

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL  
CAMPUS RIO VERDE**

**CIMENTO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-  
DE-AÇÚCAR DERIVADO DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime**

**Coorientador: Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis**

**Discente: Walkíria Pederiva Ferreira**

**RIO VERDE - GO**

**Março 2023**

**WALKÍRIA PEDERIVA FERREIRA**

**CIMENTO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR DERIVADO DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-Graduação – *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração (Engenharia Aplicada e Sustentabilidade).

Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime

Coorientador: Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis

**RIO VERDE - GO**

**Março 2023**

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

FF383c FERREIRA, WALKÍRIA PEDERIVA  
CIMENTO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DERIVADO DA INDÚSTRIA  
SUCROALCOOLEIRA / WALKÍRIA PEDERIVA FERREIRA;  
orientador Dr. Bacus de Oliveira NAHIME; co-  
orientador DR. IDALCI CRUVINEL DOS REIS. -- Rio  
Verde, 2023.  
57 p.

Dissertação (Mestrado em ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE) -- Instituto Federal Goiano,  
Campus Rio Verde, 2023.

1. Cimento sustentável. 2. Matriz cimentícia. 3.  
Cinzas de agroindústria. 4. Resíduo de indústria  
sucroalcooleira. 5. Reatividade pozolânica. I.  
NAHIME, Dr. Bacus de Oliveira, orient. II. REIS, DR.  
IDALCI CRUVINEL DOS, co-orient. III. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:      Não      Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:      /      /

O documento está sujeito a registro de patente?      Sim      Não

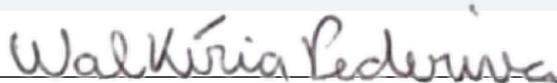
O documento pode vir a ser publicado como livro?      Sim      Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local      /      /  
Data



Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 45/2023 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**  
**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 63
Data: 29/03/2023	Hora de início: 10:00h	Hora de encerramento: 12:00h
Matrícula do discente:	2020202331440133	
Nome do discente:	Walkíria Pederiva Ferreira	
Título do trabalho:	CARACTERIZAÇÃO DE CIMENTO ECOLÓGICO COM SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NÃO TRATADAS	
Orientador:	Bacus de Oliveira Nahime	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e Ciência dos Materiais	
Projeto de pesquisa de vinculação	CARACTERIZAÇÃO DE CIMENTO ECOLÓGICO COM SUBSTITUIÇÃO DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime (Presidente da banca), Prof. Dr. Fabio Elias Freitas (Avaliador Externo), Prof. Dr. Philippe Barbosa Silva (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma presencial no auditório da DPPG, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de WALKÍRIA PEDERIVA FERREIRA, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Bacus de Oliveira Nahime, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

### Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- Philippe Barbosa Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/09/2023 15:22:34.
- Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/09/2023 15:19:45.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/09/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 530343  
Código de Autenticação: fe8b5a4060



## DEDICATÓRIA

*À minha Elisa Maria, meu grande amor.*

*Aos meus pais Iracema e Jorge.*

*À minha irmã Flávia.*

*A Rafael.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pois percebi sua presença em todos os momentos dessa caminhada, fortalecendo, guiando e consolando nos muitos momentos de dúvidas, tristezas e angústias.

À minha Elisa Maria, meu grande amor, por ter sido sempre meu esteio e por ser a criança mais doce que já conheci. Obrigada minha filha, por ter sido tão compreensiva nos muitos momentos de ausência física.

Aos meus irmãos Flávia e Éverson, pelo carinho e cuidado de sempre, aos meus pais Jorge e Iracema, por sempre me incentivar, orar por mim, por serem meu porto seguro e por serem o alicerce moral em que levantei meu caráter. Amo vocês demais.

A Rafael por ter “segurado as pontas” em muitos momentos e ter sido um pai gentil e compreensivo quando eu não pude estar.

Aos meus amigos tão queridos Beatriz Almeida, Sarah Schweig, Gabriell Borges em especial Gabriel Prudencio (que aprendeu o software de gráficos para poder me ensinar) por terem sempre uma palavra de incentivo e conforto em muitos momentos. Aos amigos e colegas que fiz no mestrado, Mateus Souza, Antônio Pires e Érica Caetano, fizemos muitas listas e atividades juntos, desejo que vocês tenham muito sucesso.

Ao meu orientador, Dr. Bacus de Oliveira Nahime e meu coorientador Idalci Cruvinel dos Reis, pelos conhecimentos compartilhados, pela paciência e pela compreensão.

A César Filho, por ter me ajudado demais na parte de laboratório e pelas várias vezes que ficou além do horário.

À Lorena Araújo, por ter me atendido todas as vezes que a procurei e pelo compartilhamento de tantos materiais e informações.

À Universidade de Rio Verde, por disponibilizar sua infraestrutura para a realização dos meus ensaios.

Em especial aos professores do PPGEAS e ao coordenador, professor Dr. Édio Damásio da Silva Junior, pelos ensinamentos e pela oportunidade oferecida.

A todas as pessoas que não consigo listar e que me ajudaram de alguma forma, não conquistei nada disso sozinha.

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

Walkíria Pederiva Ferreira, nascida em 13 de agosto de 1987 na cidade de Barra do Bugres, Mato Grosso. Graduada no curso de arquitetura e urbanismo da Universidade Estadual de Mato Grosso, campus de Barra do Bugres em 2013. Ingressou no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS) em outubro de 2020, realizando a defesa de sua dissertação em março de 2023.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	ix
RESUMO.....	12
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO .....	14
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Cimento Portland (CP).....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Referências .....</b>	<b>19</b>
2 OBJETIVOS.....	23
<b>2.1 Geral.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Específicos.....</b>	<b>23</b>
3 CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1 .....	24
<b>RESUMO .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Materiais e métodos .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1 Materiais .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1.1 Areia e cimento.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA).....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Métodos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3.1 Caracterização microestrutural das CBCA's e pastas .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.2 Preparação e caracterização das argamassas.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.3 Trabalhabilidade das argamassas.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.4 Resistência mecânica das argamassas .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.5 Absorção de água e índice de vazios .....</b>	<b>30</b>

3.3.6	Preparação e caracterização das pastas .....	31
3.4	Resultados e discussão .....	31
3.4.1	Caracterização química e física das CBCA's .....	31
3.4.2	Trabalhabilidade das argamassas.....	35
3.4.3.	Resistência mecânica.....	36
3.4.3.1	Resistência à compressão .....	36
3.4.3.2	Resistência à tração na flexão.....	38
3.4.4	Absorção de água e índice de vazios .....	39
3.3.5	Caracterização das pastas .....	40
3.5	Conclusões.....	47
3.6	Referências.....	48
4	CONCLUSÃO GERAL .....	53

## ÍNDICE DE TABELAS

### **CAPÍTULO I – ARTIGO I: INFLUÊNCIA DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NÃO TRATADAS EM ARGAMASSAS E PASTAS**

Tabela 1. Proporções das misturas das argamassas.....	30
Tabela 2. Trabalhabilidade de argamassas sem adição de superplastificante. ....	30
Tabela 3. Proporções das misturas das pastas. ....	31
Tabela 4. Dados químicos do cimento e cinzas SF e CM (por fluorescência de raio X)...	34
Tabela 5. Valores de resistências médias de compressão (MPa) e seus desvios padrão.... .....	38
Tabela 6. Valores de resistências médias de tração à flexão (MPa) e seus desvios padrão. .....	40
Tabela 7. Valores de massa específica real, absorção e índice de vazios.....	42
Tabela 8. Teor percentual de produtos de hidratação das pastas aos 28 dias.....	44
Tabela 9. Teor percentual de produtos de hidratação das pastas aos 90 dias.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I – ARTIGO I: INFLUÊNCIA DE CINZAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NÃO TRATADAS EM ARGAMASSAS E PASTAS

Figura 1. Curvas TG, DSC e DTG das a) e b) CBCA-CM, c) e d) CBCA-SF. ....	33
Figura 2. Padrões de DRX das cinzas de bagaço: a) CBCA-CM e b) CBCA-SF. ....	36
Figura 3. Imagens MEV com aumentos de 500, 800, 1000 e 2000 vezes a 10µm, em a) e a') CP V ARI, b) e b') CBCA-CM, c) e c') CBCA-SF. As marcações enumeradas: 1- Sílica amorfa fundida esférica; 2 – Sílica cristalina por combustão incompleta; 3 – Sílica irregular e porosa. ....	37
Figura 4. Efeito das CBCA's na trabalhabilidade das argamassas controle a) com substituição de cinzas CM e b) com substituição de cinzas SF. ....	38
Figura 5. Resultados de resistência à compressão das argamassas aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias. ....	39
Figura. 6. Resultados de resistência à tração na flexão. ....	40
Figura 7. Resultados de absorção e índice de vazios. ....	41
Figura 8. Curvas TG/DTG das pastas aos 28 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF. ....	45
Figura 9. Curvas TG/DTG das pastas aos 90 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF. ....	47
Figura 10. DRX das pastas aos 28 e 90 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF. ....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/ Sigla	Significado (Unidade de Medida)
PIB	Produto interno bruto
CBCA	Cinza de bagaço de cana-de-açúcar
ASTM	Sociedade americana de testes e materiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ANOVA	Análise de variância
TG	Termogravimetria
DTG	Derivada termogravimétrica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
LOI	Perda de massa por ignição
<LQ	Abaixo do limite quantificável
C <sub>2</sub> S	Silicato bicálcico / belita
C <sub>3</sub> S	Silicato Tricálcico / alita
C <sub>3</sub> A	Aluminato Tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferro-aluminato Tetracálcico
CaO	Óxido de cálcio
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício / Sílica
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio / Alumina
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro

---

MgO	Óxido de Magnésio / Periclase
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio
SO <sub>3</sub>	Trióxido de Enxofre
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio / Portlandita
CH	Hidróxido de Cálcio / Portlandita
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
C-A-S-H	Silicoaluminato de Cálcio Hidratado
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
TiO <sub>2</sub>	Óxido de Titânio
MnO	Óxido de Manganês
M <sub>s</sub>	Massa Saturada (g)
M <sub>d</sub>	Massa Seca (g)
M <sub>i</sub>	Massa Submersa
e	Índice de vazios
a/c	Proporção água/cimento
d	Distância Interplanar (Å)
n	Número Inteiro
λ	Comprimento de Onda (Å)
θ	Ângulo de Difração de Bragg (°)
D <sub>f</sub>	Degrees of Freedom
SQ	Sum of Squares
MS	Mean Square
%	Porcentagem
ml	Mililitro

---

---

mg	Miligramma
g	Gramma
kg	Quilogramma
$\mu\text{m}$	Micrômetro
mm	Milímetros
$\text{cm}^3$	Centímetros Cúbicos
$\text{m}^2$	Metros Quadrados
$\text{m}^3$	Metros Cúbicos
ton	Toneladas
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$^{\circ}$	Graus
MPa	Megapascal
kV	Kilovolt
s	Segundos
min	Minuto
Å	Angstrom
Rpm	Rotações por minuto

---

## RESUMO

FERREIRA, WALKÍRIA PEDERIVA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, março de 2023. **Cimento ecológico: substituição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar derivado da indústria sucroalcooleira.** Orientador: Dr. Bacus de Oliveira Nahime. Coorientador: Dr. Idalci Cruvinel dos Reis.

Com o crescimento acelerado e a elevada demanda por mais e mais matérias-primas, a indústria da construção civil tem contribuído para a carência de alguns recursos naturais, por esse motivo, este estudo busca fazer uso de resíduos da agroindústria como material cimentício suplementar. No presente trabalho, buscou-se estudar o comportamento de matrizes cimentícias com substituição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) para a produção de um cimento mais sustentável e ecológico. As cinzas a serem utilizadas são um subproduto de caldeiras de indústrias sucroalcooleiras das cidades de Quirinópolis (SF) e Santa Helena (CM), ambas no estado de Goiás. Secas a 105°C por 24h, para a retirada de umidade, peneiradas na peneira 150µm e por fim, armazenadas em embalagens plásticas para uso posterior. Neste estudo, adotou-se um programa experimental, no qual foram produzidas pastas e argamassas com 0% (controle), 25%, 30% e 35% de substituição, em massa de cimento por CBCA. As cinzas foram caracterizadas por análise de fluorescência de raios X (FRX), termogravimétrica (TG/DTG), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS). A composição química das CBCA's identificou a quantidade de óxidos de sílica, alumínio e ferro dentro do recomendado por norma para pozolana de classe C, no entanto, também foi identificada alta perda de massa por ignição (LOI). Identificou-se, também halo amorfo na cinza da cidade de Santa Helena (CBCA-CM) que não está presente na cinza de Quirinópolis (CBCA-SF), portanto, a primeira cinza apresenta melhores características como material pozolânico. As amostras de pastas foram utilizadas para análises TG/DTG e DRX para identificação dos hidratos formados aos 28 e 90 dias de cura. Os resultados TG/DTG mostraram que aos 28 dias as pastas com substituição tiveram o hidróxido de cálcio (portlandita) todo consumido e aos 90 dias os picos de portlandita voltaram a aparecer na amostra com 25% de CBCA-CM, 25% e 30% de CBCA-SF, resultados corroborados pela análise DRX. As misturas de argamassas foram caracterizadas em estado fresco e endurecido, através de ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, índice de vazios e absorção por imersão. Os melhores resultados mecânicos foram observados nas amostras com 25% de CBCA-CM ao 90 e 180 dias, ficando acima dos resultados da argamassa controle. Sendo assim, o comportamento pozolânico das amostras com cinzas alcançaram melhores resultados em cura longa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cimento sustentável; Matriz cimentícia; Cinzas de agroindústria; Resíduo de indústria sucroalcooleira; Reatividade pozolânica.

## ABSTRACT

FERREIRA, WALKÍRIA PEDERIVA. Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde – GO, março de 2023. **Cimento ecológico: substituição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar derivado da indústria sucroalcooleira.** Orientador: Dr. Bacus de Oliveira Nahime. Coorientador: Dr. Idalci Cruvinel dos Reis.

With the accelerated growth and the high demand for more raw materials, the civil construction industry has contributed to the lack of some natural resources. In the present work, we sought to study the behavior of cementitious matrices with sugarcane bagasse ash (SCBA) replacement to produce a more sustainable and ecological cement. The ashes to be used are a by-product of boilers in the sugar and alcohol industries in the cities of Quirinópolis (SF) and Santa Helena (CM), both in the state of Goiás, dried at 105°C for 24 hours to remove moisture, sifted through a 150µm sieve and stored in plastic packaging for later use. In this study, an experimental program was adopted, in which pastes and mortars were produced with 0% (control), 25%, 30% and 35% replacement, of cement by CBCA. The ashes were characterized by X-ray fluorescence analysis (FRX), thermogravimetric analysis (TG/DTG), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The CBCA chemical composition identified the amount of silica, aluminum and iron oxides within the standard recommended for class C pozzolana, however, a high loss of mass on ignition (LOI) was also identified. An amorphous halo was also identified in the ash from the city of Santa Helena (CBCA-CM), which is not present in the ash from Quirinópolis (CBCA-SF), therefore, the first ash has better characteristics as a pozzolanic material. Paste samples were used for TG/DTG and DRX analysis to identify the hydrates formed at 28 and 90 days of curing. The TG/DTG results showed that at 28 days the pastes with replacement had all the calcium hydroxide (portlandite) consumed and at 90 days the portlandite peaks reappeared in the sample with 25% of CBCA-CM, 25% and 30% of CBCA-SF, results corroborated by the XRD analysis. The mortar mixtures were characterized in fresh and hardened states, through workability, compressive strength, flexural tensile strength, void ratio and immersion absorption tests. The best mechanical results were observed in the samples with 25% of CBCA-CM at 90 and 180 days, being above the results of the control mortar. Thus, the pozzolanic behavior of samples with ash achieved better results in long curing.

