentício com 5% de substituição, tem potencial para ser aplicado em concretos não estruturais, como: concretos porosos para drenagem, concretos leves por possuir menor massa específica que o cimento convencional, confecção de calçadas, pontos de ônibus, bancos de concretos, e, em argamassas de uso comum, como: argamassas de regularização de laje, argamassas de assentamento, argamassas de revestimento.

Ressalta-se que o uso de resíduos agroindustriais misturados ao cimento, como adição ou substituição, não é motivado apenas em razão dos benefícios técnicos. A redução no gasto energético na produção do cimento Portland, diminui os custos, assim como a poluição gerada pelo processo de queima do clínquer (ZAPARTE, 2020).

Nesse contexto, a substituição de 5% do cimento pela CBFM, proporcionaria, em termos diretos, a uma redução de 3 milhões de toneladas por ano de CO<sub>2</sub> só no Brasil e, cerca de, 100 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano na China, o que já seria um passo importante para o setor da construção civil em direção a um padrão de crescimento sustentável.

## 6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

Estudar a inserção de outras porcentagens de CBFM em argamassas, essa prática permitirá a obtenção de maiores conhecimentos do desempenho do compósito cimentício com a CBFM.

Estudar a inserção da CBFM em argamassas com outras temperaturas de queima, será importante para identificar se alguma outra temperatura ou um maior tempo de exposição à temperatura máxima produzirá uma cinza com maior proporção de Si amorfa, podendo apresentar resultados superiores aos encontrados nesta pesquisa.

Estudar a inserção da CBFM em estruturas de concretos, vai possibilitar investigar a interação da matriz cimentícia com um outro agregado natural, a brita. Resultados positivos desta pesquisa proporcionariam um impacto significativo na indústria do cimento, dado que o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo.

Realizar o ensaio de MEV nas fraturas das argamassas, vai possibilitar o melhor entendimento da interação da matriz cimentícia com os agregados.

Realização de ensaios complementares quanto a durabilidade, reação álcalis agregado, ataque de cloretos entre outros é que possibilitarão uma perspectiva melhor de como o compósito cimentício com a CBFM se comportaria a médio e a longo prazo e quando exposto a ambientes agressivos.

Quanto as adversidades encontradas na realização desta pesquisa, destaca-se a dificuldade para a produção das cinzas, uma vez que, 100 kg de bagaço de fécula de mandioca resultavam, após os processos de secagem, queima e peneiramento, em aproximadamente 600g de CBFM. A capacidade diária para produção de cinza, utilizando todas as muflas disponíveis para pesquisa, era de cerca de 12g por dia de CBFM.



## 7. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 11579 - Cimento Portland — determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.

ABNT. NBR 12653 - Materiais pozolânicos — requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. NBR 5751 - Materiais pozolânicos - determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. NBR 5752 - Materiais pozolânicos — determinação do índice de desempenho com cimento portland aos 28 dias. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. NBR 7214 - Areia normal para ensaio de cimento - especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. NBR 7215 - cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. NBR 7222 - Concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

ABNT. NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação de massa específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

ADAM, M. G. O. et al. Analysing the Effect of Cassava Flour as a Mixture on the Physical, Mechanical, and Durability Properties of High-Strength Concrete. **Civil Engineering Journal (Iran)**, v. 8, n. 12, p. 3866–3882, 2022.

ADEBISI, J. A. et al. Green production of silica nanoparticles from maize stalk. **Particulate Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 667–675, 2019.

ADESANYA, D. A.; RAHEEM, A. A. Development of corn cob ash blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 347–352, 2009.

AHMAD, W. et al. Sustainable approach of using sugarcane bagasse ash in

cement-based composites: A systematic review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, n. September, p. e00698, 2021.

AKINDAHUNSI, A. A.; SCHMIDT, W. Effect of cassava starch on shrinkage characteristics of concrete†. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 11, n. 4, p. 441–447, 2017.

