



INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PIAUI



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM
CINZA DA FOLHA DE BAMBU E PÓ DE GRANITO**

JEAN PIERRE CASTRO PINHEIRO DE SOUSA

**Orientadora: Prof(a). Dra. Deuzuita dos Santos Freitas Viana
Co-Orientador: Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida**

TERESINA

2024

JEAN PIERRE CASTRO PINHEIRO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM
CINZA DA FOLHA DE BAMBU E PÓ DE GRANITO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processamento e caracterização de materiais.

Orientadora: Prof(a). Dra. Deuzuita dos Santos Freitas Viana
Co-Orientador: Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida

TERESINA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sousa, Jean Pierre Castro Pinheiro de
S725d Desenvolvimento e caracterização de pastas cimentícias com cinza de folha de bambu e pó de granito / Jean Pierre Castro Pinheiro de Sousa. - 2024.
58 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2024.

Orientadora : Profa Ma. Deuzuita dos Santos Freitas Viana.

1. Cimento. 2. Resíduos do granito. 3. pozolana.. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

JEAN PIERRE CASTRO PINHEIRO DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS COM
CINZA DA FOLHA DE BAMBU E PÓ DE GRANITO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização e Processamento de materiais.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Dra. Deuzuita dos Santos Freitas Viana (Orientadora)
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Prof. Dr. Kelson Silva de Almeida (Avaliador Interno)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

Prof. Dr. José Milton Elias de Matos (Avaliador Externo)
Universidade Federal do Piauí - UFPI

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força que me concede diariamente e pela oportunidade de realizar esse trabalho, colocando pessoas facilitadoras desse processo ao meu redor.

À instituição, por proporcionar os meios necessários para realização desse trabalho.

À minha orientadora, Prof(a). Dra. Deuzuita, pela compreensão e pelo apoio fundamentais ao longo do mestrado.

À minha noiva, Rita, por acreditar em mim, mesmo eu sendo uma pessoa complicada. Sou verdadeiramente grato por me apoiar em cada etapa da pesquisa.

Aos colegas Liduína e Ezequiel pelas grandes contribuições na parte experimental da pesquisa e pelo prazeroso convívio ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, pelo incentivo e contribuições logo no início da pesquisa, pois foram determinantes.

“What is a man? A miserable little pile of secrets?”

André Malraux

RESUMO

A indústria cimentícia enfrenta grandes desafios no que diz respeito a produção mais limpa, necessitando modernizar-se continuamente para atender as demandas energéticas propostas a nível mundial. Nesse sentido, umas das alternativas para corroborar com as demandas sustentáveis está presente na utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS). Esse trabalho teve por objetivo desenvolver pastas cimentícias com cinza da folha de bambu (CFB) e pó de granito (PG). Para isso, foram elaborados ternários de pastas de cimento, utilizando CFB e PG em proporções idênticas, sendo elas 2,5%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os materiais foram caracterizados por meio das técnicas de fluorescência de raios-X (FRX), de difração de raios-X (DRX) e de termogravimetria (TG/DTG), enquanto as pastas cimentícias foram avaliadas quanto à composição química, estabilidade térmica e o índice de atividade pozolânica. Por meio da caracterização, verificou-se a CFB e o PG são materiais amorfo e cristalino respectivamente, silicoaluminosos e apresentam boa estabilidade térmica. Para as pastas cimentícias, as amostras com 2,5% e 5% dos materiais alcançaram 75% de resistência à compressão da amostra em relação ao grupo controle, sendo essas as proporções indicadas como ótimas para a substituição do cimento.

Palavras-chave: cimento; resíduos de granito; pozolana.

ABSTRACT

The cement industry faces great challenges with regard to cleaner production, needing to continuously modernize to meet the energy demands proposed worldwide. In this sense, one of the alternatives to corroborate sustainable demands is the use of supplementary cementitious materials (SCM). The objective of this work is to develop cementitious pastes with bamboo leaf ash (BLA) and granite powder (GP). For this purpose, ternaries of cement pastes were elaborated, using BLA and GP in identical proportions, namely 2.5%, 5%, 10%, 15% and 20%. The materials were characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetry (TG/DTG) techniques, while the cementitious pastes were evaluated for chemical composition, thermal stability and pozzolanic activity index. Through the characterization, it was verified that BLA and GP are amorphous and crystalline materials, respectively, silicoaluminous and present good thermal stability. For cementitious pastes, the samples with 2.5% and 5% of the materials reached 75% compressive strength of the sample in relation to the control group, and these were the proportions indicated as optimal for cement replacement.