**KEYWORDS:** Sustainable cement; Cement matrix; Ashes from agroindustry; Waste from the sugar and alcohol industry; Pozzolanic reactivity.

# 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um dos que mais se expande no Brasil, protagonizando papel fundamental no desenvolvimento econômico por estar relacionado diretamente a outros setores, a atividade exerce também considerável relevância para o Produto Interno Bruto (PIB) por gerar milhares de ofertas de empregos diretos e indiretos [1]. Com crescimento tão significativo, como consequência, o setor é um dos que mais utiliza água e explora recursos naturais (renováveis e não renováveis) para a produção de insumos, além de apresentar alta capacidade de poluição (emissão de gases e particulados poluentes) e geração de resíduos, causando impactos tanto no meio natural como no meio urbano [2].

Dentre os materiais de construção mais consumidos, encontra-se o cimento e sua fabricação visa nutrir a produção global de cerca de 5,3 bilhões de m<sup>3</sup> de concreto por ano para ser utilizado desde serviços de infraestrutura a obras e edificações [3]. De acordo com o Sindicato Nacional de Cimento (SNIC, 2022) [4], o Brasil teve o consumo de 64.524,136 toneladas em 2021, e aproximadamente 50% desse total já consumido no primeiro semestre de 2022. O cenário previsto é que até 2050 a produção global de cimento atinja entre 3,7 e 4,4 bilhões de toneladas [5].

A fabricação do compósito cimentício requer uso bastante expressivo de energia e é responsável pela emissão de 7% de todo o dióxido de carbono dispensado na atmosfera do planeta [[6], [7]]. O cimento é resultado da calcinação do calcário com argila a 1500°C em fornos industriais, produzindo o cimento primário, denominado clínquer [5]. Para produzir uma tonelada de clínquer é gerado aproximadamente 866 kg de CO<sub>2</sub> e para cada tonelada de cimento pronto, cerca de 564 kg de CO<sub>2</sub>, a taxa é menor por causa do uso de resíduos como aditivos e substitutos nas matrizes cimentícias [8].

Devido ao alto consumo e capacidade de impactar o meio ambiente durante o processo de produção do cimento, a indústria cimentícia têm buscado alternativas para inserir os mais variados tipos de resíduos (subprodutos industriais e agrícolas) em sua cadeia produtiva na intenção de mitigar os impactos inerentes da fabricação de cimento. Dentre alguns dos resíduos substitutos de matérias-primas na matriz cimentícia estão: resíduos da combustão de carvão [9], lama de reservatórios [10], areia de fundição [11], pó de resíduo cerâmico [12], resíduos de fabricação de vidro [3], escórias [[14], [15]] e cinzas de biomassa [[16], [17], [18], [19], [20]]. Dentre as cinzas de biomassa mais promissoras está a do bagaço de cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é matéria-prima para a produção de açúcar e etanol e o Brasil é o maior produtor do insumo do mundo, possuindo mais de 8 milhões de hectares de área plantada em 2022, representando a maior fonte de bioenergia do país, desses, 957 mil hectares concentram-se no estado de Goiás, representando 11,5% da produção nacional [21].

O bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é obtido após a extração do sumo utilizado para a produção de açúcar e etanol, em seguida, é utilizado como combustível para as caldeiras das usinas, gerando cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas volantes [22]. O descarte incorreto de CBCA's pode originar uma série de prejuízos humanos e ambientais, dentre estes, destacam-se: poluição do ar, problemas respiratórios causados pelas partículas minúsculas e leves que são muito facilmente transportadas pelos ventos; depositar as CBCA's em aterros exige grandes áreas; polui desde a superfície do solo até às águas subterrâneas, possuem vestígios de metais pesados em sua composição química; quando usados como fertilizantes, as CBCA'S endurecem o solo além de terem baixo valor nutricional. [[22], [23], [24], [25]]

## **1.1 Justificativa**

As cinzas de bagaço têm sido amplamente estudadas nos últimos anos como material cimentício suplementar (MCS) de alto nível, ajudando a resolver problemas ambientais ocasionados tanto pela produção do cimento Portland como pelo descarte inadequado do resíduo. Para cada tonelada de bagaço que é queimado nas caldeiras, cerca de 25 kg de cinzas são geradas, compostas de materiais orgânicos e inorgânicos residuais [26]. As cinzas para esse estudo foram coletadas de montes de descarte no entorno das usinas, em extensas áreas na zona rural das cidades mencionadas anteriormente, com a secagem e peneiramento para a retirada de partículas maiores que  $150\mu\text{m}$  a massa reduziu em cerca de 30% a 40%, sobrando, portanto, considerável quantidade de resíduo a ser reaproveitado como MCS.

Para que um resíduo seja considerado como MCS deve apresentar reatividade pozolânica com a combinação de óxidos silicosos, aluminosos e ferrosos acima de 50%, resultados encontrados em ambas as cinzas utilizadas neste trabalho. As taxas de substituição de cinzas em argamassas, encontradas em literatura, variam entre 5% e 25% e este estudo foi direcionado em utilizar quantidades maiores que as indicadas em caráter experimental. Por conseguinte, a pesquisa busca dar destino mais sustentável ao resíduo e conseqüentemente, evitar o descarte no meio ambiente. Com a substituição de cinzas na matriz cimentícia pretende-se diminuir a energia consumida para a produção do cimento, diminuir a quantidade de matéria-

prima natural que é retirada para a fabricação e a diminuição de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que é emitido durante a fabricação do cimento.

## 1.2 Cimento Portland (CP)

Os primeiros materiais pozolânicos foram utilizados durante o Império Romano quando pozolanas naturais (resíduos de atividades vulcânicas ou depósitos de terra diatomácea) que misturadas à cal proporcionava um material de construção forte e durável. Os romanos também utilizavam pozolanas artificiais como tijolos triturados ou pó de tijolos para a melhoria hidráulica de argamassas de cal. Durante a Idade Média fazia-se o uso de cales obtidas da calcinação de seixos de rios e de calcários escuros em substituição à pozolana. Somente no século XIX, com o surgimento do cimento Portland é que esses materiais hidráulicos foram sendo substituídos gradualmente. Atualmente, as pozolanas são utilizadas por questões tecnológicas, por proporcionarem maior resistência mecânica e durabilidade aos cimentos misturados [[27], [28]].

O cimento Portland (CP) é um aglomerante hidráulico fabricado a partir da calcinação da mistura de material calcário e argila formando o clínquer Portland que em seguida é moído até alcançar a finura que proporcione melhoras de resistência e qualidades do produto. Os elementos que constituem o CP são basicamente a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o trióxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Alguma quantidade de óxido de magnésia ( $\text{MgO}$ ) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto também pode ser encontrado [2]. Estes compostos químicos entram em reação quando é adicionada água ao CP, a isso denomina-se hidratação do cimento que resulta em produtos que possuem características de pega e endurecimento [29].

## 1.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

A cana-de-açúcar é uma espécie de cultura tropical e subtropical e refere-se a gramíneas perenes altas das espécies *Saccharum officinarum* e híbridos, cultivada tanto para a produção alimentícia (açúcar, açúcar mascavo, melaços etc.) como para bioprodutos, bioenergia (calor, eletricidade e etanol) e subprodutos (lama de prensagem ou torta e cinzas de bagaço). As cinzas provenientes do bagaço da cana-de-açúcar originam-se da queima do bagaço que é utilizada como biomassa na produção de energia de usinas de açúcar e álcool. Ao fim do processo de queima de uma tonelada de bagaço de cana queimado são gerados de 25 a 40 kg de cinzas e com a demanda crescente por produtos originários da cana a produção de CBCA aumenta

consideravelmente. Com esse aumento expressivo estudos são feitos com o propósito de encontrar soluções para o descarte da CBCA produzida [[24], [30], [31], [32]].

O descarte da CBCA é um sério problema ambiental, tendo seu destino em aterros sanitários poluindo o meio ambiente. Estudos apontam que a CBCA não apresenta nutrientes minerais adequados para ser utilizada como fertilizante de solos e pode ter efeitos negativos para a fauna e flora locais, e para o próprio homem [24]. Testes de solubilização em CBCA's indicaram valores de alumínio e cromo além dos níveis mínimos permitidos pela ABNT NBR 10004: 2004 [33].

### 1.3.1 Atividade pozolânica

No empenho de encontrar soluções para estes e outros problemas do descarte do resíduo, pesquisadores têm concentrado seu reuso como mistura pozolânica para matrizes cimentícias. A queima do bagaço da cana-de-açúcar ativa sua atividade pozolânica, mas a reatividade é inerente ao processo de queima e moagem, portanto, a CBCA exibe sua pozolanicidade somente após o tratamento<sup>1</sup>, apresentando-se como um material rico em sílica amorfa (se queimado a 500-800°C), essa temperatura evita a conversão de sílica em cristobalita (sílica cristalina) [[30], [34]]. Quando as CBCA's geradas pelas usinas, apresentam coloração preta escura indica que a amostra apresenta maior conteúdo de carbono pela combustão incompleta; se queimados acima da temperatura de recalcinação a 800°C sua aparência será de cor cinza até branco (900°C) e, isso se deve à cristalização e decomposição que ocorre com as altas temperaturas [[24], [30], [31], [35], [36]].

Segundo Cordeiro e Kurtis (2017), a maior parte de CBCA de fornos industriais tem contaminação de quartzo proveniente do solo agregado ao bagaço e a base dessa CBCA é sílica parcialmente cristalina, para remediar esse problema alguns pesquisadores fazem moagem ultrafina para aumentar a homogeneidade e reduzir o teor de quartzo. No entanto, os autores afirmam que não existem estudos que mostrem qual o efeito de diferentes tamanhos de partículas sobre a cinética e o mecanismo de hidratação de pastas.

Dentre os usos da CBCA como material pozolânico estão: a incorporação ao concreto convencional, concreto de alto desempenho, concreto autoadensável e concreto de agregado reciclado; estabilização de solos no teor ideal de mistura cimento CBCA de 9%; blocos de

---

<sup>1</sup> Se o bagaço for queimado por tempo insuficiente para eliminar toda o material orgânico presente, o resultado será uma cinza com alto teor de carbono que diminuirá o teor de outros compostos com potencial pozolânico [31].

pavimentação de concreto pré-moldados com 10% e 20% de substituição de CBCA; como substituição em matrizes cimentícias a 5%, 10%, 15%, 20% e 25% [[24], [36]].

Para avaliar o desempenho da CBCA em matrizes cimentícias é necessário examinar em termos de refinamento de microestrutura, propriedades reológicas e frescas, propriedades mecânicas e durabilidade [[30], [35]]. A reatividade da CBCA é avaliada pela presença de sílica na faixa de 55,05-78,34%, se a soma de sílica, alumina e óxido de ferro ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) for acima de 50% da massa total pode ser classificada como classe C de pozolana e quando superior a 70% classifica-se como F, de acordo com a ASTM C618 [38].

A ABNT NBR 12653: 2014 [39] que trata sobre os requisitos para materiais pozolânicos define que a atividade pozolânica é a “capacidade de um determinado material de reagir com o hidróxido de cálcio em presença de água e formar compostos com propriedade cimentícias”. A norma classifica as pozolanas em:

- Classe N: pozolanas naturais e artificiais como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- Classe C: cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas são resíduos pulverizados ou granulados;
- Classe E: quaisquer pozolanas que não estejam contempladas nas classes N e C, como materiais provenientes de tratamento térmico, argilas calcinadas e subprodutos industriais.

As CBCA's como material pozolânico em substituição ao CP classifica-se como E, de acordo com a norma os requisitos químicos exigidos para o material são:

Requisitos químicos:

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$  (ABNT NBR NM 22);
- $\text{SO}_3 \leq 5\%$  (ABNT NBR NM 16);
- Teor de umidade  $\leq 3\%$  (ABNT NBR NM 24);
- Perda ao fogo  $\leq 6\%$  (ABNT NBR NM 18);
- Álcalis disponíveis em  $\text{Na}_2\text{O} \leq 1,5\%$  (ABNT NBR NM 25);

## 1.4 Referências

- [1] THIVES, L. P.; GHISI E.; THIVES JÚNIOR, J. J. **An outlook on the management of construction and demolition waste in Brazil**, Cleaner Materials, Volume 6, 2022, 100153, ISSN 2772-3976. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100153>.
- [2] BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6. Ed. -Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [3] PEREZ, O. F. A.; FLOREZ, D. R.; VERGARA, L. M. Z.; BENAVIDES, K. V. H. **Innovative use of agro-waste cane bagasse ash and waste glass as cement replacement for green concrete. Cost analysis and carbon dioxide emissions**, Journal of Cleaner Production, Volume 379, Part 2, 2022, 134822, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134822>.
- [4] SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2022. **Números da Indústria**. São Paulo, SP. <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1675257818.pdf>
- [5] MADDALENA, R.; ROBERTS, J. J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, Journal of Cleaner Production, Volume 186, 2018, Pages 933-942, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>.
- [6] MING, X.; CAO, M.; YIN, H. Microstructural and mechanical evolutions of sustainable cement blends containing fly ash and calcium carbonate whiskers induced by high temperature, Construction and Building Materials, Volume 263, 2020, 120615, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120615>.
- [7] TURKOGLU, M; BAYRAKTAR, O. Y.; BENLI, A.; KAPLAN, G. Effect of cement clinker type, curing regime and activator dosage on the performance of one-part alkali-activated hybrid slag/clinker composites, Journal of Building Engineering, Volume 68, 2023, 106164, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106164>.
- [8] COSTA, F. N.; RIBEIRO, D. V. Reduction in CO<sub>2</sub> emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). Journal of Cleaner Production, Volume 276, 2020, 123302, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>.
- [9] ZHU, H.; QIAO, P.; ZHANG, Y.; CHEN, J.; LI, H. **Efflorescence of microwave-heated alkali-activated cement synthesized with ultrafine coal combustion ashes**, Fuel, Volume 303, 2021, 121225, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121225>.
- [10] ZHANG, J.; NIU, W.; YANG, Y.; HOU, D.; DONG, B. **Machine learning prediction models for compressive strength of calcined sludge-cement composites**, Construction and Building Materials, Volume 346, 2022, 128442, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128442>.
- [11] PAIVA, F. F. G.; SANTOS, L. F. S.; TAMASHIRO, J. R.; SILVA, L. H. P.; TEIXEIRA, S. R.; GALVÍN, A. P.; LÓPEZ-UCEDA, A.; KINOSHITA, A. **Effect of phenolic resin content in waste foundry sand on mechanical properties of cement mortars and leaching of phenols behaviour**, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Volume 31, 2023, 100955, ISSN 2352-5541, <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100955>.