ALANEME GEORGE, U.; MBADIKE ELVIS, M. Optimization of flexural strength of palm nut fibre concrete using Scheffe's theory. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 2, p. 272–287, 2019.

ALAVÉZ-RAMÍREZ, R. et al. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 296–305, 2012.

ALBUQUERQUE, D. **Os 20 maiores produtores de Mandioca**. Disponível em: <<https://sociotecnica.com.br/os-20-maiores-produtores-de-mandioca-do-mundo/>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ALEXANDRE, E.; LUZ, C. A. DA. Partial replacement of CPV-ARI cement by water treatment plant sludge (WTS). **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

ALI, N. et al. Chitosan-based green sorbent material for cations removal from an aqueous environment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104064, 2020.

AMARAL, L. DO; JAIGOBIND, A. G. A.; JAISINGH, S. **Processamento da Mandioca Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas**. [s.l: s.n.].

ANTIOHOS, S. K.; PAPADAKIS, V. G.; TSIMAS, S. Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness. **Cement and Concrete Research**, v. 61–62, p. 20–27, 2014.

AREL, H. Ş.; AYDIN, E. Use of industrial and agricultural wastes in construction concrete. **ACI Materials Journal**, v. 115, n. 1, p. 55–64, 2018.

ASSOCIATION INTERNATIONAL TUNNELLING, A. Shotcrete for rock support: a summary report of the state of the art in 15 countries. **Tunneling and Underground Space Technology**, v. 8, n. 4, p. 441–470, 1993.

AUGUSTO JUNIOR, J. et al. Estudo Das Propriedades De Blocos Sextavados De Concreto Para Pavimentação Com Uso De Resíduos De Construção Civil. **Colloquium Exactarum**, v. 9, n. 2, p. 65–76, 2017.

BAGCAL, O.; BACCAY, M. INFLUENCE OF AGRICULTURAL WASTE ASH AS POZZOLANA ON THE PHYSICAL PROPERTIES AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENT MORTAR. v. 9, n. 1, p. 29–36, 2019.

BARBOZA, L. DA S. **Produção de concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e sua influência na aderência aço-concreto.** [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2018.

BARROS, R. N.; SANTOS, M. DO S. M.; BATISTOTE, M. AVALIAÇÃO DO BAGAÇO DE MANDIOCA COMO UMA FONTE PROMISSORA PARA A PRODUÇÃO BIOETANOL. **Educação ambiental em ação**, v. xxi, p. 1–11, 2019.

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade Pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do Bagaço da cana de Açúcar com diferentes características Físico-Químicas.** [s.l.] Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.

BATOOL, F.; MASOOD, A.; ALI, M. Characterization of Sugarcane Bagasse Ash as Pozzolan and Influence on Concrete Properties. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 45, n. 5, p. 3891–3900, 2020.

BEHERA, P.; NOMAN, M. T.; PETRŮ, M. Enhanced mechanical properties of eucalyptus-basalt-based hybrid-reinforced cement composites. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 1–15, 2020.

BELLMANN, F.; STARK, J. Activation of blast furnace slag by a new method. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 8, p. 644–650, 2009.

BENITTEZ, L. H. **Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto.** [s.l.: s.n.].

BERENQUER, R. A. et al. Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103655, 2020.

BIE, R.-S. et al. Studies on effects of burning conditions and rice husk ash (RHA) blending amount on the mechanical behavior of cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 162–168, 2015.

BORGES, A. K. DE S. M.; MELO NETO, O. DE M.; MENDONÇA, A. M. G. D. Análise química-mineralógica de cimentos Portland comerciais. **Polymers**, v. 15,

n. August, p. 66–73, 2021.

BOTELHO, A. C. C. **Coagulantes orgânicos no tratamento da Manipueira de fecularia de mandioca.** [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2019.

BOTOSSO, L. N. et al. Propriedades Mecânicas E Morfológicas Do Concreto Com Substituição Parcial De Agregado Miúdo Por Resíduo De Cerâmica Vermelha. **Colloquium Exactarum**, v. 11, n. 1, p. 79–88, 2019.