Keywords: cement; granite waste; pozzolan.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Influência do fator a/c na resistência à compressão em idades diferentes.	20
Figura 2 – Calor de hidratação versus tempo.	21
Figura 3 – Efeitos da substituição do cimento por material pozolânico.	24
Figura 4 – Teores de alumina e sílica em amostras de PG.	31
Figura 5 – Etapas da pesquisa.	34
Figura 6 – Espécie de bambu utilizada na pesquisa (A) e folhas secas no solo (B).	35
Figura 7 – Trituração das folhas de bambu (A) e aspecto da cinza obtida (B).	35
Figura 8 – Peças defeituosas (A) e ferramentas utilizadas para trituração (B).	36
Figura 9 – Agitador mecânico com hélice tipo âncora (A) e aspecto da mistura obtida (B).	37
Figura 10 – Moldes confeccionados em canos PVC (A) e corpos-de-prova moldados (B).	38
Figura 11 – Aparato desenvolvido para desforma.	39
Figura 12 – Perfil cristalográfico para CFB.	43
Figura 13 – Perfil cristalográfico para PG.	44
Figura 14 – TG e DTG para a amostra P0 aos 28 dias de hidratação.	45
Figura 15 – TG e DTG para as amostras P1, P2, P3, P4 e P5 aos 28 dias de hidratação.	46
Figura 16 – TG e DTG para folha de bambu.	48
Figura 17 – TG e DTG para CFB e PG.	49
Figura 18 – Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo CFB e PG aos 7 dias de hidratação.	50
Figura 19 – Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo CFB e PG aos 28 dias de hidratação.	51
Figura 20 – Resistência à compressão ao longo do tempo e respectivas equações logarítmicas.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista de compostos cálcicos e abreviaturas.	18
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições químicas de cinzas da folha de bambu.....	26
Tabela 2 – Composições químicas de pós de granito.	30
Tabela 3 – Proporções das combinações de cimento, CFB e PG.....	37
Tabela 4 – Composições químicas das pastas cimentícias aos 7 dias de hidratação.	40
Tabela 5 – Composições químicas das pastas cimentícias aos 28 dias de hidratação.	41
Tabela 6 – Composições químicas da CFB e do PG.....	42
Tabela 7 – Perdas de massa das pastas cimentícias aos 7 dias e aos 28 dias de hidratação nos principais estágios em percentual.....	47
Tabela 8 – Média dos valores de resistência à compressão, aumento relativo e índice de atividade pozolânica (IAP) aos 7 e aos 28 dias.....	52
Tabela 9 – Valores de resistência à compressão calculados para 90, 112 e 365 dias e respectivos índices de atividade pozolânica.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Fator água-cimento
A	Alumina
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Alumina ou óxido de alumínio
ASTM	American Society For Testing And Materials
C	Cal
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CFB	Cinza da folha de bambu
CaO	Cal ou óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Portlandita ou hidróxido de cálcio
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-A-H	Aluminato cálcico hidratado
C-A-S-H	Aluminosilicato cálcico hidratado
CH	Portlandita ou hidróxido de cálcio
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
C ₂ S	Belita ou Silicato dicálcico
C ₃ S	Alita ou Silicato tricálcico
C-S-H	Silicato Cálcico Hidratado
DSC	Calorimetria Diferencial Exploratória
DTG	Derivada da curva Termogravimétrica
DRX	Difração de raios-X
F	Ferrita
Fe ₂ O ₃	Ferrita ou óxido de ferro
FRX	Fluorescência de raios-X
H	Água
NBR	Norma Brasileira Registrada
IAP	Índice de atividade pozolânica
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
MCS	Material Cimentício Suplementar

PF	Perda ao fogo
PG	Pó de Granito
S	Sílica
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SiO ₂	Sílica ou óxido de silício
TG	Termogravimetria

LISTA DE SÍMBOLOS

kg Quilograma

% Porcentagem

MPa Megapascal

°C Graus celsius

θ Ângulo de difração

° Grau

' Minuto

” Segundo

mm Milímetros

cm Centímetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	PASTAS CIMENTÍCIAS	17
2.1.1	Cimento	17
2.1.2	Fator água-cimento	19
2.2	MATERIAIS POZOLÂNICOS	22
2.2.1	Reação pozolânica	23
2.3	MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES	25
2.3.1	Cinza da folha de bambu	25
2.3.2	Pó de granito	30
3	METODOLOGIA	34
3.1	OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS	34
3.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	36
3.3	PROPORÇÕES DAS MISTURAS E PREPARO DAS PASTAS	37
3.4	CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	38
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS	39
4	METODOLOGIA	40
4.1	ANÁLISE QUÍMICA (FRX)	40
4.1.1	Pastas cimentícias	40
4.1.2	Cinza da folha de bambu (CFB) e pó de granito (PG)	41

4.2	ANÁLISE MINERALÓGICA (DRX)	43
4.2.1	Cinza da folha de bambu (CFB)	43
4.2.2	Pó de granito (PG)	44
4.3	ANÁLISE TÉRMICA	45
4.3.1	Pastas cimentícias	45
4.3.2	Folha de bambu	48
4.3.3	Cinza da folha de bambu (CFB) e pó de granito (PG)	49
4.4	ANÁLISE MECÂNICA	50
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

A indústria cimentícia representa percentual significativo quando é observada a quantidade de dióxido de carbono emitida por seus processos. Estima-se que em torno de 7% das emissões de CO₂ globais são oriundas desse segmento. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), foram produzidos no Brasil aproximadamente 65,9 milhões de toneladas de cimento em 2021, estimando-se que, para cada tonelada produzida, 564 kg de CO₂ são emitidos (Moraes *et al.*, 2019).

A utilização de materiais alternativos se apresenta como forte aliada para contribuir com os esforços na redução das emissões de dióxido de carbono, pois são opções que podem estar presentes no esquema de fabricação do cimento na forma de queima, adições ou substituições ao clínquer (produto intermediário do cimento) e na forma de substitutos parciais em matrizes cimentícias (Silva *et al.*, 2021).

É possível encontrar cinzas volantes, escórias e filer calcário como substitutos do clínquer, resultando em melhor fator de aproveitamento clínquer/cimento. Materiais orgânicos, resíduos de processos construtivos e resíduos da indústria podem ser utilizados como substitutos no produto final no cimento, sendo denominados como materiais cimentícios suplementares (Kolawole *et al.*, 2021).

A presença desses materiais influencia diretamente na classificação dos cimentos de acordo com a norma brasileira. Como exemplo, o Cimento Portland Tipo II-F possui entre 11 e 25% de material carbonático em sua composição. Os materiais carbonáticos possuem vantagens técnicas e custo relativamente baixo, o que gerou o aumento do limite máximo permitido na composição ao longo das décadas no Brasil (Natalli *et al.*, 2021).