- [12] MOHIT, M.; HAFTBARADARAN, H.; RIAHI, H. T.; **Investigating the ternary cement containing Portland cement, ceramic waste powder, and limestone**, *Construction and Building Materials*, Volume 369, 2023, 130596, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130596>.
- [13] PEREZ, O. F. A.; FLOREZ, D. R.; VERGARA, L. M. Z.; BENAVIDES, K. V. H. Innovative use of agro-waste cane bagasse ash and waste glass as cement replacement for green concrete. Cost analysis and carbon dioxide emissions, *Journal of Cleaner Production*, Volume 379, Part 2, 2022, 134822, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134822>.
- [14] XU, Z.; GUO, Z.; ZHAO, Y.; LI, S.; LUO, X.; CHEN, G.; LIU, C.; GAO, J. **Hydration of blended cement with high-volume slag and nano-silica**, *Journal of Building Engineering*, Volume 64, 2023, 105657, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105657>.
- [15] ZHANG, S.; NIU, D. **Hydration and mechanical properties of cement-steel slag system incorporating different activators**, *Construction and Building Materials*, Volume 363, 2023, 129981, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129981>.
- [16] KIM, K. W.; PARK, K. T.; ATES, F.; KIM, H. G.; WOO, B. **Effect of pretreated biomass fly ash on the mechanical properties and durability of cement mortar**, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, 2023, e01754, ISSN 2214-5095, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01754>.
- [17] ROSALES, J.; CABRERA, M.; BELTRÁN, M. G.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F. **Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 154, 2017, Pages 424-435, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.024>.
- [18] BONFIM, W. B.; PAULA, H. M. **Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 291, 2021, 125869, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125869>.
- [19] QUDOOS, A.; KIM, H. G.; UR-REHMAN, A.; RYOU, J. Effect of mechanical processing on the pozzolanic efficiency and the microstructure development of wheat straw ash blended cement composites, *Construction and Building Materials*, Volume 193, 2018, Pages 481-490, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.229>.
- [20] SIGVARDSEN, N. M.; GEIKER, M.R.; OTTOSEN, L. M. **Reaction mechanisms of wood ash for use as a partial cement replacement**, *Construction and Building Materials*, Volume 286, 2021, 122889, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122889>.
- [21] COSTA, G. G.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; MACHADO, G. O.; BARBEDO, M. D. G. **Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts**, *Journal of Cleaner Production*, Volume 349, 2022, 131466, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131466>.
- [22] PATEL, H. **Environmental valorisation of bagasse fly ash: a review**. *RSC Advances*. Edição 52, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0RA06422J>.

- [23] KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. **Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review**. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>.
- [24] XU, Q.; JI, T.; GAO, S.J.; YANG, Z.; WU, N. **Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials**. *Materials*, v. 12, ed. 1, p. 39, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma12010039>.
- [25] KUMARA, G.D.; SIVAPULLAIAH, P.V. ; MURTHY, A. S. **Performance evaluation of sugar cane bagasse ash on the strength of concrete: A sustainable approach**, *Materials Today: Proceedings*, Volume 75, Supplement, 2023, Pages 106-111, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.335>.
- [26] LYRA, G. P.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; ROSSIGNOLO, J.A. **Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials**, *Construction and Building Materials*, Volume 272, 2021, 122001, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122001>.
- [27] MORAES, J. C. B.; AKASAKI, J. L.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. **Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars**. *Construction and Building Materials*, Volume 94, 2015, Pages 670-677, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>.
- [28] VEJMEJKOVÁ, E.; KEPPERT, M.; ROVNANÍKOVÁ, P.; KERSNER, Z.; CERNÝ, R. **Application of burnt clay shale as pozzolan addition to lime mortar**. *Cement and Concrete Composites*. Volume 34, Issue 4, 2012, Pages 486-492, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.001>.
- [29] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª Ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.
- [30] KOLAWOLE, J. T.; BABAFEMI, A. J.; FANIJO, E.; PAUL, S. C.; COMBRINCK, R. **State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials**. *Cement and Concrete Composites*. Volume 118, 2021, 103975, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>.
- [31] TORRES, S. M.; LIMA, V. E.; BASTO, P. A.; ARAÚJO JÚNIOR, N. T.; MELO NETO, A. A.; **Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction**. *Construction and Building Materials*. Volume 264, 2020, 120684, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120684>.
- [32] HILOIDHARI, M.; HARAN, S.; BANERJEE, R.; RAO, A. B. **Life cycle energy–carbono water footprints of sugar, ethanol and electricity from sugarcane**. *Bioresource Technology*. Volume 330, 2021, 125012, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125012>.
- [33] SALES, A.; LIMA, S. A. **Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement**. *Waste Management*. Volume 30, Issue 6, 2010, Pages 1114-1122, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.026>.

- [34] CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**. Cement and Concrete Composites. Volume 30, Issue 5, 2008, Pages 410-418, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>.
- [35] KHALIL, M. J.; ASLAM, M.; AHMAD, S. **Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review**. Construction and Building Materials. Volume 270, 2021, 121371, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121371>.
- [36] BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; GOKUL DEV, V.; SANTHANAM, M. **Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete**. Cement and Concrete Composites. Volume 59, 2015, Pages 77-88, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>.
- [37] CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. *Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity*. **Cement and Concrete Research**. Volume 97, 2017, Pages 41-49, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.
- [38] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM C618: Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. USA. 2022.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Analisar o comportamento de matrizes cimentícias com substituição parcial de cinzas de indústria sucroalcooleira em estado fresco e endurecido.

### 2.2 Específicos

- Investigar a influência da CBCA com o CP nas propriedades físicas e mecânicas de matrizes cimentícias;
- Identificar as perdas de massa e fases de hidratação formadas nas microestruturas das pastas;
- Avaliar a reatividade pozolânica das cinzas nas amostras com substituição.

### 3 CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

Construction and Building Materials, Qualis A1, ISSN 0950-0618, Engenharias

#### Influência de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar não tratadas em argamassas e pastas

##### RESUMO

Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) não tratadas de duas usinas foram investigadas como substituto parcial de cimento Portland (CP) com o intuito de reduzir problemas ambientais decorrentes da produção de clínquer ao avaliar a viabilidade de uso como material cimentício suplementar com reatividade pozolânica. Argamassas e pastas foram produzidas com taxas de substituição de 25%, 30% e 35% de CBCA, com curas de 7, 14, 28, 90 e 180 dias. As argamassas foram caracterizadas em estado fresco por teste de trabalhabilidade e em estado endurecido através do desempenho mecânico por ensaios de compressão e de tração na flexão, absorção de água e índice de vazios. A composição química, composição mineralógica, análise térmica e formação de fases de hidratos foram feitas nas pastas e em ambas as cinzas. Os ensaios nas cinzas mostraram que a CBCA-CM apresentou um halo amorfo e que consumiu portlandita no processo de formação dos hidratos das pastas aos 28 e 90 dias. Os ensaios de desempenho mecânico mostraram que as cinzas têm menor resistência em idades curtas e ultrapassaram a amostra controle com idades longas.

Palavras-chave: Cinzas de biomassa; Reação pozolânica; Material cimentício suplementar; Substituição mineral; Material sustentável; Cimento ecológico.

#### 3.1 Introdução

O acelerado desenvolvimento de infraestruturas necessárias ao crescimento econômico mundial tem exigido cada vez mais o uso de recursos naturais limitados e, conseqüentemente, gerado quantidades consideráveis de resíduos e de gases de efeito estufa que são expelidos diariamente para a atmosfera. A indústria cimenteira sozinha corresponde a até 8% das emissões globais de CO<sub>2</sub> e esse percentual pode crescer a cerca de 20% até o ano de 2050, cada tonelada de produto final corresponde a uma tonelada de CO<sub>2</sub> [[1],[2], [3]].

O cimento Portland (CP) é um dos insumos mais utilizados no planeta, sendo o consumo mundial de cimento em aproximadamente 2,21 e 2,77 milhões de toneladas em 2018 e 2019

respectivamente, nesse primeiro ano, as emissões específicas brutas de CO<sub>2</sub> ficaram em 637 kg/tonelada de produto cimentante, segundo dados da Federação Interamericana de Cimento – FICEM [4]. As emissões de poluentes da produção de CP se devem pelo uso de combustíveis fósseis para sua queima e a descarbonatação do calcário. Para a produção de 1 tonelada de CP comum é consumido mais de 1,5 tonelada de matéria-prima (calcário, argila e areia) e consome-se entre 2,93 e 6,28 GJ de energia térmica, além de 65 a 141 kWh de energia elétrica. As indústrias cimenteiras têm usado resíduos selecionados como adições ou substitutos parciais de matéria-prima, esses são moídos e misturados antes da queima a 1450°C. [[5], [6]].

As soluções sustentáveis mais amplamente em estudo são a substituição de agregados não renováveis por materiais reciclados; e o uso de cinzas volantes substituindo parcial ou completamente o CP [7], [8]. Além destes materiais, utiliza-se também resíduos da agroindústria, provenientes de subprodutos de safras, convertidos em cinzas para a produção de pozolanas, como casca de arroz, resíduos de óleo de palma, palha de trigo, resíduos de eucalipto, folhas de bambu, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. Com o controle de qualidade adequado, grande gama de subprodutos originários de processos industriais pode ser utilizada na composição, como materiais cimentícios complementares, resultando em uso reduzido de clínquer e conseqüentemente na redução de emissão CO<sub>2</sub> e metano na atmosfera geradas pelo descarte. [[5], [9], [10]]

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) incorporadas em matrizes cimentícias reduzem o consumo de clínquer e podem manter ou mesmo melhorar o desempenho mecânico de cimentos e ainda ajudar a reduzir os gases de efeito estufa gerados durante a produção, diminuir o custo de aquisição, aliviar a pressão de disposição de resíduos e prevenir a poluição do ar (produz 74% menos que a produção do CP), do solo e de corpos d'água. A CBCA bruta é composta principalmente de sílica altamente reativa (60-75%), óxido de potássio, óxido de cálcio e outros óxidos menores como óxido de ferro e de alumínio. Pelo alto teor de sílica ativa (SiO<sub>2</sub>) a CBCA possui, em partes, uma estrutura cristalina e outra parte amorfa e acredita-se que a fração de cada constituinte varia de acordo com a origem, condições de queima do bagaço e época de colheita da cana. [[11], [12], [13], [14]].

Quanto à quantidade de CBCA a ser substituída na matriz cimentícia, Anjos *et al* [5] fizeram substituição de 15, 20, 25, e 30% de cinzas moídas e peneiradas, com melhorias nos comportamentos reológico, físico e mecânico para os teores de até 25%. Berenguer *et al* [11], utilizaram em seu estudo a quantidade de 15% de substituição de CBCA's não processadas com resultados de resistência mecânica equivalente à série de referência. Rajasekar *et al.* [15]

substituíram com a variação de 5%, 10%, 15% e 20% de CBCA's tratadas, incineradas sob condições controladas e moídas em seguida, os resultados de 15% mostraram melhor desempenhos em todos os ensaios realizados. Sande *et al.* [16] utilizaram as taxas de 10, 20 e 30% de cinzas não tratadas e a mesma taxa de cinzas moídas, com aumento na demanda de água nas amostras com cinzas não tratadas em 68% a cada m<sup>3</sup> de argamassa além do aumento da porosidade, enquanto para as cinzas moídas, houve redução de até 40% da demanda de água, aumento da resistência à compressão em até 62% aos 28 dias. Arenas-Piedrahita *et al.* [17] utilizaram 10 e 20% de CBCA não tratada (peneiradas na peneira 75 µm) com resultados de diminuição da resistência à compressão nas primeiras idades para 10% e aumento posterior, não percebido na taxa de 20%. Maldonado-García *et al.* [18] utilizaram cinzas não tratadas nas porcentagens de 10 e 20% com resultados de diminuição na trabalhabilidade, mas aumento na resistência à compressão a longo prazo (90 e 600 dias). Calligaris *et al.* [19], fizeram a substituição em 20% de CBCA's tratadas com a queima do bagaço feita de forma homogênea e controlada em laboratório e em seguida moídas para alcançar menor finura, os estudos apresentaram comportamento mecânico similar ao controle. Observa-se vários estudos que relatam o uso de CBCA's em substituição de 20% como quantidade ótima quando se utiliza cinzas tratadas e até 15% máximo quando não tratadas.

Devido à crescente demanda mundial no uso do cimento, cresce também a necessidade das indústrias cimenteiras em reduzir seus resíduos e emissões de carbono e a preocupação com o uso indiscriminado de recursos naturais, essa pesquisa tem o intuito de investigar os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por CBCA's não tratadas (apenas peneiradas) para reduzir o consumo de clínquer na matriz cimentícia, pois, o tratamento das cinzas demanda gasto energético com o processo de requeima e moagem e adicionaria poluentes na atmosfera. São analisadas taxas acima do recomendado pela literatura, 25%, 30% e 35% para maior aproveitamento de substituição para avaliar se nessas condições, as cinzas em estudo apresentam bom desempenho mecânico e composição química adequada como material cimentício suplementar pozolânico aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias de cura úmida. Investiga-se ainda, em estado fresco, a trabalhabilidade sem acréscimo de superplastificantes e, em estado endurecido, a absorção de água nas amostras.

## 3.2 Materiais e métodos

### 3.2.1 Materiais

#### 3.2.1.1 Areia e cimento

Para a produção corpos de prova de argamassa utilizou-se areia de quartzo padronizada (NBR 7214: 2015) [20] fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), homogeneizada em quatro frações de proporções iguais de 468 g, sendo a granulometria grossa entre 2,4 e 1,2 mm, média grossa entre 1,2 e 0,6 mm, média fina de 0,6 e 0,3 mm e fina, de 0,3 e 0,15 mm. O aglomerante utilizado para a produção de pastas e argamassas foi o cimento Portland (CP) de alta resistência inicial resistente a sulfatos CPV-ARI (RS) conforme a NBR 16697: 2018 (tipo III – ASTM C150/ C150M) [21] de superfície específica (método Blaine) de 5452,34 cm<sup>2</sup>/g (NBR 16372: 2015) [22], índice de finura (peneira 75 µm) de 4,56% (NBR 11579: 2012) [23] e massa específica de 3,10 g/cm<sup>3</sup> (método Le Chatelier) (NBR16605: 2017) [24]. Os dados químicos encontram-se na Tabela 4.