BRASIL. **Presidência da República.** Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>.

BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS, A. **NBR 12653 - Pozolanic Materials - Requirements.** Rio de Janeiro, Brazil, 2014.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Callister's materials science and engineering.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2020.

CAMPELO, T. DE S. **Efeito da adição de pó de vidro e Sic para a produção de agregados leves a partir de argila não expansiva.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

CANDIDO, J. D. C. **Síntese e caracterização de hidrogéis com micropartículas de alginato carregados com neomicina e própolis.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2019.

CARVALHO BONILHA, Y. et al. Análise Das Propriedades De Blocos De Concreto Para Pavimento Intertravado Produzido Com Cinza Do Bagaço Da Cana-De-Açúcar. **Colloquium Exactarum**, v. 10, n. 4, p. 28–35, 2018.

CASTALDELLI, V. N. et al. Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials. **Materials**, v. 6, n. 8, p. 3108–3127, 2013.

CHANDRAMOULI, K. et al. International Journal of Research Publication and Reviews Investigation on Concrete by Partial Replacement of Fine Aggregate with Groundnut Shell Ash and cement With Titanium Dioxide. v. 3, n. 7, p. 1460–1462, 2022.

CHANDRASEKHAR, S. et al. Microsilica from rice husk as a possible substitute for condensed silica fume for high performance concrete. **Journal of Materials Science Letters**, v. 21, n. 16, p. 1245–1247, 2002.

ČIULADIENĒ, A. et al. Investigation of the chemical composition of red pigments and binding media. **Chemija**, v. 29, n. 4, p. 243–256, 2018.

COELHO, S. T. et al. **Municipal Solid Waste Energy Conversion in Developing Countries: Technologies, Best Practices, Challenges and Policy**. , 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10204/11933>>

COSENZA, J. P.; DE ANDRADE, E. M.; DE ASSUNÇÃO, G. M. A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 1–30, 2020.

DEGIRMENCI, N.; YILMAZ, A. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 284–288, 2009.

ERNESTO, V. **Caracterização Térmica do Bagaço da Cana-de-Açúcar Visando Aproveitamento Energético**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2009.

FAPOHUNDA, C.; AKINBILE, B.; SHITTU, A. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 675–692, 2017.

FERRÁNDIZ-MAS, V. et al. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 285–292, 2014.

FERREIRA, J. W. DOS S. et al. Análise Das Propriedades E Viabilidade Econômica Da Cerâmica Vermelha Utilizada Como Agregado Reciclado Miúdo Para Pavimentação. **Colloquium Exactarum**, v. 8, n. 3, p. 01–12, 2016.

FIGUEIREDO, F. et al. Analysis of Partial Substitution of Cement with Marble and Granite Powders in Concrete Production. **ACI Materials Journal**, v. 119, n. 6, 2022a.

FIGUEIREDO, F. et al. Concrete with partial replacement of natural aggregate by PET aggregate — An exploratory study about the influence in the compressive strength. v. 9, n. January, p. 172–183, 2022b.

FIGUEIREDO, F. B. et al. Produção de piso intertravado de concreto ( pavers )

com substituição parcial do agregado miúdo pelo grits , resíduo da indústria de papel e celulose Production of concrete blocks floor with partial replacement of the finne aggregate by grits , a waste fr. p. 31339–31351, 2022c.

FIGUEIREDO, F.; REIS, R. R.; MAIA, L. **Physical and Mechanical Properties of Concrete Made with Glass Sand BT - Environmental Restoration**. (D. K. Ashish, J. de Brito, Eds.)Cham: Springer International Publishing, 2022.

FIORDA, F. A.; SOARES, M.; JÚNIOR, S. Farinha de bagaço de mandioca : aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca 1. v. 2013, p. 408–416, 2013.