Os materiais cimentícios suplementares apresentam estruturas semelhantes às do cimento, possuindo, em sua composição, óxidos como a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), a ferrita (Fe₂O₃), a cal (CaO) e outros elementos em percentuais menores. São facilmente encontrados na forma de resíduos durante a transformação de minerais e pozolanas. Nesse grupo, é possível encontrar a cinza da folha de bambu (CFB) e o resíduo de corte de granito (RCG) (Rodier *et al.*, 2019).

Por apresentar características compatíveis às de um material pozolânico, a cinza da folha do bambu tem potencial para substituir parcialmente o cimento. Sendo sílico-aluminosa, além de promover efeitos benéficos para o concreto como o aumento da quantidade de produtos hidratados formados, e o efeito microfiller,

aumentando a densificação da matriz e o preenchimento dos poros gerados pela parcela que não reagiu durante a hidratação do cimento (Carvalho; Velasco, 2021).

O resíduo do corte de granito, quando utilizado em proporções adequadas, como adição ou como substituição parcial ao cimento, produz melhorias nas propriedades de pastas, argamassas e concretos. Por sua granulometria, o resíduo é capaz de ativar o efeito microfiller, gerando ganhos de resistência a compressão. Além disso, em seu teor ótimo, produz ganhos na consistência, trabalhabilidade, reduz a absorção de água e diminui a penetração de cloretos (Prokopski; Marchuk; Huts, 2020).

A utilização de materiais alternativos como substitutos parciais do cimento na produção de pastas, argamassas e concretos é objeto de estudo das pesquisas na área de caracterização e processamento de materiais para construção civil. Essa área de estudo permite o aproveitamento de cinzas, dos resíduos da construção civil e da indústria que não possuem destinos adequados. Ao implementá-los como materiais cimentícios suplementares, é possível associar essas pesquisas com as demandas de sustentabilidade atuais e do futuro, pois há a diminuição do consumo energético e da emissão de carbono (Silva *et al.*, 2021).

Mesmo com as características apresentadas em estudos anteriores, a literatura não contempla suficientemente a combinação de mais de um material, tendo poucos estudos a respeito da associação de materiais. Tal lacuna é de interesse científico, pois, na utilização de binários e ternários, é possível gerar efeito sinérgico na matriz cimentícia, ocasionando melhor aproveitamento das propriedades de cada material, além de evidenciar a necessidade de pesquisar para descobrir proporções ótimas e constatar os efeitos sinérgicos (Rodier *et al.*, 2019).

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver pastas cimentícias com cinza da folha de bambu (CFB) e pó de granito (PG) para produzir misturas cimentícias sustentáveis.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver pastas cimentícias com diferentes teores de CFB e PG.
- Caracterizar as pastas cimentícias.
- Caracterizar a CFB e o PG utilizando fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG).

- Avaliar a atividade pozolânica para as pastas produzidas segundo a NBR 12653:2015.
- Comparar por meio da linha de tendência logarítmica o ganho de resistência à compressão ao longo do tempo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PASTAS CIMENTÍCIAS

São misturas de cimento e água com consistências variáveis na presença de aditivos e/ou adições que funcionam como base para argamassas e concretos, estando presentes na realização de ensaios para caracterização e controle de qualidade do concreto. Além disso, considerando a facilidade em manipulá-las, sua utilização permite estudar as características e propriedades no estado fresco e endurecido (Mehta; Monteiro, 2014).

Considerando a composição de uma pasta cimentícia como cimento e água fundamentalmente, misturas que contenham fator água-cimento (a/c) entre 0,3 e 0,6 apresentam determinada consistência e podem ser denominadas de pastas frescas de modo que gradativamente perde a plasticidade e adquire rigidez. Com o avanço da hidratação do cimento, se transformam em pastas endurecidas com resistência à compressão minimamente quantificável (Hewlett; Liska, 2019).

2.1.1 Cimento

O cimento é definido como o produto final obtido a partir da extração de matéria-prima em pedreiras, beneficiamento e transformação química (clinkerização), seguida de moagem. Esse processo se inicia com a obtenção de material cálcico, como calcário, para trituração, preparo e homogeneização antes da calcinação. Elevando-se à temperatura de aproximadamente 1400° C, se produz o clínquer (componente intermediário na produção do cimento). Após sua obtenção, o material é resfriado até a temperatura de 100° C para que seja misturado com cal e moído até a formação do cimento Portland (Neville; Brooks, 2010).

As etapas associadas ao aquecimento e a queima da matéria-prima realizam maior emissão de dióxido de carbono, pois, na queima de combustíveis, são emitidos até 40% de CO₂ e, na transformação química do calcário, são emitidos entre 60 e 70% do processo. Em menores percentuais, estão presentes emissões associadas ao consumo de energia elétrica da fábrica e emissões indiretas (IEAGHG, 2013; IEA/WBCSD, 2018).

O cimento possui em sua composição química elementos como alumínio (Al), cálcio (Ca), ferro (Fe), oxigênio (O) e silício (Si) de forma significativa, além de outros. Tais elementos são apresentados na forma de compostos cálcicos e, convenientemente, representados por abreviações na literatura (Quadro 1). Os

estudos acerca de sua composição são representados em função dos óxidos presentes na composição de modo que os percentuais dos compostos cálcicos são determinados pelo conjunto de Equações de Bogue (Mehta; Monteiro, 2014).

Quadro 1 – Lista de compostos cálcicos e abreviaturas.