#### 3.2.1.2 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)

As CBCA's utilizadas, foram coletadas em duas usinas, a primeira na cidade de Santa Helena e a segunda na cidade de Quirinópolis, ambas no estado de Goiás. As cinzas foram o descarte resultante da combustão do bagaço para a geração de energia nas indústrias de origem queimadas a 480°C na usina de Quirinópolis (doravante denominada CBCA-SF) e a 900°C na usina de Santa Helena (CBCA-CM). O método de processamento foi simplificado para que seu uso tivesse o mínimo de etapas possível para diminuir o gasto energético, as cinzas foram secas em estufa a 105°C por 24 horas para a retirada da umidade e em seguida, peneiradas na malha 150 µm, porquanto, partículas maiores que 150 µm não podem ser consideradas como materiais pozolânicos [25]. A superfície específica (método Blaine) (NBR 16372: 2015) [22], o índice de finura (peneira 75 µm) (NBR 11579: 2012) [23] e massa específica (método Le Chatelier) (NBR16605: 2017) [24] das CBCA-CM foram respectivamente 3992,62 cm<sup>2</sup>/g, 12,6% e 2,06 g/cm<sup>3</sup>; das CBCA-SF foram, em ordem, 2881,05 cm<sup>2</sup>/g, 21,14% e 2,04 g/cm<sup>3</sup>. As composições químicas das CBCA's foram fornecidas na Tabela 4.

## 3.3 Métodos

Para a determinação da quantidade de CBCA's a ser utilizadas foram analisados os resultados apresentados por Anjos *et al.* [5], Berenguer *et al.* [11], Rajasekar *et al.* [15], Sande *et al.* [16], Arenas-Piedrahita *et al.* [17], Maldonado-García [18] e Calligaris *et al.* [19]. Os

autores sustentam que para uso em argamassas e concretos a quantidade ótima de CBCA's em matrizes cimentícias seja, quando tratadas (incineração em temperaturas controladas e moagem), de até 20%. Para cinzas não tratadas, apenas peneiradas, a quantidade ótima fica em no máximo 10%. Para investigar os efeitos de quantidades de cinzas em substituição acima do recomendado, como caráter experimental, utilizou-se 0% (controle), 25%, 30% e 35% para ensaios de trabalhabilidade e desempenho mecânico em argamassas e em pastas para análises da microestrutura.

### 3.3.1 Caracterização microestrutural das CBCA's e pastas

Para a caracterização das CBCA's foram utilizadas as técnicas de fluorescência de raios X (FRX) para a determinação da composição química, microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS) para obtenção de informações morfológicas das partículas, análise térmica (TG/DSC/DTG) para estudo da composição considerando a variação de massa das amostras em função da temperatura e difração de raios X (DRX) para a estrutura cristalina e identificação da composição mineralógica. Para análise dos hidratos formados em pastas aos 28 e 90 dias de cura foram utilizados MEV-EDS, TG/DTG e DRX para observar as fases cristalográficas e o consumo de portlandita por reações com as CBCA's em estudo.

O FRX foi realizado em um espectrômetro *Rigaku* modelo *ZSX Primus IV*, equipado com tubo de Rh. Para análise dos óxidos maiores, a curva de calibração foi construída com padrões de rochas e minerais naturais certificados. Uma alíquota de aproximadamente 2,0 gramas de cada amostra foi seca em estufa a 105°C por 2 horas e destinada para a determinação da perda na ignição (LOI). Para determinação do LOI, a amostra foi calcinada a 1000°C por 5 horas. Uma alíquota de 1 grama da amostra, previamente calcinada, foi fundida com 9,0 gramas de tetraborato de lítio.

As imagens de análise MEV foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) *Jeol JSM7100F* com tensão de aceleração de elétrons de 10kV no modo de detecção de elétrons secundários (SED). As análises composicionais foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) *Jeol IT300LV* pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), com um detector de raios X *Oxford Instruments Max-n 80* acoplado ao microscópio.

A técnica de termogravimetria TG/DSC foi realizada utilizando o equipamento *Netzsch STA 449 F3 Nevio*, cadinho de alumínio e atmosfera de nitrogênio (50 ml/min) com taxa de aquecimento de 10 K/min e intervalo de temperatura de 30°C a 1000°C.

As medidas de difração de raios X (DRX) foram realizadas em um difratômetro *Bruker D8 Discover*, utilizando radiação monocromática de um tubo com anodo de cobre acoplado a um monocromador *Johansson* para  $K\alpha_1$  operando em 40kV e 40mA, configuração Bragg-Brentano  $\theta$ - $2\theta$ , detector unidimensional *Lynxeye®*, intervalo de  $2\theta$  de 5° a 100°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida.

### 3.3.2 Preparação e caracterização das argamassas

As argamassas foram preparadas em mistura mecânica na proporção 1:3:0,48 (cimento, areia, água) com as taxas de substituição de 0% (controle), 25%, 30% e 35% com as cinzas CM e SF, foram nomeadas como Con, 25CM, 30CM, 35CM, 25SF, 30SF e 35SF, estando as proporções das misturas apresentadas na Tabela 1. As quantidades de superplastificante (à base de policarboxilatos) para melhorar a trabalhabilidade nas argamassas foram calculadas de acordo com as NBR 7215: 2019 [26] e NBR 5752: 2014 [27], consistência na mesa de fluxo até alcançar o índice de 165 mm ( $\pm 5$  mm). As misturas foram moldadas e protegidas com filme plástico para evitar perdas de umidade, colocadas em repouso a 25°C por 24 horas, em seguida foram desmoldadas e submersas até o dia correspondente à cura de cada idade de teste.

Tabela 1. Proporções das misturas das argamassas.

Proporções (g)	Argamassas controle e com substituições						
	Con	25CM	30CM	35CM	25SF	30SF	35SF
Cimento	624	468	436,8	405,6	468	436,8	405,6
Cinzas	-	156	187,2	218,4	156	187,2	218,4
Areia	1872	1872	1872	1872	1872	1872	1872
Água	300	300	300	300	300	300	300
Superplastificante	-	11,232	12,48	13,344	5,616	6,24	6,864
a/c	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48

### 3.3.3 Trabalhabilidade das argamassas

Para verificação da trabalhabilidade das argamassas, com e sem substituição, em estado fresco com a mesma relação a/c (0,48) e sem a adição de superplastificante, foi feito o teste de índice de consistência na mesa de fluxo determinado pelos diâmetros médios de cada tronco de cone de argamassa das misturas (NBR 7215: 2019) [26], conforme Tabela 2.

Tabela 2. Trabalhabilidade de argamassas sem adição de superplastificante.

Diâmetros médios (mm)						
Con	25CM	30CM	35CM	25SF	30SF	35SF
168,83	131,6	131,6	128,3	138,3	136,6	131,6

### 3.3.4 Resistência mecânica das argamassas

Para o ensaio de compressão, para cada mistura, foram moldados dez (10) corpos de prova cilíndricos 50x100mm para as idades de 7, 14, 28, 90 e 180 dias em cura úmida com água saturada de cal. O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a NBR 7215: 2019 [26] em prensa hidráulica universal INSTRON EMIC 23-300 a 0,25 MPa/s e os resultados podem ser observados na Tabela 5.

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a NBR 13279:2005 na mesma prensa hidráulica. Foram produzidos cinco (5) corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm de cada mistura, para as idades em estudo. Os rompimentos foram feitos na prensa hidráulica já mencionada anteriormente, com carga de 50 N/s até a ruptura dos corpos de prova. Para a obtenção dos resultados em megapascals (MPa) de cada rompimento, foi utilizada a Equação 1. Os resultados obtidos no ensaio estão na Tabela 6.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_t \times L}{40^3} \quad (1)$$

em que,  $R_f$  = resistência à tração na flexão (MPa);  $F_t$  = carga aplicada verticalmente no centro do corpo de prova (N);  $L$  = distância entre os suportes (mm).

Os resultados analisados da resistência à compressão foi a média de 10 amostras padrão e da resistência à tração na flexão foi a média de 5 amostras.

### 3.3.5 Absorção de água e índice de vazios

Para medir absorção de água e índice de vazios foram preparados três corpos de prova cilíndricos (conforme preparados para o ensaio de resistência à compressão) de cada mistura que ficaram em cura por 28 dias e secos a 105°C após esse período, em seguida foram feitas as medições de massa nas condições seca, saturada e submersa. Para medir a absorção de água foi utilizada a Equação 2 e os índices de vazio pela Equação 3 (NBR 9778: 2005) [28].

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

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

em que,  $A$  = absorção de água (%);  $m_{sat}$  = massa saturada (g);  $m_s$  = massa seca (g);  $I_v$  = índice de vazios (%);  $m_i$  = massa submersa (g).

### 3.3.6 Preparação e caracterização das pastas

As pastas, controle e com substituição, para análises da influência das CBCA's na formação de produtos de hidratação foram preparadas em mistura mecânica, moldadas em comprimidos de 4x5 mm (diâmetro x espessura), desmoldados após 24 horas e colocadas em cura úmida de 28 e 90 dias. Com o fim do período, os comprimidos foram moídos e feita a interrupção de cura com imersão de acetona por 120 minutos e em seguida, dispostas na estufa a 50°C por aproximadamente 180 minutos, até a secagem completa. Após a secagem, as amostras foram acondicionadas em embalagens lacradas e colocadas dentro do dissecador até o envio para as análises.

Para determinar a proporção de água e cimento (a/c) nas pastas, foi adicionada água de forma experimental, até que a consistência fosse igual ao disposto na NBR 16606: 2018 (6±1) [29] mm no aparelho de Vicat. As proporções das misturas das pastas podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3. Proporções das misturas das pastas.

Proporções (g)	Pastas controle e com substituições						
	Con	25CM	30CM	35CM	25SF	30SF	35SF
Cimento	500	375	350	325	375	350	325
Cinzas	-	125	150	175	125	150	175
Água	150	230	245	260	210	230	245
a/c	0,30	0,46	0,49	0,52	0,42	0,46	0,49

A Tabela 3 mostra que a relação a/c nas pastas aumenta conforme aumenta a quantidade de CBCA substituída pelo cimento e que a CBCA-CM apresenta maior necessidade de adição de água que se deve a alta quantidade de LOI [29], o que é desvantagem para a resistência a esforços mecânicos.

## 3.4 Resultados e discussão

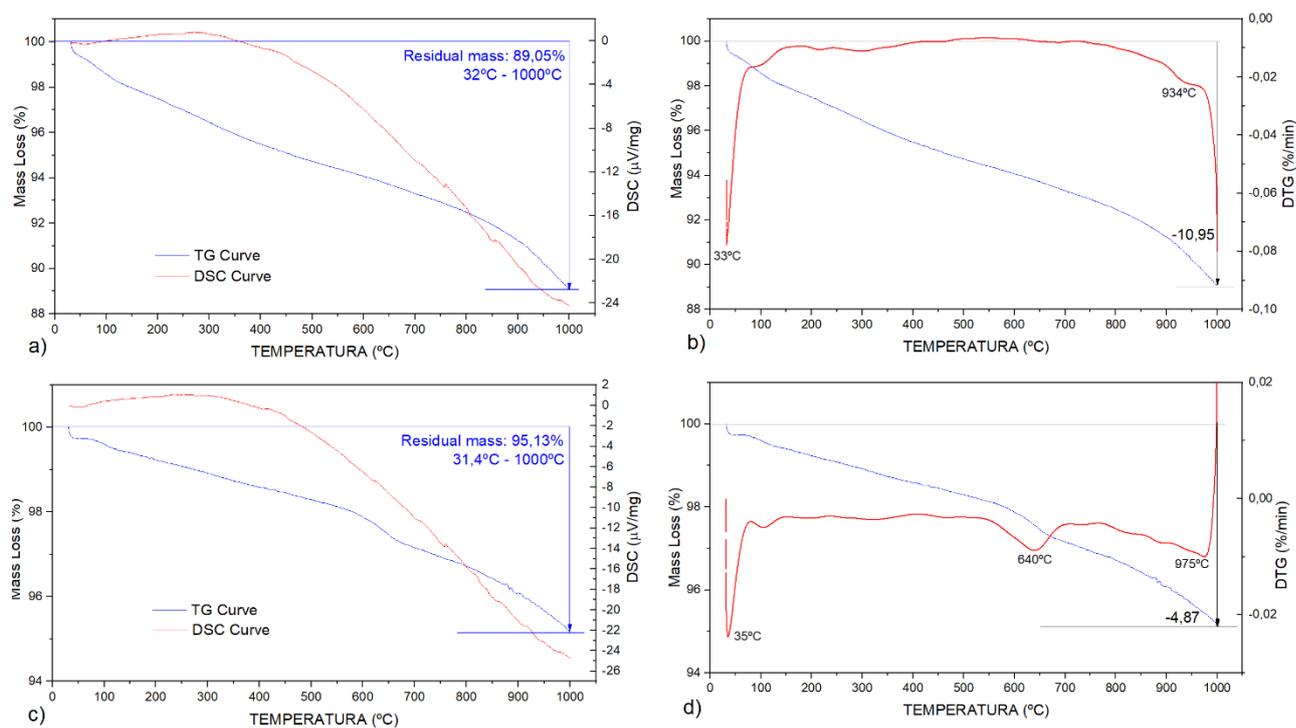
### 3.4.1 Caracterização química e física das CBCA's

A Figura 1 mostra as curvas de análises térmicas (TG, DTG e DSC) das CBCA-CM e CBCA-SF. As curvas DTG apresentam pequeno pico localizado entre 30°C e 35°C correspondente à perda de água adsorvida nas duas cinzas.

Nas Figuras 2a e 2b é possível observar na curva TG da CBCA-CM, perda de massa gradual de 32°C a 1000°C, com perda total de massa de 10,95% (1,02 mg), com leves picos endotérmicos na curva DTG não detectados na curva TG.

As Figuras 2c e 2d correspondem à CBCA-SF, na curva TG apresentou menor taxa de perda de massa total de 4,87% (0,60 mg) com perda de massa gradual de 31°C a 1000°C. É observado o pico em 640°C por causa da decomposição dos carbonatos [[9], [31]].

A perda de massa da amostra CBCA-CM é atribuída ao alto LOI apresentado no resultado FRX da mesma, no entanto, as partículas de carbono presentes nas cinzas não são detectadas pela técnica de termogravimetria porque a análise foi realizada em atmosfera de nitrogênio (condição inerte) [32] e por ser observado por Sande *et al.* (2022) [15] que as partículas não são totalmente queimadas por causa do tamanho e estado de pré-carbonatação presentes em cinzas de biomassa.



**Figura 1.** Curvas TG, DSC e DTG das a) e b) CBCA-CM, c) e d) CBCA-SF.

Na Tabela 4 são apresentadas as composições químicas das CBCA's. Entre as cinzas em estudo, a CBCA-CM apresenta a menor quantidade de  $\text{SiO}_2$  (30,29%) enquanto a CBCA-SF apresenta pouca diferença em relação a primeira (39,01%), porcentagens baixas quando comparadas com outras pozolanas tradicionais como a sílica ativa que apresenta teor de  $\text{SiO}_2$  maior ou igual a 85% (NBR13956-1: 2012) [33]. A presença de altos níveis de sílica reativa influencia diretamente nas características pozolânicas das cinzas, a NBR 12653:2014 [34]

(equivalente à ASTM C618) indica que a combinação S+A+F ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) seja 70% em peso para as cinzas volantes de classe C e 50% para as de classe E. A presença de aluminatos nas CBCA's tende a aumentar a resistência pela formação de gel CASH (aluminossilicato de cálcio hidratado) [25] e influenciar nas características de pega e enrijecimento dos compostos, enquanto o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atua como o responsável pela reatividade.