FOSTER, A.; ROBERTO, S. S.; IGARI, A. T. Economia Circular e Resíduos Sólidos: Uma Revisão Sistemática sobre a Eficiência Ambiental e Econômica. **ENGEMA, Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**, p. 17, 2016.

FRIOL GUEDES DE PAIVA, F. et al. Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, v. 285, 2021.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 6, p. 515–524, 2007.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1675–1683, 2008.

GARCIA LODEIRO, I. et al. Use of industrial by-products as alkaline cement activators. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119000, 2020.

GHODDOUSI, P.; ADELZADE SAADABADI, L. Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 219–228, 2017.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: [s.n.].

GIN, W. A. et al. Utilization of Cassava Peel Waste as A Raw Material for Activated Carbon Production : Approach to Environmental Protection in Nigeria. n. January, 2014.

GONÇALVES, F. DA S.; RAMALHO, A. R. DOS S. Biodigestão anaeróbia da manipueira gerada na casa de farinha no município de Branquinha/AL, Brasil. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 1, p. 36–47, 2021.

GUIMARÃES, J. N. **A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ARGAMASSA : UMA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE**. [s.l.] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

GUPTA, N.; SIDDIQUE, R.; BELARBI, R. Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: A Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124803, 2021.

GURSEL, A. P.; MARYMAN, H.; OSTERTAG, C. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 823–836, 2016.

HAO, Y. et al. Reexamining the relationships among urbanization, industrial structure, and environmental pollution in China—New evidence using the dynamic threshold panel model. **Energy Reports**, v. 6, p. 28–39, 2020.

HAQ, A. U. et al. A comparative sorption study of Cr<sup>3+</sup> and Cr<sup>6+</sup> using mango peels: Kinetic, equilibrium and thermodynamic. **Green Processing and Synthesis**, v. 8, n. 1, p. 337–347, 2019.

HE, J.; KAWASAKI, S.; ACHAL, V. The utilization of agricultural waste as biochar for optimizing swampland: a review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 980, n. 1, 2020.

HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea’s chemistry of cement and concrete**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2019.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas Cimento, Cinza Volante E Cal Hidratada**. [s.l.] Universidade de São Paulo (USP), 2008.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento portland (Parte i): índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e chapelle modificado. **Revista Materia**, v. 22, n. 3, 2017.

HUPA, M. Ash-related issues in fluidized-bed combustion of biomasses: Recent research highlights. **Energy and Fuels**, v. 26, n. 1, p. 4–14, 2012.

- IBRAHIM, M. I. J. et al. Extraction and characterization of Malaysian cassava starch, peel, and bagasse, and selected properties of the composites. In: **Biofiller-reinforced biodegradable polymer composites**. [s.l.] CRC Press, 2020. p. 267–283.
- JAYA PRITHIKA, A.; SEKAR, S. K. Mechanical and fracture characteristics of Eco-friendly concrete produced using coconut shell, ground granulated blast furnace slag and manufactured sand. **Construction and Building Materials**, v. 103, p. 1–7, 2016.
- JESUS, T. H. M. DE. **Aproveitamento do Resíduo de extração de fécula de mandioca para produção de etanol**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (UNESP), 2022.
- JHA, P.; SACHAN, A. K.; SINGH, R. P. Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, n. xxxx, p. 419–427, 2021.
- JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, G. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. Sao Paulo: IBRACON, 2010. p. 97–121.
- KELES, K. C. **Influência da basicidade da escória de alto-forno como adição ao concreto**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2011.
- KHAN, A. A. et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology**, v. 90, n. 1, p. 21–50, 2009.
- KHAN, R. et al. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 360–365, 2012.
- KIRAN, K.; KISHORE, I. S. An experimental study on partial replacement of cement with bagasse ash and metakaolin. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 8, n. 1, p. 452–455, 2017.
- KONE, B.; MWERO, J. N.; RONOH, E. K. Experimental Effect of Cassava Starch and Rice Husk Ash on Physical and Mechanical Properties of Concrete. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 70, n. 2, p. 343–350, 2022.
- KUMARI, A.; KUMAR, P. S. Experimental study on partial replacement of cement



by sugarcane bagasse ash. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 4, n. 7, p. 2347–6710, 2015.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Methodology of scientific work: research projects / bibliographic research / doctoral theses, master's dissertations, course completion papers**. 8th. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LE, H. T.; SIEWERT, K.; LUDWIG, H.-M. Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 10–19, 2015.