Óxido	Abreviação	Composto	Nomenclatura	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	C_3S
SiO₂	S	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	C_2S
Al₂O₃	A	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	C_3A
Fe₂O₃	F	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico	C_4AF

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

O silicato tricálcico ou alita (Ca_3SiO_5 ou C_3S) é o constituinte mais importante do cimento Portland comum e representa entre 50 e 70% de sua composição, possuindo a capacidade de reagir rapidamente com água, formando o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), também chamado de portlandita, e o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), além de ser responsável por desenvolver a resistência à compressão do concreto produzido até os 28 dias de idade (Taylor, 1997).

O silicato dicálcico ou belita (Ca_2SiO_4 ou C_2S) está presente em percentual entre 15 e 30%, reagindo lentamente com água e, por consequência, gerando menores contribuições de resistência à compressão em idades iniciais. Porém, após a idade de 28 dias, sua contribuição passa a ser mais significativa ao passo que, comparando as contribuições de resistência geradas pelo C_3S e pelo C_2S ao final de um ano, são observados valores próximos, destacando a importância dos silicatos cálcicos no desenvolvimento da resistência à compressão em idades iniciais e avançadas (Neville; Brooks, 2010).

Apesar do pequeno teor na composição do cimento, entre 6 e 12%, o aluminato tricálcico (C_3A) tem presença desvantajosa para o cimento Portland, pois sua reação com a água acontece de forma imediata, fazendo com que a pega do cimento ocorra mais rapidamente. Esse efeito é combatido com a adição de gesso após o resfriamento do clínquer. A ferrita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) está associada à resistência química do concreto produzido, além da coloração por apresentar ferro em sua composição (Mehta; Monteiro, 2014).

Assim como o C_3A , o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) apresenta reação intensa na idade inicial da hidratação, mas que rapidamente se retarda, embora

continue ao longo do tempo. O C_4AF não possui influência significativa no que concerne ao desenvolvimento da resistência à compressão, mas é responsável pela coloração acinzentada do cimento. Em teores mais elevados, o aspecto visual do cimento é influenciado e se torna mais escuro. O percentual desse composto em cimentos típicos varia entre 8 e 12% (Hewlett; Liska, 2019).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 16697, apresenta designação para o cimento Portland fabricado no Brasil, dividindo-os conforme tipo, subtipo, sigla e classe de resistência. Ao todo, a norma designa seis tipos de cimentos que podem ser separados em cimentos com adição ou sem adição, com diferentes resistências (25, 32 e 40 MPa). Quanto aos tipos, a norma divide os cimentos em: comum (CP I), composto (CP II), de alto forno (CP III), pozolânico (CP IV), de alta resistência inicial (CP V) e branco (CPB).

A NBR 16697 não apresenta as proporções dos compostos cálcicos presentes em cada designação, mas informa os limites da composição em função do clínquer, sulfatos cálcicos e adições (escória granulada de alto-forno, material pozolânico e material carbonático), além de listar os requisitos químicos, físicos e mecânicos que devem apresentar.

Apesar dessa característica, não há como dissociar a relação entre os percentuais dos compostos cálcicos e as designações presentes nas normas, especialmente quando se acompanha o aperfeiçoamento dos cimentos produzidos no Brasil. É possível visualizar que houve uma crescente busca para o aumento do teor de C_3S nos cimentos e a redução do teor de C_3A , gerando cimentos capazes de alcançar resistências mais elevadas em idades iniciais e diminuir o calor de hidratação, características presentes nos cimentos tipo V e tipo IV respectivamente (Natalli *et al.*, 2021).

2.1.2 Fator água-cimento

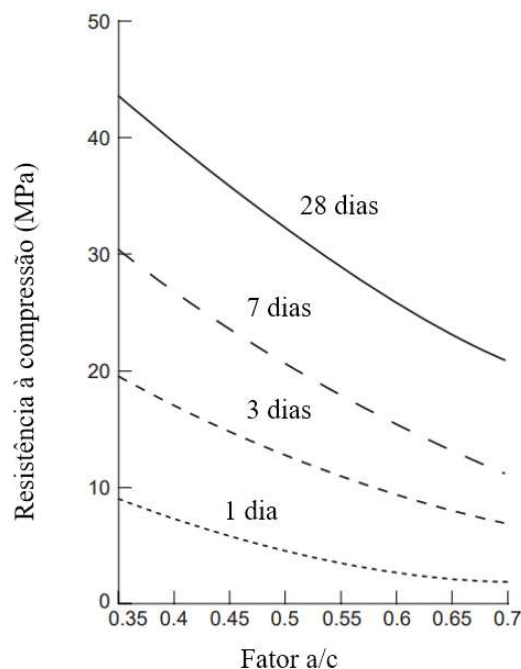
A água desempenha papel fundamental na mistura de pastas cimentícias, pois é responsável por dar início e potencializar diversas das reações e etapas presentes durante a hidratação das fases anidras do cimento Portland. Por isso, o controle de qualidade é importante, devendo-se levar em consideração o grau de acidez e, usualmente, qualquer água com pH entre 6 e 8 é tida como aceitável. É necessário atenção com a presença de ácidos húmicos e orgânicos, além da

presença de álcalis, pois ambos podem afetar negativamente o ganho de resistência da pasta cimentícia (Neville; Brooks, 2010).

A presença de água em misturas cimentícias pode ser quantificada a partir de um parâmetro denominado “fator água-cimento (a/c)” que mede a quantidade de água proporcionalmente à quantidade de cimento. O parâmetro influencia diretamente nas propriedades obtidas pela mistura em seu estado fresco, como a trabalhabilidade e a consistência, e em seu estado endurecido, como a resistência, a porosidade e a permeabilidade (Winter, 2012).