A CBCA-CM apresenta S+A+F de 57,96% e a CBCA-SF de 63,40% o que as classificaria primariamente como cinzas de classe E, no entanto, outros critérios devem ser observados. A NBR 12653: 2014 [34] também recomenda que a perda ao fogo (LOI) seja menor que 6% para as classes C e E. Os valores obtidos das CBCA's em estudo foram 28,15% para a CBCA-CM e 16,45% para a CBCA-SF, atribui-se a esses, à presença de carbono presente no bagaço e que não foi totalmente queimado. No presente estudo, a quantidade de  $\text{SiO}_2$  foi menor do que outros materiais citados em literatura e LOI muito acima dos indicados por norma, taxas esperadas em cinzas sem tratamento [[16], [17], [35]]. Mesmo com esses resultados, a pesquisa foi direcionada em investigar os efeitos desses nas propriedades mecânicas das argamassas com substituição.

A presença de baixas quantidades de CaO indica pouca ou nenhuma reatividade hidráulica em ambas as CBCA's. O álcali ( $\text{K}_2\text{O}$ ) foi encontrado em taxas de 3,40% e 4,16% esperado de cinzas de biomassa [9], sendo, no entanto, indesejável por provocar reação álcali-agregado na matriz cimentícia [[35], [36]]. Ouedraogo *et al.* [36] informam que se a relação  $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  estiver nos limites de 0,25 e 0,63 a cinza será alcalina (não calcária), os valores encontrados para a CBCA-CM e CBCA-SF foram 0,84 e 1,41 respectivamente. A quantidade de  $\text{SO}_3$ , elemento que retarda o tempo de pega dos compósitos, ficou abaixo do estabelecido por norma ( $\leq 5\%$ ) para ambas as classificações.

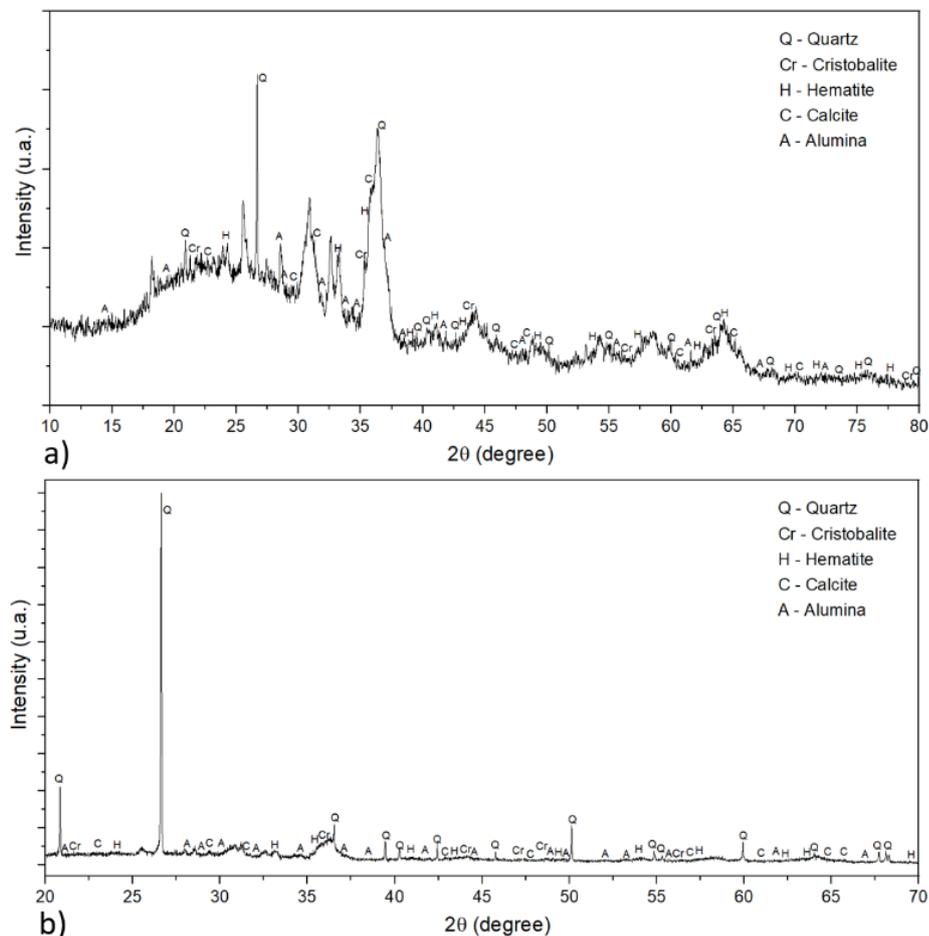
Tabela 4. Dados químicos do cimento e cinzas SF e CM (por fluorescência de raios X).

Óxidos Principais	Peso (%)		
	Cimento	CBCA-CM	CBCA-SF
$\text{SiO}_2$	20,54	30,29	39,01
$\text{TiO}_2$	0,29	3,92	3,64
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,38	12,43	11,45
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,16	15,24	12,94
MnO	<LQ	<LQ	<LQ
MgO	5,53	2,00	3,06
CaO	56,47	2,85	5,87
$\text{Na}_2\text{O}$	0,24	<LQ	<LQ
$\text{K}_2\text{O}$	0,94	3,40	4,16
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,11	1,70	3,23

SO <sub>3</sub>	3,59	<LQ	0,2
S+A+F	29,08	57,96	63,40
LOI	3,70	28,15	16,45

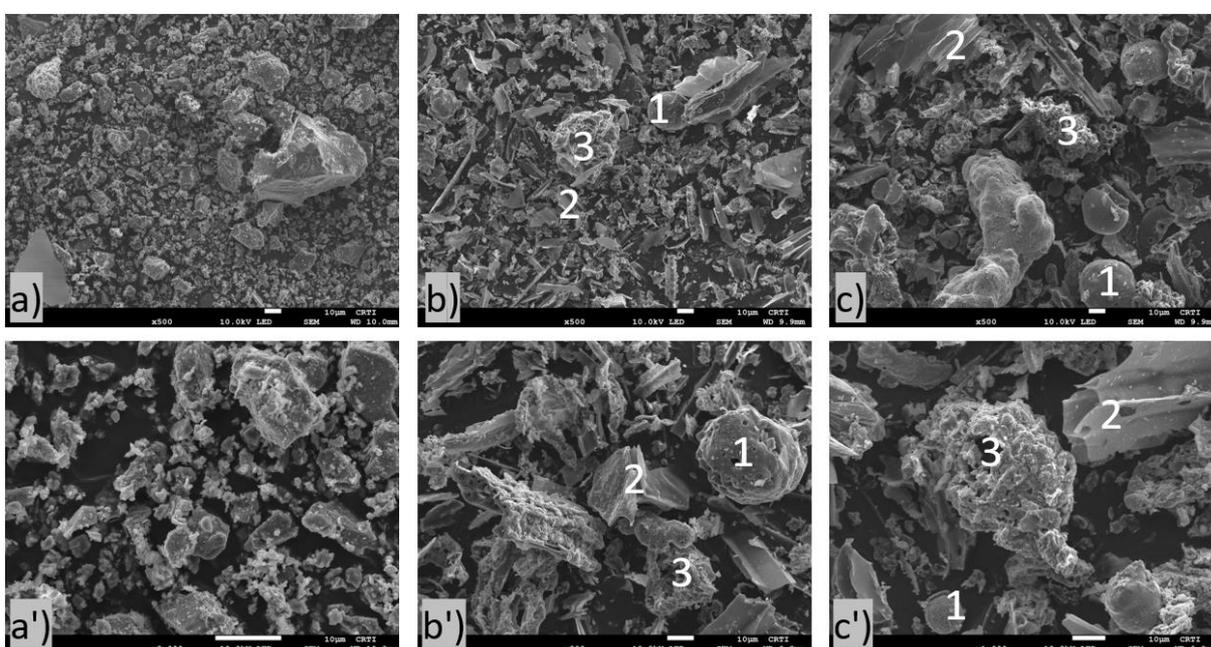
(<LQ) = Abaixo do limite quantificável

O padrão DRX das cinzas é apresentado nas Figuras 2a e b. As principais fases cristalinas identificadas são quartzo (SiO<sub>2</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), calcita (CaCO<sub>3</sub>) e pequena quantidade de cristobalita. Na CBCA-CM em 2a, é observado ainda, presença de material amorfo apresentado pelo desvio da linha de base 2θ entre 15° e 35°, também observado por outros autores [[2], [9], [11], [36], [37], [38]]. A presença de quartzo é atribuída à contaminação do solo e a cristobalita deve-se à conversão da sílica hidratada queimada em altas temperaturas e por longo tempo no interior das caldeiras [[10], [30], [39]]. Os resultados de EDS das cinzas (ver material complementar – Apêndice A) apontaram que suas partículas contêm principalmente silício, alumínio, carbono, ferro e cálcio, confirmando os resultados obtidos na análise FRX (tabela 4). Em todos os pontos, observa-se também grandes quantidades de carbono, que pode afetar a reatividade das cinzas, ligam-se às partículas reativas e diminuem a resistência mecânica das argamassas [17].



**Figura 2.** Padrões de DRX das cinzas de bagaço: a) CBCA-CM e b) CBCA-SF.

A Figura 3 mostra imagens de MEV que indicam que as partículas do cimento (a) são menores e mais regulares que as CBCA's em estudo. Adhikary, Ashish e Rudzionis [25], afirmam que a textura fina, as características porosas e o formato esférico das partículas dos materiais cimentícios suplementares tendem a melhorar a trabalhabilidade dos compostos cimentícios. As Figuras 2b e 2c revelam a presença de partículas porosas e de ampla gama de tamanhos, formatos (prismáticas, irregulares, tubulares e aglomeradas) e texturas de superfície rugosas e porosas em ambas as CBCA's, características verificadas por outros autores [[11], [30], [35], [39], [40]]. A porosidade pode estar associada a partículas não totalmente calcinadas [[16], [29]].

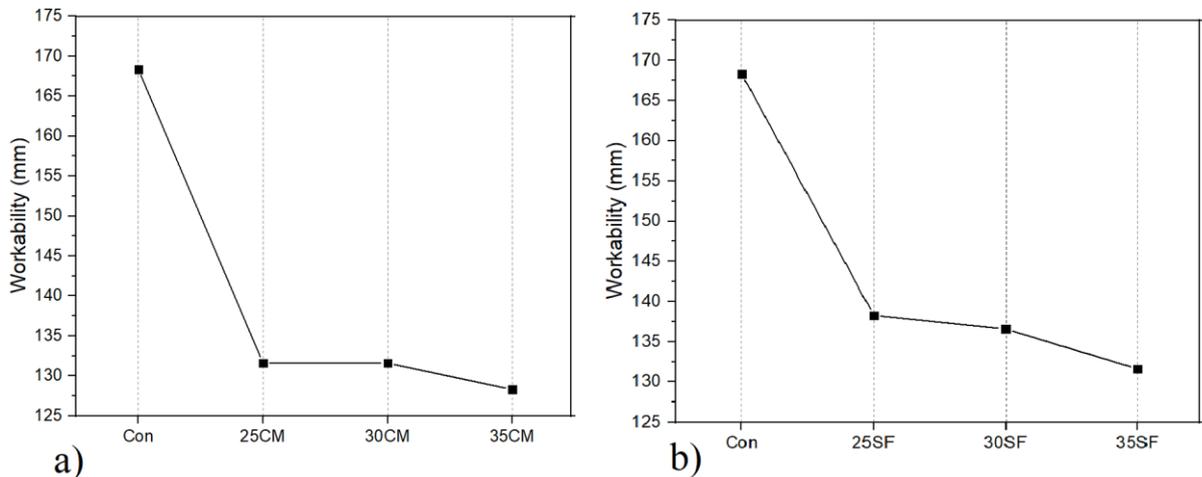


**Figura 3.** Imagens MEV com aumentos de 500, 800, 1000 e 2000 vezes a 10 $\mu$ m, em a) e a') CP V ARI, b) e b') CBCA-CM, c) e c') CBCA-SF. As marcações enumeradas: 1- Sílica amorfa fundida esférica; 2 – Sílica cristalina pela combustão incompleta; 3 – Sílica irregular e porosa.

### 3.4.2 Trabalhabilidade das argamassas

A trabalhabilidade das argamassas foi inversamente proporcional à quantidade de cinzas substituída nas mesmas e a decisão de não ser utilizado superplastificante para essa análise, o comportamento reológico pode ser atribuído exclusivamente para as diferentes taxas de substituição de CBCA's ao cimento. A figura 4 mostra que o espalhamento da argamassa controle foi de 168,83 mm (dentro dos limites estabelecidos em norma). A redução mais significativa, em relação à argamassa controle, foi observada na argamassa 35CM (24,0%), seguida pelas misturas 25CM, 20CM e 35SF com 22,05%. As argamassas 25SF e 30SF foram as que apresentaram as menores reduções, de 18,08% e 19,09% respectivamente. O

desempenho das argamassas em estado fresco, com as porcentagens de substituição em estudo, mostrou que elas têm efeito desfavorável na trabalhabilidade das misturas, principalmente as que contêm CBCA-CM, com maior LOI, efeito também observado por [17]. Portanto, pode-se afirmar que as argamassas com substituição foram significativamente afetadas pelas cinzas não tratadas utilizadas nas porcentagens em estudo.



**Figura 4.** Efeito das CBCA's na trabalhabilidade das argamassas controle a) com substituição de cinzas CM e b) com substituição de cinzas SF.