LOMBARDI, J. H. C. **SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**. [s.l.] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ ENGENHARIA CIVIL CAMPUS APUCARANA, 2019.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. DE. Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

MADEIRA, J. G. F. et al. Ecological analysis of hydrogen production via biogas steam reforming from cassava flour processing wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 709–716, 2017.

MAGDALENA, M. et al. Use of Cassava Wastewater Treated Anaerobically with Alkaline Agents as Fertilizer for Maize ( *Zea mays* L .). **BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY**, v. 53, n. February, p. 55–62, 2010.

MAMATHA, P.; NARAYANA, S. M. V; KUMAR, T. N. To Evaluate the Mechanical & Durability Properties of Nano Sugarcane Bagasse Ash in Cement Concrete. v. 3, n. 8, p. 425–430, 2017.

MEDEIROS, M. H. F. D. et al. High reactivity pozzolan: a critical evaluation of Pozzolanic Activity Index (PAI) with lime using X-Ray Diffraction. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 19–29, 2015.

MEERT, R.; HASTENPFLUG, D.; ANDRADE, J. J. DE O. Contribution to the use of wet sludge water treatment plant fine aggregate in portland cement concretes: Evaluation of consistency, density, porosity, absorption, strength and tensile strength. **Revista Materia**, v. 26, n. 3, 2021.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete : Microstructure , Properties , and Materials Hardcover** –. [s.l: s.n.].

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of Concrete. **Concrete International**, n. 4, p. 61–66, 2001.

MELO, G. R.; SILVA, T. T. S. D. ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA E ABORDAGEM NO MUNICÍPIO DE SERRA TALHADA-PE. **Revista multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 30, 2021.

MENEZES, R. M. R. O. et al. Effect of water content and particle size on the thermal decomposition of ground cement paste. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

MIRANDA, M. A. R. **O Limite De Aplicação Da Equação De Scherrer**. [s.l: s.n.]. NACIONAL, M. maio de 2023. n. 61, 2023.

NASCIMENTO, G. C. et al. Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 3, 2015.

NEVILLE, A. M. **Concrete Technology**. [s.l: s.n.]. v. 2

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5. ed. Sao Paulo : [s.n.].

OGBONNA, C.; MBADIKE, E. M.; ALANEME, G. U. Effects of cassava peel ash on mechanical properties of concrete. **Journal of Engineering and Technology (UJET)**, v. 6, n. 2, p. 16, 2020.

OGUNBODE, E. B. Turning waste to wealth : Potential of Laterized Concrete Using Cassava Peels Ash ( CPA ) Blended Cement. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 1, n. 3, 2012.

OLAFUSI, O.; OLUTOGE, F. A. Strength Properties of Corn Cob Ash Concrete Strength Properties of Corn Cob Ash Concrete. v. 3, n. May, p. 297–301, 2012.

OLIVEIRA, L. **O QUE NÃO TE CONTARAM SOBRE O CIMENTO**. Disponível em: <<https://www.edificaconsultoria.com.br/post/o-que-nao-te-contaram-sobre-o-cimento>>. Acesso em: 3 fev. 2023.

OLIVEIRA, R. DE S. **Avaliação dos impactos ambientais e aplicação das normas regulamentadoras de segurança do trabalho em uma unidade processadora de derivados mandioca na região noroeste do Paraná**. [s.l.]

- Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2013.
- OLUBUNMI A, A.; TAIYE J., A.; TOBI, A. Compressive Strength Properties of Cassava Peel Ash and Wood Ash in Concrete Production. **International Journal of New Practices in Management and Engineering**, v. 11, n. 01, p. 31–40, 2022.
- ONYELOWE, K. C. et al. Recycling and reuse of solid wastes; a hub for ecofriendly, ecoefficient and sustainable soil, concrete, wastewater and pavement reengineering. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 14, n. 3, p. 440–451, 2019.
- OTMZA, Engenharia Mecânica. Ensaio de Compressão. Otmza.com, 2020. Disponível em: <https://www.otmza.com.br/ensaio-de-compressao/>
- ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M.; DURMUŞ, H. İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423–434, 2016.
- PÁDUA, P. G. L. DE. **Desempenho De Compósitos Cimentícios Fabricados Com Cimentos Aditivados Com Cinzas De Bagaço De Cana-De-Açúcar in Natura E Beneficiadas**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- PARANÁ, G. DO. **Indústria paranaense produz 70% da fécula de mandioca do País**. Disponível em: <https://www.paginarural.com.br/noticia/285218/industria-paranaense-produz-70-da-fecula-de-mandioca-do-pais>. Acesso em: 4 jan. 2023.
- PATEL, M. et al. Experimental Study of Corn Cob Ash Concrete. **International Journal Of Innovative Research In Technology**, v. 6, n. 11, p. 110–112, 2020.
- PAULA, M. O. DE et al. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 353–357, 2009.
- PEIXOTO, T. DA S.; RESCH, S. **Resíduos de Mandioca: um estudo sobre a destinação da massa de mandioca pelas fecularias brasileiras. II encontro Iternacional de Gestão, desenvolvimento e inovação**, 2018.
- PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P.; MIKOWSKI, A. Propriedades nanomecânicas do silicato de cálcio hidratado de síntese. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 129–139, 2009.

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, Part A, p. 13012–13024, 2015.

PINAFFI, C. D. et al. Estudo E Análise Da Fabricação De Concreto a Partir Do Uso De Resíduos De Borracha De Pneus. **Colloquium Exactarum**, v. 4, n. Especial, p. 99–106, 2013.

PINTO, R. B. et al. Resíduos da Construção Civil: matéria prima verde a ser investigada. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 2, p. 1339–1351, 2019.

POTTY, N. S. et al. Properties of rice husk Ash (RHA and MIRHA) mortars. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 7, n. 18, p. 3872–3882, 2014.

RAHEEM, A. A. et al. Application of corn stalk ash as partial replacement for cement in the production of interlocking paving stones. **International Journal of Engineering Research in Africa**, v. 30, p. 85–93, 2017.

RAHEEM, A. A. et al. Application of corn Husk Ash as partial replacement for cement in the production of Interlocking Paving Stones. **LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies**, v. 1, n. 1, p. 14–20, 2018.

RAIHAN, A. et al. Nexus between carbon emissions, economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, technological innovation, and forest area towards achieving environmental sustainability in Bangladesh. **Energy and Climate Change**, v. 3, p. 100080, 2022.

RAMESH KUMAR, G. B.; KESAVAN, V. Study of structural properties evaluation on coconut fiber ash mixed concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 811–816, 2020.

RANJITH, A.; SANJITH, J.; KIRAN, B. M. Experimental Investigation on Performance of Sugarcane Bagasse Ash Concrete in Acidic Environment. **International Journal of Earth sciences and engineering**, v. 8, n. 2, p. 483–488, 2015.

REAL, R. P. **Avaliação da utilização da cinza da casca de arroz como adição mineral em concreto de alto desempenho**. [s.l.] Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018.

REIS, M. C. DOS et al. **Resíduos Agroindustriais Aplicados À Compósitos**

**Cimentícios / Agro-Industrial Waste Applied To Cementitious Composites.**

[s.l: s.n.].

RESENDE, D. S. DE. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2013.

RIBEIRO, C. C. **Materiais de construção civil.** [s.l.] Editora UFMG, 2002.