Como a resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes das misturas cimentícias, sendo critério de aceitação em alguns casos, o fator a/c possui papel de destaque, ao ser aumentado a resistência à compressão tende a diminuir, sendo variáveis inversamente proporcionais (Figura 1). Essa relação é uma consequência natural do enfraquecimento progressivo da matriz em virtude do aumento da porosidade na matriz (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 1 – Influência do fator a/c na resistência à compressão em idades diferentes.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

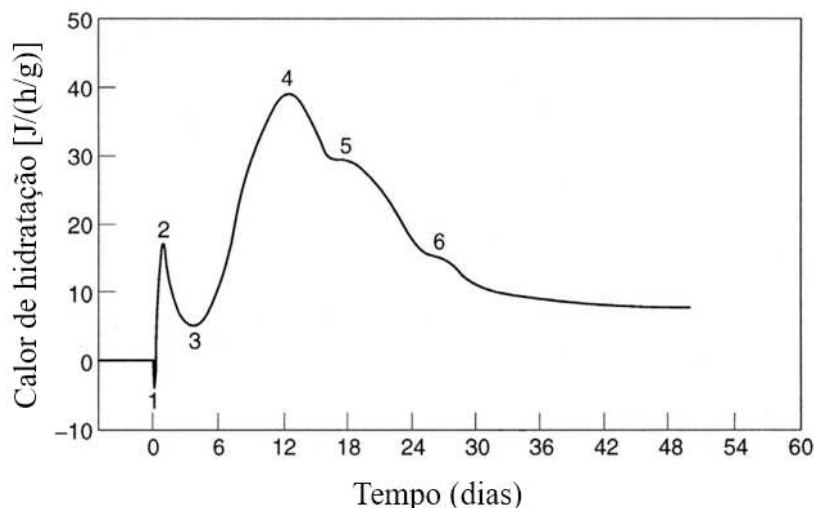
A hidratação do cimento é um processo exotérmico que ocorre na presença de cimento e água, sendo responsável por formar os produtos que conferem as propriedades mecânicas e durabilidade. Os reagentes dessa reação incluem,

principalmente, as fases do cimento anidro (C_2S , C_3S , C_3A e C_4AF), sulfatos, cal livre e água, enquanto os produtos principais são os compostos hidratados (C-S-H), etringita ($C_6AS_3H_{32}$), monossulfatos (C_4ASH_{12}) e hidróxido de cálcio (CH) (Taylor, 1997).

Levando em consideração a presença de diversos constituintes na hidratação, é possível afirmar que o processo consiste na reação simultânea das fases anidras do cimento com água, embora não ocorram ao mesmo tempo em virtude da reatividade dos componentes, pois o C_3A é mais reativo que o C_3S e o C_2S e, mesmo entre os silicatos. Também é observado que há diferença na velocidade de reação entre os constituintes de modo que o C_3S hidrata mais rapidamente que o C_2S , mas produzem C-S-H semelhantes, promovendo ganhos de resistência em idades diferentes (Natalli *et al.*, 2021).

As diferenças na hidratação dos constituintes podem ser apresentadas graficamente por meio da associação entre o calor de hidratação durante o processo e o tempo da hidratação (Figura 2). No gráfico, estão representados: 1 – dissolução de potássio; 2 – hidratação dos aluminatos; 3 – período dormente; 4 – hidratação dos silicatos; 5 – formação da etringita; 6 – conversão de etringita em monossulfatos de alumínio (Neville; Brooks, 2010).

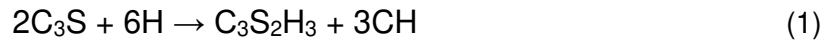
Figura 2 – Calor de hidratação versus tempo.



Fonte: Hewlett; Liska (2019).

Os produtos hidratados de destaque são os silicatos cálcico hidratados (C-S-

H), em especial o C_3S e C_2S . A alita produz quantidades maiores de hidróxido de cálcio durante a hidratação em relação à belita em virtude da relação Ca:Si, sendo essa 3:1 e 2:1 respectivamente. Essa relação resultará no excesso de cálcio durante a hidratação, o que contribui para a formação de hidróxido de cálcio a partir do óxido de cálcio como é evidenciado nas Equações 1 (hidratação da alita) e 2 (hidratação da belita) (Winter, 2012).



O hidróxido de cálcio ou Portlandita (CH) é um produto que está presente na hidratação das fases anidras do cimento que, em excesso, pode ser deletério para matriz cimentícia por ser suscetível à lixiviação, afetando a permeabilidade da matriz e causando problemas de durabilidade. Na presença de pozolanas ou materiais cimentícios suplementares, o teor de CH pode ser reduzido e as propriedades da matriz melhoradas (Natali *et al.*, 2021).

2.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

Pozolana se refere à materiais silicosos ou silico-aluminosos que reagem com o hidróxido de cálcio, promovendo o endurecimento da pasta quando misturadas com cal ou com cimento Portland em meio aquoso, além de conferir outras propriedades, sendo classificadas como naturais ou artificiais. O grupo dos naturais compreende os materiais que são obtidos na natureza e passam por moagem para obtenção da granulometria adequada, enquanto o grupo das artificiais passam por tratamento químico, modificações estruturais e moagem quando necessárias (Hewlett; Liska, 2019).

O termo utilizado para designar esse grupo de materiais está diretamente ligado com a reação química que desempenham quando presentes em uma matriz cimentícia, a chamada reação pozolânica. Essa ocorre quando o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento reage com os óxidos presentes na composição das pozolanas e que faz com que a quantidade de compostos cálcicos hidratados formados seja maior, melhorando as propriedades mecânicas da matriz, bem como sua durabilidade (Kolawole *et al.*, 2021).