### 3.4.3. Resistência mecânica

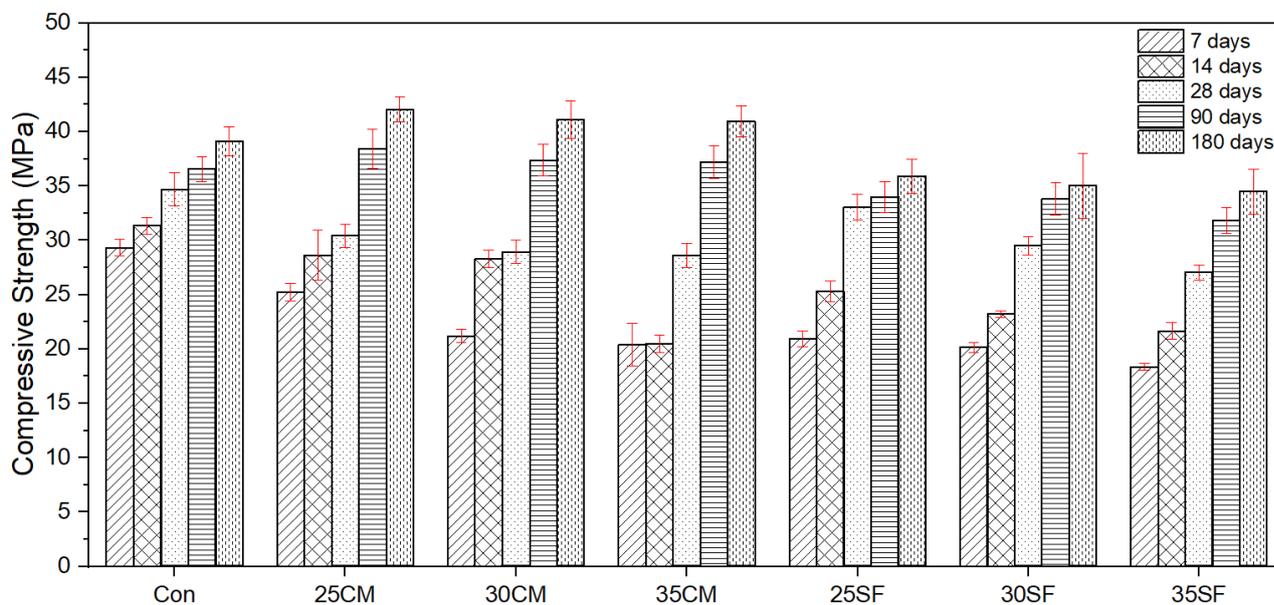
#### 3.4.3.1 Resistência à compressão

A Figura 5 mostra as resistências das argamassas aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias de cura, é possível observar que todas as argamassas apresentaram aumento na resistência com o aumento das idades, no entanto, nenhuma argamassa com substituição, até a idade de 28 dias, alcançou a resistência mínima atingida pela argamassa controle, resultados similares esperados e observados em literatura [[30], [36], [41]].

Aos 7 dias de cura, a argamassa controle apresentou maior resistência à compressão (29,33 MPa), seguida das argamassas contendo 25%, 30% e 35% de CBCA-CM (25,22, 21,19 e 20,38 MPa, respectivamente) representando na média das resistências perdas de 13,98%, 27,72% e 30,48%. As argamassas com substituição de 25%, 30% e 35% de CBCA-SF apresentaram perdas de 28,54%, 31,23% e 37,35% em ordem.

Após 14 dias, observou-se ganhos de resistência de 13,48%, 33,46% e 0,59% para as taxas (em ordem crescente) de CBCA-CM. Nas amostras com CBCA-SF os aumentos foram de 20,81%, 15,07% e 17,90%, enquanto na amostra controle dessa idade foi observado aumento de 6,85%.

A argamassa com melhor desempenho mecânico aos 28 dias foi a 25SF, com ganho de 30,54% em relação à idade anterior e com perda de apenas 4,78%, em relação à argamassa controle na mesma idade. Os resultados implicam que as argamassas com cinzas em sua composição tiveram sua resistência à compressão comprometida nas primeiras idades conforme o aumento nas taxas de substituição das cinzas sem tratamento e com alto LOI [[17], [30]].

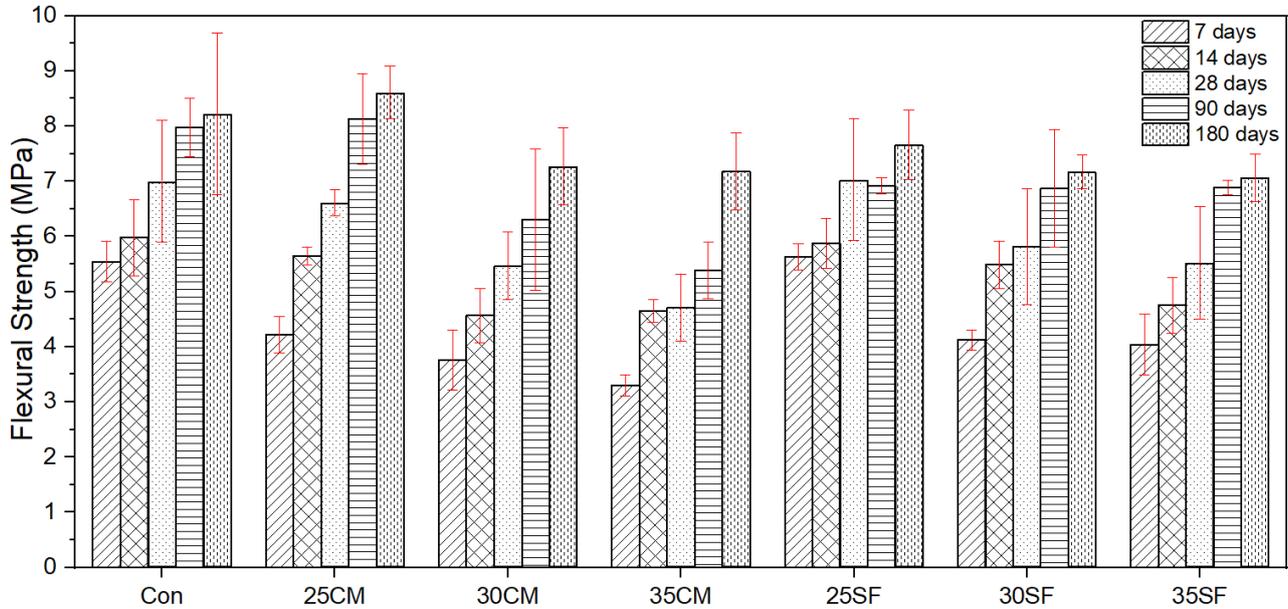


**Figura 5.** Resultados de resistência à compressão das argamassas aos 7, 14, 28, 90 e 180 dias.

Aos 90 e 180 dias as argamassas da série CM alcançaram resultados acima das argamassas controle e SF. A argamassa 25CM apresentou o melhor desempenho com crescimento de 5,14% e 7,62% em relação ao controle nas respectivas idades, seguida da 30CM com 2,21% e 5,19 e 35CM com 1,75% e 4,78%. Isso indica que as cinzas CM exerceram influência positiva na evolução tardia da resistência mecânica das argamassas. Quando comparadas à idade de 28 dias, houve ganhos de 26,36% em 90 dias e 38,3% em 180 dias para 25CM. Esse aumento da resistência deve-se à reação pozolânica que ocorre entre a sílica amorfa e o hidróxido de cálcio resultante das reações de hidratação do CP. Os resultados são consistentes com a literatura, já que os autores observaram aumentos em idades acima dos 28 dias, mesmo aqueles que utilizaram cinzas não tratadas ou pouco tratadas. [[10], [17], [18], [38], [42]]

### 3.4.3.2 Resistência à tração na flexão

Na Figura 6 observa-se que, tal como ocorreu com as resistências à compressão, as resistências à tração na flexão das argamassas até 28 dias, diminuíram significativamente conforme o aumento dos teores de CBCA's e foram constatados melhores resultados com idades tardias.



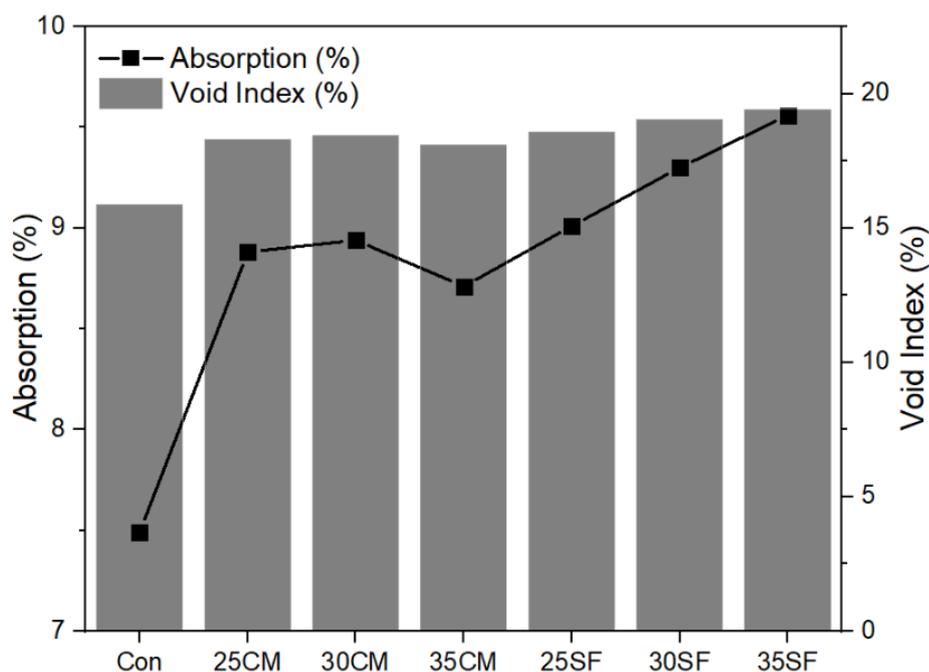
**Figura. 6.** Resultados de resistência à tração na flexão.

A argamassa controle apresentou resistência de 5,54 MPa aos 7 dias enquanto o grupo 25SF, 30SF e 35SF foram 5,63, 4,12 e 4,04 respectivamente. Nesse grupo, foi observado aumento pouco expressivo de 1,62% na amostragem 25 SF em relação à argamassa controle. No grupo 25CM, 30CM e 35CM foram encontrados os resultados de 4,22, 3,76 e 3,30 em ordem. Com 14 dias, a amostra controle alcançou a resistência de 5,98 MPa, seguido por 5,88 MPa e 5,64 MPa nas 25SF e 25CM (melhores resultados), representando 4,44% e 3,65% em relação à idade anterior desses grupos de amostras. Na idade de 28 dias, a argamassa controle o aumento foi de 17,2% para 25CM e 19,56% para 25SF. Os resultados obtidos na resistência à flexão foram diminuindo conforme o aumento do nível de substituição, neste estudo, a melhor amostragem nas primeiras idades, foi de 25SF.

Nas idades de 90 e 180 dias as amostras 25CM apresentaram aumentos de 2,0% e 4,74% em relação às argamassas controle de mesmas idades. Todas as demais amostras de argamassa com substituição não ultrapassaram os resultados da argamassa controle.

### 3.4.4 Absorção de água e índice de vazios

A Figura 7 mostra a absorção de água por imersão e o índice de vazios das amostras em estudo. Depois de 72 horas em imersão, a argamassa controle absorveu a menor quantidade de água (7,49%) em relação às argamassas contendo CBCA'S. Os resultados indicam que ambas as CBCA's contribuíram para o aumento dos índices de vazios nos corpos de prova, exceto para 35CM em que se observa leve queda em relação às amostras de menor porcentagem de CBCA no mesmo grupo.



**Figura 7.** Resultados de absorção e índice de vazios.

Na Tabela 5 estão os valores de massa específica real, índice de vazios e absorção das amostras, as CBCA-SF apresentam maiores valores de índices de vazios e consequentemente de absorção quando comparadas às correspondentes em níveis de substituição.

**Tabela 5.** Valores de massa específica real, absorção e índice de vazios.

Amostra	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Índice de vazios (%)
Con	2,52	7,49	15,89
25CM	2,52	8,88	18,31
30CM	2,53	8,94	18,45
35CM	2,54	8,71	18,11
25SF	2,53	9,01	18,59
30SF	2,53	9,30	19,05
35SF	2,52	9,56	19,42

### 3.3.5 Caracterização das pastas

As pastas de cimento, aos 28 dias têm 70-80% dos produtos de hidratação já formados e os produtos posteriores são provenientes de hidratação lenta (até 360 dias) [43], portanto, os estudos dos hidratos foram feitos nessa idade e aos 90 dias de cura. A Tabela 3 revela como as taxas de substituição de cinzas aumentaram a quantidade de água necessária para a consistência normal das pastas ( $6\pm 1$ mm), corroborando o relato de alguns pesquisadores sobre o aumento na necessidade de água ser diretamente proporcional ao aumento da taxa de substituição de CBCA's, o que leva também ao aumento da porosidade. Esse aumento é pela porosidade e irregularidades observadas nas partículas de CBCA e sua maior área superficial em relação ao CP [[12], [30], [44]], características observadas na Figura 3.

A pasta controle foi produzida com a relação 0,30 enquanto, para alcançar a mesma consistência, as pastas de CBCA-CM foram 0,46, 0,49 e 0,52 (em ordem crescente de teor de cinzas substituídas). Isso representa 53,33%, 63,33% e 73,33% de aumento no teor de água, esse resultado condiz com o alto LOI da cinza. As CBCA-SF requereram quantidades menores de água em relação a outra cinza, 0,42 (40%), 0,46 (53,33%) e 0,49 (63,33%) para 25SF, 30SF e 35SF respectivamente. Essa característica é por causa do LOI mais baixo observado na amostragem dessa cinza.

A adição de água aos cimentos forma compostos denominados produtos de hidratação que consistem basicamente em silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monosulfaluminato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio. A análise térmica é considerada o melhor método de determinação da quantidade de água quimicamente combinada com os produtos de hidratação de pastas de cimento [43]. Para melhor análise das fases de decomposição dos produtos de hidratação e água, as faixas de temperatura serão divididas em três: 1º) 40°C a 200°C, ocorre a decomposição da tobermorita (silicato de cálcio hidratado - CSH) e etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado), ainda na primeira faixa de temperatura, entre 35°C e 105°C acontece a perda de água não combinada quimicamente (água livre e capilar); 2º) 380°C a 520°C ocorre a desidratação da portlandita (hidróxido de cálcio - CH) e aluminatos; 3º) 540°C a 880°C ocorre a descarbonização da dolomita, calcita e carboaluminatos de cálcio [[45], [46], [47], [48]].

As Tabelas 6 e 7 mostram a quantificação dos teores de água quimicamente combinada, de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das pastas com 28 e 90 dias, calculadas a partir das Equações 4 e 5 [[49], [50], [51], [52]]:

$$CH_{2, \text{ calculado}} = PM_{Ca(OH)_2} \times \frac{m_{Ca(OH)_2}}{m_{(H_2O)}} \quad (4)$$

em que,  $CH_{2, \text{ calculado}}$  = teor de hidróxido de cálcio calculado (%);  $PM_{Ca(OH)_2}$  = perda de massa do hidróxido de cálcio verificada na curva TG (%) entre 380°C e 520°C;  $m_{Ca(OH)_2}$  = massa molecular do hidróxido de cálcio (74 g/mol);  $m_{H_2O}$  = massa molecular da água (18 g/mol).

$$CaCO_{3, \text{ calculado}} = PM_{CaCO_3} \times \frac{m_{CaCO_3}}{m_{CO_2}} \quad (5)$$

em que,  $CaCO_{3, \text{ calculado}}$  = teor de carbonato de cálcio calculado (%);  $PM_{CaCO_3}$  = perda de massa do carbonato de cálcio verificada na curva TG (%) entre 540°C e 850°C;  $m_{Ca(OH)_2}$  = massa molecular do carbonato de cálcio (100 g/mol);  $m_{CO_2}$  = massa molecular dióxido de carbono (44 g/mol).