RIGHI, D. P.; NAKANISHI, E. Y. B.; MOHAMAD, G. Caracterização de Cinza de Casca de Arroz Com e Sem Queima. **Academa.Edu**, v. 3, p. 1–12, 2017.

ROMANO, R. C. O. et al. Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, n. 3, p. 2477–2490, 2018.

SALAU, M. A.; IKPONMWOSA, E. E.; KOLAWOLE ADISA OLONODE. Structural Strength Characteristics of Cement-Cassava Peel Ash Blended Concrete. v. 2, n. 10, p. 68–78, 2012.

SANTHOSH, K. G.; SUBHANI, S. M.; BAHURUDEEN, A. Cleaner production of concrete by using industrial by-products as fine aggregate: A sustainable solution to excessive river sand mining. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102415, 2021.

SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. **Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios.** [s.l.] Pini, 1986.

SCHETTINO, M. A. S.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of Sugarcane Bagasse ash Waste for Its Use in Ceramic Floor Tile. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 190–196, 2015.

SELVARANJAN, K. et al. Development of sustainable mortar using waste rice husk ash from rice mill plant: Physical and thermal properties. **Journal of Building Engineering**, v. 43, n. March, p. 102614, 2021.

SERPELL, R.; LOPEZ, M. Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 64, p. 16–26, 2015.

SHAMEEM BANU, S.; KARTHIKEYAN, J.; JAYABALAN, P. Effect of agro-waste on strength and durability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 120322, 2020.

- SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. [s.l: s.n.]. v. 29
- SILVA, R. F. DA. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73–82, 2020.
- SILVA, T. G. E. et al. Economia circular. **Revista Produção Online**, v. 21, n. 3, p. 951–972, 2021.
- SOUZA, J. M. DE et al. Mechanical and durability properties of compressed stabilized earth brick produced with cassava wastewater. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103290, 2021.
- SOUZA, J. M. DE. **Use of Cassava Wastewater and Scheelite Residues in Ceramic Formulations**. [s.l.] Springer International Publishing, 2021.
- SRINIVASAN, R.; SATHIYA, K. Experimental Study on Bagasse Ash in Concrete. **International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship**, v. 5, n. 2, p. 60–66, 2010.
- STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, 2015.
- TAMANNA, K. et al. Utilization of wood waste ash in construction technology: A review. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117654, 2020.
- TEIXEIRA, E. R.; CAMÕES, A.; BRANCO, F. G. Valorisation of wood fly ash on concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 292–310, 2019.
- TEJA, K. V.; SAI, P. P.; MEENA, T. Investigation on the behaviour of ternary blended concrete with scba and sf. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 263, 2017.
- TRADINGECONOMICS.COM. **China - Produção de Cimento**. Disponível em: <<https://pt.tradingeconomics.com/china/cement-production>>. Acesso em: 30 nov. 2022.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 247–276, 2011.
- VERMA, S. K.; DEB, M. K. Direct and rapid determination of sulphate in environmental samples with diffuse reflectance Fourier transform infrared

- spectroscopy using KBr substrate. **Talanta**, v. 71, n. 4, p. 1546–1552, 2007.
- VILHALVA, D. A. A. et al. Aproveitamento da farinha de casca de mandioca na elaboração de pão de forma Utilization of cassava peel flour for preparing loaf bread. **Rev Inst Adolfo Lutz**, v. 70, n. 4, p. 514–521, 2011.
- WANG, J. et al. Action mechanism of rice husk ash and the effect on main performances of cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123068, 2021.
- WATTHIER, E. et al. Cassava Wastewater Treatment in Fixed-Bed Reactors : Organic Matter Removal and Biogas Production. v. 3, n. March, p. 1–8, 2019.
- WOICIECHOWSKI, A. L. et al. Emprego de resíduos agroindustriais em bioprocessos alimentares. **Biotecnologia de alimentos, coleção Ciência, tecnologia, engenharia de alimentos e nutrição, editora Atheneu, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte**, v. 12, p. 143–172, 2013.
- YANG, W. et al. Performance investigation and environmental application of basic oxygen furnace slag – Rice husk ash based composite cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 493–500, 2016.
- YANG, Y. et al. Chitosan-capped ternary metal selenide nanocatalysts for efficient degradation of Congo red dye in sunlight irradiation. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 167, n. April, p. 169–181, 2021.
- ZAHEDI, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 354–361, 2015.
- ZAPARTE, T. A. **Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento Portland nas propriedades da argamassa de revestimento**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