As melhorias produzidas nas matrizes cimentícias na presença de pozolanas

se devem ao efeito microfiller e ao efeito de nucleação. O primeiro se relaciona com a granulometria e a quantidade de material utilizado na mistura, promovendo a diminuição da porosidade e conferindo maior coesão ao produto gerado. A nucleação também possui estrita relação com a granulometria e teor do material utilizado, mas possui influência na intensidade das reações durante a hidratação, permitindo maior formação de compostos na hidratação, pois aumenta a superfície de contato disponível (Moraes *et al.*, 2019).

Outro fator a ser considerado ao estudar a atividade pozolânica dos materiais se encontra na amorficidade, especialmente da sílica, pois é a responsável por dar origem aos compostos que mais influenciam nas propriedades mecânicas das matrizes cimentícias. É comum encontrar em pesquisas a análise da amorficidade dos materiais, pois, a depender dessa característica, o material pode ter maior reatividade pozolânica e produzir efeitos mais significativos quando comparado com material mais cristalino. Cabe salientar que a granulometria também desempenha esse papel por meio do efeito filler, porém de forma secundária (Kolawole *et al.*, 2021; Moraes *et al.*, 2019).

2.2.1 Reação pozolânica

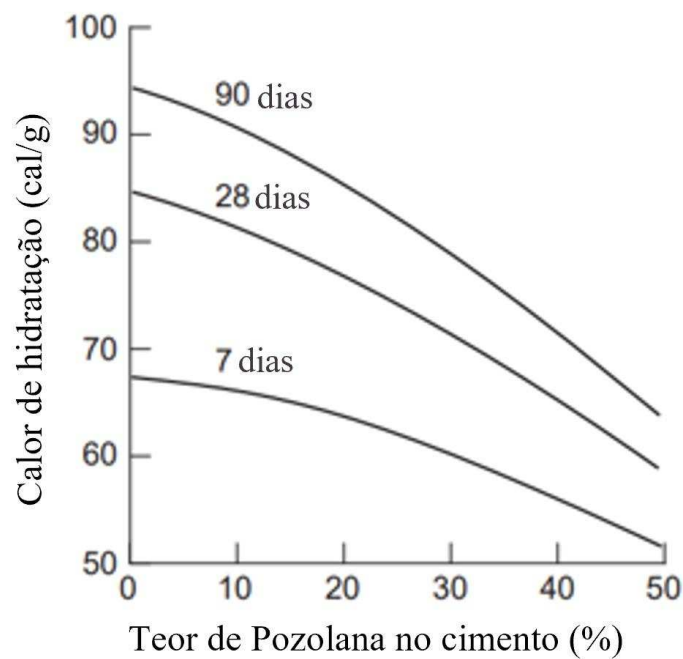
É definida como um processo químico no qual os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio ou portlandita disponíveis na matriz cimentícia que foram gerados durante a hidratação do cimento. Essa reação produz compostos cálcicos hidratados adicionais, promovendo melhorias nas propriedades da matriz e seu progresso, geralmente, é observado em termos da fixação da cal livre do sistema (Hewlett; Liska, 2019).

Quando comparada à reação de hidratação do cimento, a reação pozolânica (equação 3) se diferencia ao envolver os constituintes de interesse da pozolana (sílica e alumina), água e cal livre no sistema, enquanto a reação de hidratação (equação 4) envolve somente as fases do cimento anidro e água. Além disso, se caracteriza por ser mais lenta e produzir menor quantidade de calor (Taylor, 1997).



A reação pozolânica se diferencia em relação à reação de hidratação do cimento ao se comparar a velocidade da reação, pois a primeira é mais lenta em relação à segunda, reduzindo o risco de fissuração térmica, retração e permeabilidade das pastas cimentícias de modo que se observa correlação entre o aumento do percentual de material pozolânico e a diminuição do calor de hidratação (Figura 3) (Neville; Brooks, 2010).

Figura 3 – Efeitos da substituição do cimento por material pozolânico.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Em relação ao consumo de hidróxido de cálcio, ao contrário do que acontece na hidratação, a reação pozolânica não produz hidróxido de cálcio, fazendo com que a durabilidade seja positivamente influenciada devido a reatividade do hidróxido de cálcio em ambientes agressivos, o que pode ocasionar a corrosão de armaduras, a desagregação da mistura e potencializando a reação álcali-agregado (Mehta; Monteiro, 2014).

Devido aos efeitos físicos presentes na reação pozolânica, considera-se que a reação é eficiente no preenchimento de vazios por meio do refinamento do tamanho de grão e do refinamento do tamanho de poro, produzindo um material com menor possibilidade de fissuração e aumentando a sua impermeabilidade. Os efeitos dessa particularidade podem ser visualizados como resultados do ensaio de

porosimetria por intrusão de mercúrio em pastas cimentícias (Winter, 2012).

A aferição da atividade pozolânica é uma tarefa complexa, podendo ser analisada diretamente por métodos que buscam avaliar a reatividade química do material estudado, indicando a quantidade de hidróxido de cálcio consumida durante a reação com o material pozolânico. Os métodos indiretos avaliam a atividade por meio da análise de outras propriedades que as argamassas e os concretos apresentam, como a resistência a compressão, durabilidade, retração e demais propriedades (Hoppe Filho *et al.*, 2017a).

A atividade pozolânica é influenciada por proporção da portlandita/material pozolânico, pH, amorficidade e composição da fase amorfa. No Brasil, as normas NBR 5751, NBR 15895 e NBR 5752 (com cimento) embasam os métodos diretos e os indiretos para avaliar a atividade pozolânica as quais fundamentam a avaliação na resistência à compressão de uma argamassa pozolânica ou na fixação de cal em um tempo definido (Hoppe Filho *et al.*, 2017b).