Para que haja normalização quando as amostras não estiverem em uma mesma base não volátil, Taylor [51] recomenda que seja feita a correção das perdas de massa. O fator de normalização é calculado dividindo o valor total de massa (100%) pela massa residual das amostras.

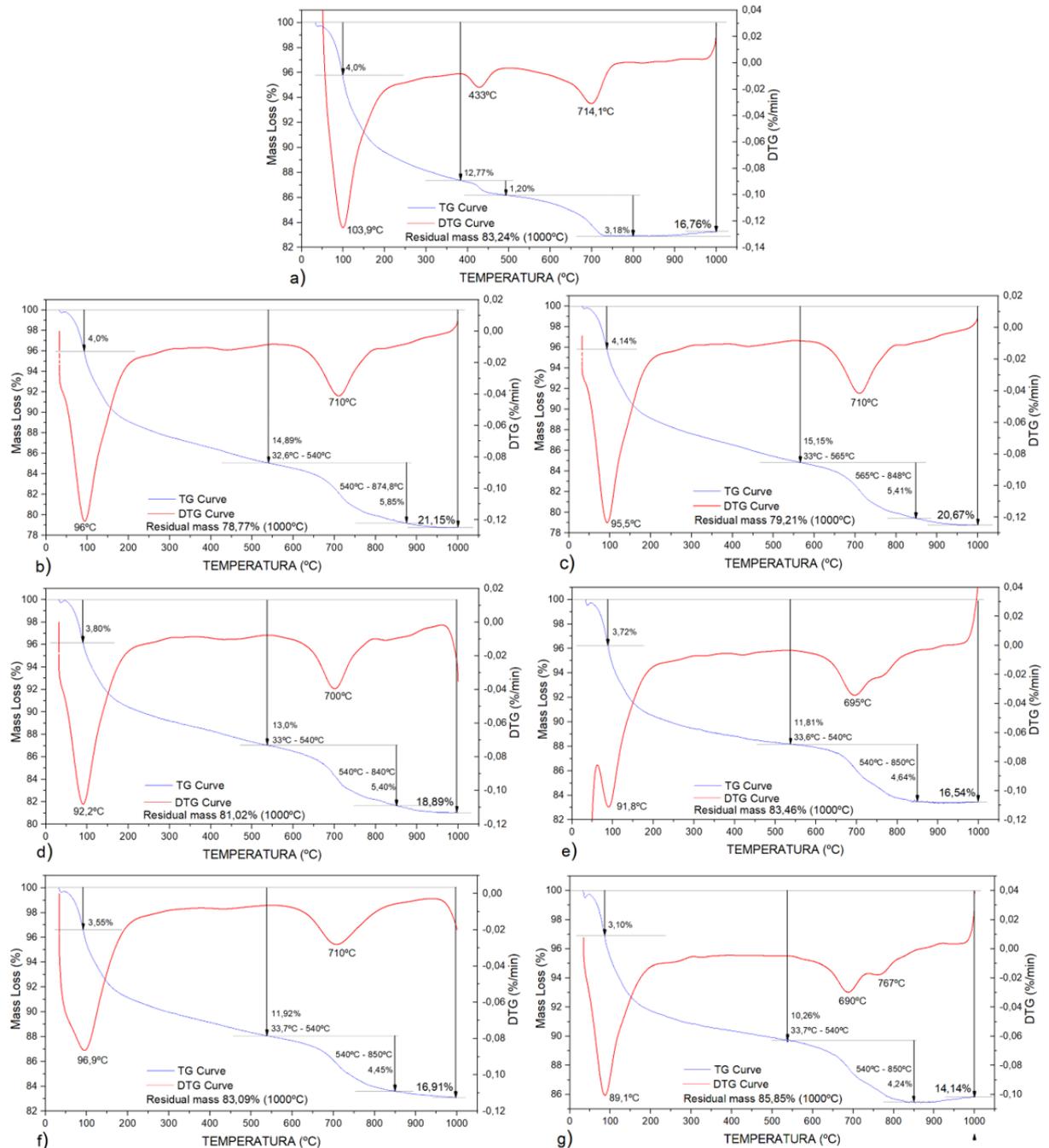
Tabela 6. Teor percentual de produtos de hidratação das pastas aos 28 dias.

Pasta	AQC (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)	Fator de normalização
		H <sub>2</sub> O	Ca(OH) <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>		
Con	Perda de massa						
	12,77	1,20	4,93	3,18	7,23	83,24	1,201
	Correção da perda de massa						
	15,34	1,44	5,93	3,82	8,68	100	
25CM	Perda de massa						
	17,15	-	-	5,85	13,29	78,77	1,269
	Correção da perda de massa						
	21,77	-	-	7,42	16,88	100	
30CM	Perda de massa						
	16,53	-	-	5,41	12,29	79,21	1,262
	Correção da perda de massa						
	20,87	-	-	6,83	15,52	100	
35CM	Perda de massa						
	15,09	-	-	5,40	12,27	81,02	1,234
	Correção da perda de massa						
	18,63	-	-	6,66	15,15	100	
25SF	Perda de massa						
	12,82	-	-	4,64	10,54	83,46	1,198
	Correção da perda de massa						
	15,36	-	-	5,56	12,63	100	

30SF	Perda de massa						
	13,36	-	-	4,45	10,11	83,09	1,203
	Correção da perda de massa						
	16,08	-	-	5,35	12,17	100	
35SF	Perda de massa						
	11,04	-	-	4,24	9,64	85,85	1,164
	Correção da perda de massa						
	12,86	-	-	4,94	11,22	100	

Neste estudo, aos 28 dias, ocorrem picos bem evidentes na primeira faixa de temperatura entre 89,1°C e 103,9°C, observados na Figura 8. Na segunda faixa, a decomposição do CH ocorre com pico a 433°C na pasta controle, nas pastas com substituição não é possível visualizar os picos de CH, como em Berenguer *et al.* [11] e Moraes *et al.* [9], o aumento da quantidade de água quimicamente combinada e redução da quantidade de portlandita nas pastas indica que houve maior quantidade de CSH pelo consumo de portlandita, característica observada em materiais cimentícios com reação pozolânica. Na terceira faixa, a perda de massa de dióxido de carbono ocorreu entre 540°C e 874,8°C.

A Figura 8a mostra que na pasta controle o teor de água quimicamente combinada é volatizada em 12,77%, a 380°C, a perda de massa de 1,20% corresponde à decomposição do hidróxido de cálcio e o teor restante, 4,93% é observado na Tabela 6. A análise térmica das pastas com substituição indicadas nas Figuras 8b, c, d, e, e f, mostram que não foram formados picos na faixa de perda de massa de CH, ou seja, as CBCA's consumiram toda portlandita presente nas pastas [9].



**Figura 8.** Curvas TG/DTG das pastas aos 28 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF.

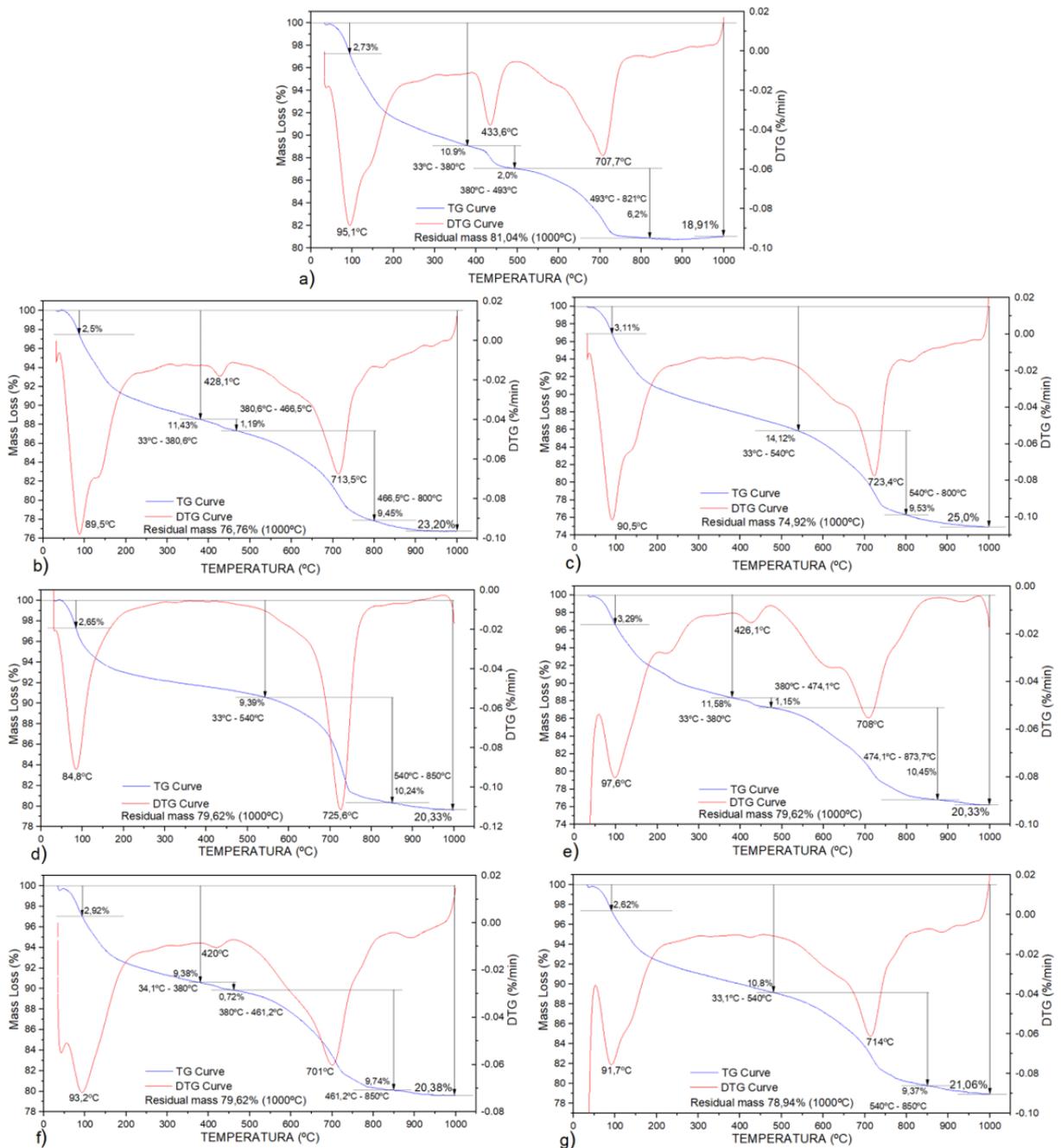
A Tabela 7 mostra que as pastas com substituição aos 90 dias apresentaram maiores teores de água quimicamente ligada e  $\text{CaCO}_3$  em relação à pasta controle. Os teores menores de CH das pastas com substituição são explicados pela menor quantidade de cimento nas mesmas [48], conseqüentemente, menor quantidade de produtos de hidratação do CP e maior quantidade de CSH com o consumo da portlandita [11].

Tabela 7. Teor percentual de produtos de hidratação das pastas aos 90 dias.

Pasta	AQC (%)	Hidróxido de cálcio (%)		Carbonato de cálcio (%)		Massa residual (%)	Fator de normalização
		$\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{CO}_2$	$\text{CaCO}_3$		
Con	Perda de massa						
	16,18	2,00	8,22	6,20	14,09	81,04	1,234
25CM	Correção da perda de massa						
	19,7	2,47	10,14	7,65	17,39	100	
25CM	Perda de massa						
	20,7	1,19	4,89	9,45	21,48	76,76	1,303
30CM	Correção da perda de massa						
	26,97	1,55	6,37	12,31	27,98	100	
30CM	Perda de massa						
	21,89	-	-	9,53	21,66	74,92	1,335
35CM	Correção da perda de massa						
	29,22	-	-	12,72	28,91	100	
35CM	Perda de massa						
	17,68	-	-	10,24	23,27	79,62	1,256
25SF	Correção da perda de massa						
	22,21	-	-	12,86	29,23	100	
25SF	Perda de massa						
	20,46	1,15	4,73	10,45	23,75	76,20	1,312
30SF	Correção da perda de massa						
	26,85	1,51	6,20	13,71	31,17	100	
30SF	Perda de massa						
	17,46	0,72	2,96	9,74	22,14	79,62	1,256
35SF	Correção da perda de massa						
	21,93	0,90	3,72	12,23	27,80	100	
35SF	Perda de massa						
	18,44	-	-	9,37	21,29	78,94	1,267
35SF	Correção da perda de massa						
	23,36	-	-	11,87	26,98	100	

A análise térmica das pastas aos 90 dias apresenta picos entre 84,8°C e 97,6°C na primeira faixa observados na Figura 9. Os picos de perda de massa de CH são percebidos nas pastas controle (Figura 9a), 25CM (Figura 9b), 25SF (Figura 9e) e 30SF (Figura 9f), enquanto

nas demais não houve picos significativos, portanto, menor quantidade de portlandita foi formada na hidratação e maior consumo pela reação com as cinzas [9]. Os picos de perda de massa de dióxido de carbono ocorreram entre 701°C e 725,6°C. A descarbonatação deve-se à estrutura porosa das argamassas, conforme observado pelo índice de vazios da Figura 7, que facilitam a dissipação do CO<sub>2</sub>. [16]