## 8. ANEXO A

# Questionário

Este questionário tem o intuito de conhecer como o processamento da mandioca e o descarte dos seus resíduos são realizados no Brasil e no exterior para estudar a possibilidade da reutilização do material descartado na Construção Civil.

\*Obrigatório

### Perfil da empresa

1. Qual é o seu cargo na empresa?

---

---

---

---

---

---

2. Qual é a localização da empresa (cidade, estado e país)? \*

---

---

---

---

---

---



3. Há quanto tempo a empresa trabalha com o processamento da mandioca?

---

---

---

---

4. A empresa é de pequeno, médio ou grande porte? \* *Marcar apenas um oval.*

- Pequeno porte (até 99 colaboradores)
- Médio porte (100 a 499 colaboradores)
- Grande porte (500 ou mais colaboradores)

5. A empresa trabalha com outros produtos para além da Mandioca?

*Marcar apenas um oval.*

- Sim
- Não

6. Se sim, quais?

---

---

---

---

---

### Produção e tecnologia

7. Quais produtos da mandioca são feitos na empresa?

---

---

---

---

8. Qual o processamento diário de mandioca (toneladas) pela empresa? \*

---

---

---

---

---

9. Quanto de resíduo de mandioca (massa ou bagaço em toneladas) é gerado diariamente pela empresa?

---

---

---

---

---

10. Quanto de resíduo líquido (m<sup>3</sup>/hora) é gerado pela empresa? \*

---

---

---

---

---

11. Qual a quantidade (em toneladas) de resíduos (massa ou bagaço) que são produzidos para cada tonelada de mandioca processada?

---

---

---

---

12. Há secagem do resíduo (massa ou bagaço) da mandioca na empresa? \*

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

13. Se sim, qual tecnologia/processo a empresa utiliza para a secagem?

---

---

---

---

---

14. Se não, qual a justificativa? É realizada alguma manipulação do resíduo ainda úmido antes do descarte?

---

---

---

---

---

15. A empresa possui tecnologia para tratamento dos resíduos de outro produto comercializado por ela?

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

Destinação do resíduo

16. Qual é a destinação do resíduo sólido (massa ou bagaço) da mandioca pela empresa? \*

---

---

---

---

---

17. Qual destinação do resíduo líquido (manipueira) do processamento da mandioca? \*

---

---

---

---

---

18. Há comercialização do resíduo sólido (massa ou bagaço)? \*

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

19. Se sim, qual o valor de comercialização dos resíduos da mandioca (em tonelada) e sua destinação para o comprador?

- 
- 
- 
- 
- 
20. Quais os desafios para comercialização dos resíduos da mandioca? \*

Busca de alternativas

21. A empresa busca alternativas para uso próprio ou comercialização dos resíduos da mandioca?

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

22. Se sim, poderia citar quais são?
-

---

---

---

---

23. A empresa atualmente abrange pesquisas acadêmicas para aproveitamento de resíduos da mandioca?

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

24. Se sim, poderia citar quais são?

---

---

---

---

---

25. A empresa tem conhecimento sobre pesquisas voltadas para o aproveitamento dos resíduos da mandioca no setor da construção civil?

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

26. Se sim, saberia citar algum estudo?

---

---

---

---

---

27. A empresa possui alguma informação que ache relevante para essa pesquisa e ainda não foi questionada?

*Marcar apenas um oval.*

Sim

Não

28. Se sim, poderia citar?

---

---

---

---

---