2.3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

2.3.1 Cinza da folha de bambu

O bambu (*Bambusa Vulgaris*) é uma planta conhecida por seu crescimento rápido, facilidade de cultivo e característica renovável, sendo amplamente utilizada em várias indústrias. No entanto, suas plantações geram grandes quantidades de folhas secas que acabam se deteriorando e apodrecendo, sem um destino ou aproveitamento adequado. Uma forma de aproveitá-las é transformando-as em cinzas para uso como material cimentício suplementar, através do processo de calcinação das folhas em temperaturas acima de 500°C (Silva *et al.*, 2021).

Uma vez calcinada, a cinza obtida se comporta como material pozolânico e tem caráter amorfo. O material apresenta em sua composição óxidos que são de interesse da hidratação do cimento e potencializam a reação pozolânica quando presentes na mistura cimentícia em teores adequados. De modo simplificado, pode ser apresentado como material sílico-aluminoso, com a presença de outros óxidos que intensificam a pozolanicidade (Tabela 1) com estudos recentes (Rodier *et al.*, 2019).

Tabela 1 – Composições químicas de cinzas da folha de bambu.

Referência	Componentes (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO
Moraes <i>et al.</i> (2019)	74,23	2,27	2,34	2,30	1,46	2,11	0,84	1,02	0,46	0,15
Rodier <i>et al.</i> (2019)	70,50	0,63	0,47	7,86	1,84	5,14	2,87	1,67	0,06	0,35
Kolawole <i>et al.</i> (2021)	72,97	2,85	2,31	4,98	1,23	6,07	0,55	2,37	0,41	0,41
Silva <i>et al.</i> (2021)	83,56	2,56	2,63	3,71	1,64	2,38	0,95	1,15	0,52	0,17
Silva <i>et al.</i> (2023b)	82,56	-	0,72	5,97	3,26	3,88	2,42	0,78	0,11	-

Fonte: Moraes *et al.* (2019), Rodier *et al.* (2019), Kolawole *et al.* (2021), Silva *et al.* (2021) e Silva *et al.* (2023b).

As variações nos percentuais estão associadas com a espécie, origem, maturidade e tipo de solo no qual o bambu foi cultivado. Visualiza-se que há predominância de sílica na composição química da cinza da folha do bambu. Durante a hidratação do cimento, essa predominância promove a geração de compostos cálcicos hidratados adicionais, fazendo com que a resistência à compressão do concreto produzido seja aumentada com o acréscimo da quantidade de C₃S hidratados formados a partir do aumento do teor de sílica e da consequente reação com a portlandita (Silva *et al.*, 2021).

A temperatura de queima e o tempo de queima são determinantes na atividade pozolânica da cinza da folha de bambu, de modo que a temperatura de 600°C e o tempo de queima de 2 horas é tido como ideal, pois temperaturas abaixo dessa produzem cinzas com maior perda ao fogo e temperaturas acima provocam a recristalização da fase amorfa da sílica, reduzindo a atividade pozolânica da cinza obtida (Silva *et al.*, 2023a).

O percentual de sílica (Tabela 1) apresentado por cinza da folha de bambu (CFB) é mais representativo que os demais constituintes. Esse fato é explicado devido ao acúmulo de sílica ao longo do ciclo de vida das folhas de bambu, pois é

uma característica importante para as plantas uma vez que sua presença traz diversos benefícios como estabilidade de tecidos, proteção contra fungos, combate a deficiência de nutrientes e outros (Carvalho; Velasco, 2021).

Ao calcinar as folhas de bambu, as cinzas obtidas apresentam sílica em sua composição em percentuais elevados próximos de 70%, fazendo com que a utilização das folhas de bambu na produção de cinzas seja de interesse, pois ao se utilizar um material cimentício suplementar (MCS) com teor de sílica mais elevado em uma mistura cimentícia, observa-se que a resistência à compressão é positivamente influenciada, evidenciando a possibilidade de uso da CFB como MCS (Kolawole *et al.*, 2021).

A perda ao fogo que a CFB apresenta deve ser analisada, pois é possível indicar ou evidenciar a presença de matéria orgânica, componentes voláteis e o nível de contaminação da amostra. Para Rodier *et al.* (2019), valores abaixo de 10% para perda ao fogo são tidos como aceitáveis, sendo possível associá-lo aos materiais pozolânicos tipo N apresentados na NBR 12653 que indica o valor máximo de 10% para essa classificação.

Componentes como CaO , K_2O e SO_3 podem ser vistos como contaminantes uma vez que sua presença pode afetar negativamente a durabilidade da mistura cimentícia em virtude da possível reação álcali-agregado. Alguns desses componentes podem ter seu percentual reduzido ao elevar-se a temperatura de calcinação das folhas de bambu, como é o caso do constituinte potássio (K) que reduz seu percentual na presença de maiores quantidades de calor (Carvalho; Velasco, 2021).

A influência da CFB em matrizes cimentícias pode ser analisada por meio do estudo da atividade pozolânica do material. Essa característica pode ser analisada diretamente por meio da aferição de consumo de Ca(OH)_2 através de métodos químicos (ensaio de Chapelle e teste de Fratini), ou indiretamente quando são analisados outros parâmetros (resistência à compressão, condutividade elétrica e determinação do pH, por exemplo). Apesar dos métodos diferentes dificultarem a comparação dos dados, os resultados dessa análise convergem para a alta reatividade da CFB (Silva *et al.*, 2023a).