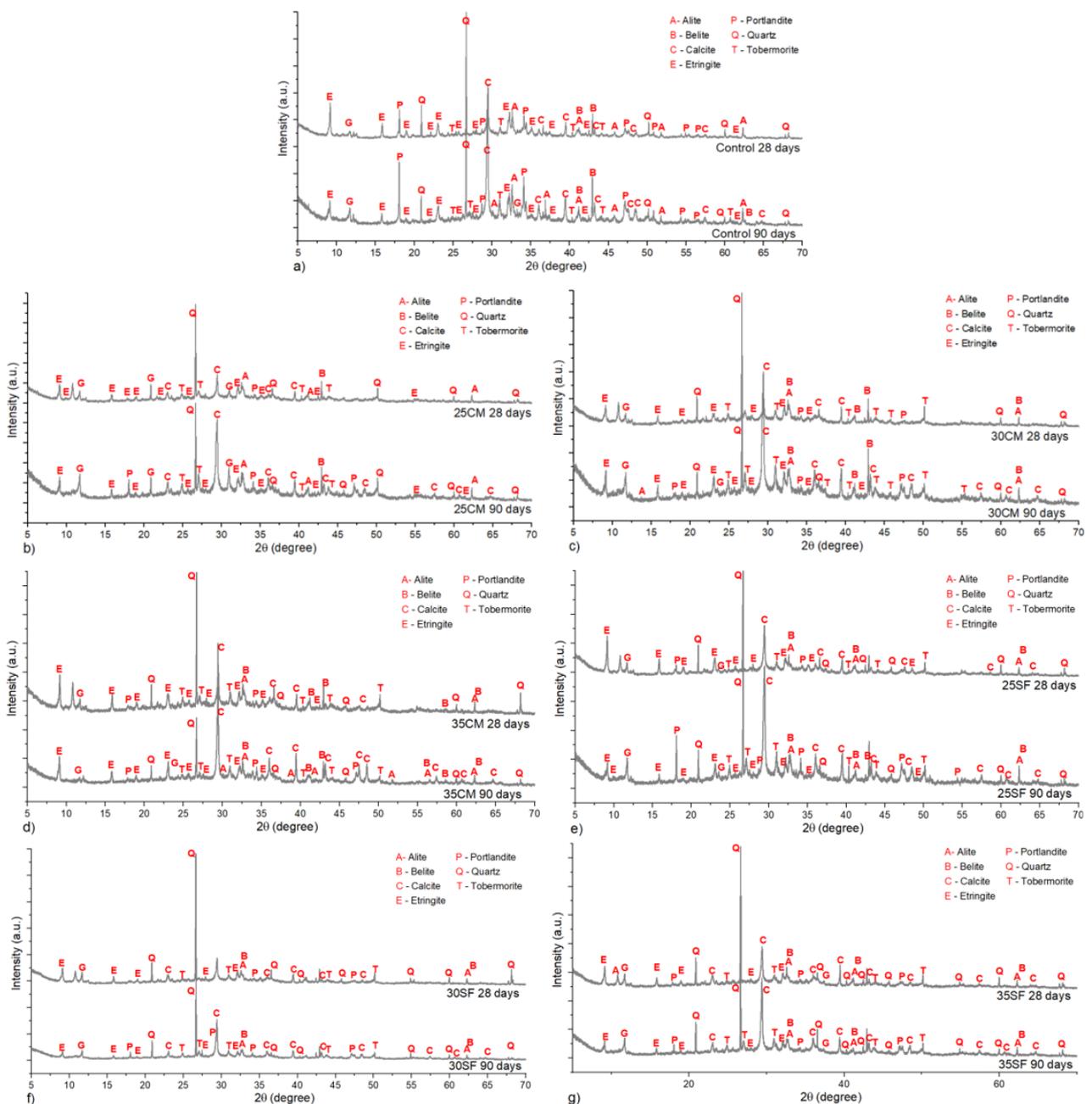


**Figura 9.** Curvas TG/DTG das pastas aos 90 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF.

A Figura 10 apresenta os difratogramas para 28 e 90 dias das séries controle, CM e SF. Foram identificadas como principais as fases de calcita (CaCO<sub>3</sub>), etringita

( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Foram encontradas ainda fases menores como a tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), alita ( $\text{C}_3\text{SiO}_5$ ) e belita ( $\text{C}_2\text{SiO}_4$ ). Os picos mais evidentes das fases serão destacados em seguida:

- Picos de calcita foram encontrados em  $2\theta \sim 29,4^\circ$  (principal),  $36,01^\circ$  e  $39,4^\circ$  sendo mais evidentes nas pastas de 90 dias de cura;
- A etringita é observada em  $2\theta \sim 9,10^\circ$ , com picos menos evidentes na pasta 30SF;
- A portlandita apresenta picos na posição  $2\theta \sim 18,09^\circ$  na pasta controle;
- Os picos mais destacados de quartzo estão em  $2\theta \sim 26,63^\circ$ ;



**Figura 10.** DRX das pastas aos 28 e 90 dias de cura úmida: a) controle; b) 25CM; c) 30CM; d) 35CM; e) 25SF; f) 30SF; g) 35SF.

### 3.5 Conclusões

Esta pesquisa avaliou os efeitos da substituição de cinzas não tratadas nas porcentagens de 25%, 30% e 35% no desempenho mecânico, trabalhabilidade e absorção de água em argamassas e composição química em pasta para investigar os efeitos pozolânicos das mesmas, dessa forma, pode-se concluir que:

- ✓ As duas cinzas apresentaram  $S+A+F > 50\%$ , mas na análise DRX foi observado que a CBCA-CM apresenta maior quantidade de material amorfo;
- ✓ A trabalhabilidade das argamassas foi inversamente proporcional ao aumento da taxa de substituição de cinzas, a 25SF apresentou a menor redução em relação à argamassa controle, de 18,08%;
- ✓ Na resistência à compressão em 90 e 180 dias, o melhor desempenho foi percebido na amostra 25CM com crescimento de 5,14% (38,44 MPa) e 7,62% (42,07 MPa) em relação à argamassa controle, 36,56 MPa e 39,09 MPa;
- ✓ A resistência dos corpos de prova no ensaio de tração na flexão foi similar ao encontrado na resistência à compressão, as amostras com 25CM tiveram melhores resultados aos 90 e 180 dias, 2,0% e 4,74%, respectivamente;
- ✓ Pelas análises TG/DTG e DRX, a atividade pozolânica das cinzas sem tratamento foram consideradas significativas devido à perda de massa de portlandita que foi observada aos 28 e 90 dias.

### 3.6 Referências

- [1] J. T. Kolawole, A.J. Babafemi, E. Fanijo, S. C. Paul, R. Combrinck, *State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials*, *Cement and Concrete Composites*, Volume 118, 2021, 103975, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103975>.
- [2] V. Jittin, A. Bahurudeen. Evaluation of rheological and durability characteristics of sugarcane bagasse ash and rice husk ash based binary and ternary cementitious system, *Construction and Building Materials*, Volume 317, 2022, 125965, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125965>.
- [3] Andrew, R. M.: Global CO2 emissions from cement production, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195–217, 2018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.
- [4] FICEM (Federação Interamericana de Cimento). Relatório estatístico de 2019. Disponível em: [https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/00\\_Informe-estadistico-2019.pdf](https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/00_Informe-estadistico-2019.pdf).
- [5] M. A. S. Anjos, T. R. Araújo, R. L.S. Ferreira, E. C. Farias, A. E. Martinelli, Properties of self-leveling mortars incorporating a high-volume of sugar cane bagasse ash as partial Portland cement replacement, *Journal of Building Engineering*, Volume 32, 2020, 101694, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101694>.
- [6] F. N. Stafford, F. Raupp-Pereira, J. A. Labrincha, D. Hotza, Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study, *Journal of Cleaner Production*, Volume 137, 2016, Pages 1293-1299, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.050>.
- [7] G. Xu, X. Shi, Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 136, 2018, Pages 95-109, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010>.
- [8] F. F. G. de Paiva, J. R. Tamashiro, L. H. P. Silva, A. Kinoshita, Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review, *Construction and Building Materials*, Volume 285, 2021, 122833, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122833>.
- [9] J.C.B. Moraes, J.L. Akasaki, J.L.P. Melges, J. Monzó, M.V. Borrachero, L. Soriano, J. Payá, M.M. Tashima, Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended Portland cement: Microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 94, 2015, Pages 670-677, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>.
- [10] G.C. Cordeiro, R.D. Toledo Filho, L.M. Tavares, E.M.R. Fairbairn, Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars, *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 5, 2008, Pages 410-418, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>.
- [11] R. A. Berenguer, A. P. B. Capraro, M. H. F. de Medeiros, A.M.P. Carneiro, R. A. de Oliveira, 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*, Volume 8, Issue 2, 2020, 103655, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103655>.

- [12] Q. Xu, T. Ji, S. J. Gao, Z. Yang, N. Wu. Characteristics and Applications of Sugar Cane Bagasse Ash Waste in Cementitious Materials. *Materials*. Volume 12, edição 1, p.39, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12010039>.
- [13] A. L. Yadav, V. Sairam, L. Muruganandam, K. Srinivasan. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. Volume 245, fevereiro de 2020, 1188541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>.
- [14] M. N. S. de Soares, D. C. S. Garcia, R. B. Figueiredo, M. T. P. Aguilar, P. R. Cetlind, Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Composites*. Volume 71, agosto de 2016, p. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>.
- [15] A. Rajasekar, K. Arunachalam, M. Kottaisamy, V. Saraswathy, Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash, *Construction and Building Materials*, Volume 171, 2018, Pages 350-356, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>.
- [16] V. T. de Sande, M.r Sadique, A. Bras, P. Pineda, Activated sugarcane bagasse ash as efficient admixture in cement-based mortars: Mechanical and durability improvements, *Journal of Building Engineering*, Volume 59, 2022, 105082, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105082>.
- [17] J.C. Arenas-Piedrahita, P. Montes-García, J.M. Mendoza-Rangel, H.Z. López Calvo, P.L. Valdez-Tamez, J. Martínez-Reyes, Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash, *Construction and Building Materials*, Volume 105, 2016, Pages 69-81, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>.
- [18] Maldonado-García, M. A., Hernández-Toledo, U. I., Montes-García, P., & Valdez-Tamez, P. L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales De Construcción*, 68(329), e148. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>.
- [19] G. A. Calligaris, M. K.K.D. Franco, L. P. Aldrige, M. S. Rodrigues, A. L. Beraldo, F. Yokaichiya, X. Turrillas, L. P. Cardoso, Assessing the pozzolanic activity of cements with added sugar cane straw ash by synchrotron X-ray diffraction and Rietveld analysis, *Construction and Building Materials*, Volume 98, 2015, Pages 44-50, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.103>.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), Rio de Janeiro, 2015.

- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (Nº 200), Rio de Janeiro, 2012.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, 2017.
- [25] S. K. Adhikary, D. K. Ashish, Ž. Rudžionis, A review on sustainable use of agricultural straw and husk biomass ashes: Transitioning towards low carbon economy, *Science of The Total Environment*, Volume 838, Part 3, 2022, 156407, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156407>.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2019.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, Rio de Janeiro, 2014.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal, Rio de Janeiro, 2018.
- [30] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 12, 2009, Pages 3523-3531, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>.
- [31] H. Patel, Environmental valorisation of bagasse fly ash: a review. *RSC Advances*, 10(52), (2020) 31611–31621. doi:10.1039/d0ra06422j.
- [32] M. Frías, E. Villar, H. Savastano, Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture, *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 4, 2011, Pages 490-496, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>.
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos, Rio de Janeiro, 2012.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653: Materiais pozolânicos- Requisitos, Rio de Janeiro, 2014.
- [35] A. A. de Siqueira, G. C. Cordeiro, Properties of binary and ternary mixes of cement, sugarcane bagasse ash and limestone, *Construction and Building Materials*, Volume 317, 2022, 126150, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126150>.

- [36] M. Ouedraogo, M. Sawadogo, I. Sanou, M. Barro, S. Nassio, M. Seynou, L. Zerbo, Characterization of sugar cane bagasse ash from Burkina Faso for cleaner cement production: Influence of calcination temperature and duration, *Results in Materials*, Volume 14, 2022, 100275, ISSN 2590-048X, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100275>.
- [37] G. P. Lyra, M. V. Borrachero, L. Soriano, J. Payá, J. A. Rossignolo, Comparison of original and washed pure sugar cane bagasse ashes as supplementary cementing materials, *Construction and Building Materials*, Volume 272, 2021, 122001, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122001>.
- [38] N. Wu, T. Ji, P. Huang, T. Fu, X. Zheng, Q. Xu, Use of sugar cane bagasse ash in ultra-high performance concrete (UHPC) as cement replacement, *Construction and Building Materials*, Volume 317, 2022, 125881, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125881>.
- [39] G. C. Cordeiro, K. E. Kurtis, Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity, *Cement and Concrete Research*, Volume 97, 2017, Pages 41-49, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.
- [40] E. Arif, M. W. Clark, N. Lake, Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 151, 2017, Pages 692-703, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>.
- [41] M.A. Tantawy, A.M. El-Roudi, A.A. Salem, Immobilization of Cr(VI) in bagasse ash blended cement pastes, *Construction and Building Materials*, Volume 30, 2012, Pages 218-223, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.016>.
- [42] A. Joshaghani, M. A. Moeini, Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 2017, Pages 818-831, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>.
- [43] M. A. S. Anjos, A. E. Martinelli, D. M. A. Melo, T. Renovato, P. D.P. Souza, J. C. Freitas, Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 109, 2013, Pages 291-297, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.016>.
- [44] V. D. Katare, M. V. Madurwar, Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 2017, Pages 1-15, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>.
- [45] V. Petkova, V. Stoyanov, V. Pelovski, TG – DTG – DTA in studying white selfconsolidation cement mortars, *J. Therm. Anal. Calorim.* 109 (2012) 797–806, <https://doi.org/10.1007/s10973-012-24477>.
- [46] L. A. Silva, B. de O. Nahime, A. dos S. Felipe, C. N. Elias, D. R. do Carmo, E. C. de Lima, I. S. dos Santos, K. L. Lima, D. Istuque, Performance of cementitious matrices incorporating concrete floor polishing sludge waste, *Construction and Building Materials*, Volume 265, 2020, 120119, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120119>.

- [47] A.N. Junior, R.D. Toledo Filho, J. Dweck, E.M.R. Fairbairn, A study of the carbonation profile of cement pastes by thermogravimetry and its effect on the compressive strength, *J. Therm. Anal. Calorim.* 116 (2014) 69–76, <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3556-7>.
- [48] A. M. de Oliveira, A. P. Oliveira, J. D. Vieira, A. Neves Junior, O. Cascudo, Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques, *Journal of Building Engineering*, Volume 64, 2023, 105616, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105616>.
- [49] G. Baert; S. Hoste; G. De Schutter; N. De Belie (2008). Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry. , 94(2), 485–492. doi:10.1007/s10973-007-8787-z
- [50] B. K. Marsh, R. L. Day, Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Volume 18, Issue 2, 1988, Pages 301-310, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90014-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90014-2).
- [51] H.F. W Taylor, *Cement Chemistry*, 2<sup>a</sup> ed., Thomas Telford Publishing, London, 1997.
- [52] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2016.

## 4 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que é possível utilizar as cinzas CM como material cimentício suplementar, com potencial para a produção de um cimento mais sustentável, as características químicas e microestruturais das cinzas indicaram quantidades de óxidos dentro dos limites estabelecidos em norma, ainda que, em ambas, tenha sido constatada alta perda ao fogo (LOI). No ensaio DRX das cinzas estudadas, embora ambas apresentassem picos de quartzo, apenas a CBCA-CM apresentou halo amorfo na linha de base, coerente com resultados descritos em literatura. Foi observado que a substituição de cinza CM favoreceu a resistência mecânica principalmente em curas longas, característica de material pozolânico e as menores taxas de absorção de água por imersão após 28 dias de cura, foi observada nas amostras com a mesma cinza. As análises TG/DTG e DRX demonstraram que pastas com cinzas apresentam pouca portlandita remanescente (abaixo da pasta controle), o consumo de portlandita pelas cinzas resulta em maior quantidade de produtos de hidratação, e influi na porosidade, resistência mecânica e durabilidade das matrizes cimentícias. As cinzas CM não tratadas apresentaram bons resultados, se forem feitos processos como moedura e peneiramento em peneiras mais finas, os resultados em estado fresco e endurecido podem ser melhorados, ressalta-se que a reutilização das cinzas em 25% de substituição representa medida mitigadora para a redução do gasto de energia, de resíduos e de gases de efeito estufa.