A atividade pozolânica é uma característica fundamental para a CFB, pois promove melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade da matriz cimentícia. Por meio dela, é observada a produção de produtos hidratados

adicionais que preenchem os vazios, reduzindo o percentual de poros na ordem de 10 nm a 1 µm relacionados à capilaridade, o que resulta em maior compacidade e menor permeabilidade. Nessas condições, a matriz cimentícia hidratada que contém CFB em sua composição se torna mais resistente à penetração de agentes agressivos, tornando-se mais durável (Moraes *et al.*, 2019).

A resistência à compressão em concretos que possuem materiais pozolânicos em suas composições está associada a presença de sílica no material pozolânico. Por possuir elevado teor de sílica (a partir de 70%), a CFB é capaz de influenciar positivamente à resistência a compressão quando utilizada como MCS, pois a sílica presente é predominantemente amorfa e, por consequência, mais reativo. Essa é uma característica que deve ser observada com atenção em virtude da velocidade da reação pozolânica ser mais lenta o que torna os ganhos de resistência menos evidentes em idades iniciais da hidratação (Batista *et al.*, 2023).

A cinza da folha de bambu é um material versátil, pois permite a combinação com outros materiais pozolânicos, possibilitando a obtenção de uma matriz cimentícia com maior variedade de produtos hidratados. Isso pode ser evidenciado ao se analisar combinações que apresentem maior teor de alumina por ocorrer a formação de alumino silicato cálcicos hidratados (C-A-S-H) e aluminatos cálcico hidratados (C-A-H) que são inseridos nos poros da cadeia dos compostos cálcicos hidratados que contribuem na redução da porosidade e na densificação da cadeia (Kolawole *et al.*, 2021).

A partir da formação de compostos hidratados adicionais, a resistência à compressão da matriz cimentícia é influenciada positivamente na medida que ocorre a substituição do cimento pela CFB, porém, como esperado, até certo limite percentual. Também se observa que a substituição do cimento por CFB reduz a resistência obtida nas idades iniciais (3 dias e 7 dias, por exemplo). Esse fenômeno ocorre em virtude do efeito da diluição, pois se influencia a relação a/c na medida em que se eleva o percentual de MCS, além da velocidade da reação pozolânica provocar ganhos de resistência à compressão perceptíveis em idades avançadas (Rodier *et al.*, 2019).

Outro benefício encontrado na utilização de CFB como MCS se encontra na redução do consumo energético e de custos das misturas produzidas, pois proporcionalmente ao % de substituição do cimento, se reduz a quantidade de CO₂ emitido, energia incorporada nas etapas de produção, processamento e transporte,

assim como os custos associados aos constituintes do concreto. Comparativamente, o a energia necessária para produção de cimento é de 112 kWh/t, enquanto a CFB pode ter seu consumo energético nulo devido a possibilidade de obtenção por meio da autocombustão (Silva *et al.*, 2023a).

Ao se estudar a mineralogia da CFB, verifica-se a existência de um halo amorfo no intervalo de, aproximadamente, 15° a 40° em 2 θ , sendo essa uma característica que dá indícios da amorficidade da CFB. No perfil cristalográfico, são evidenciados alguns picos cristalinos de quartzo, resultado que está em consonância com o alto percentual de sílica obtido ao se estudar a composição química desse material (Silva *et al.*, 2023b).

A presença de quartzo no difratograma é característico de cinzas, assim como a existência do halo amorfo nos ângulos iniciais. A diminuição da temperatura de calcinação das folhas de bambu influencia diretamente na intensidade dos picos cristalinos observados na análise e, mais notoriamente, na intensidade do halo amorfo, sendo que, em temperaturas mais baixas, o halo é mais intenso. Essa característica é importante na medida em que os trabalhos adotam a temperatura de 600°C para produção das cinzas, pois é suficiente para retirar os constituintes inadequados da composição que não reagiriam com os produtos da hidratação do cimento e adequada para obtenção de cinzas predominantemente amorfas (Mendonça *et al.*, 2023),

O difratograma da cinza da folha de bambu pode apresentar um desvio característico em sua linha de base quando comparada às cartas cristalográficas de quartzo, próximo do intervalo de 15° a 35° em 2 θ , caracterizando esse material como predominantemente amorfo. Os traços de quartzo nas análises mineralógicas da cinza da folha de bambu estão associados ao acúmulo de sílica ao longo da vida pelas folhas de bambu e possíveis contaminação da amostra analisada, caso tenham sido coletadas no solo (Moraes *et al.*, 2019).

Com incidência mais baixa, outras fases podem ser identificadas na análise, como: cristobalita (SiO₂ cristalina), calcita (CaCO₃) e sulfato de cálcio (CaSO₄). Apesar disso, é a composição dos óxidos amorfos que influenciam na atividade pozolânica da CFB, principalmente a sílica amorfa, pois é o óxido que apresenta maior presença na composição química do material e é responsável por reagir com o hidróxido de cálcio remanescente da hidratação do cimento Portland (Kolawole *et al.*, 2021).

2.3.2 Pó de granito

O pó de granito (PG) é um resíduo obtido em pedreiras a partir da transformação por meio da manufatura na produção de rochas ornamentais, estando presente em todas as etapas do processo (extração, serragem, polimento e recorte). Sua geração produz impactos negativos para o meio ambiente, pois é capaz de poluir o ar e a água com facilidade por não possuir descarte ou reaproveitamento adequado (Mashalyy; Shalaby; Rashwan, 2018).

O não aproveitamento do PG se relaciona ao solo e aos seres humanos, pois o PG é capaz de alterar o pH do solo, provocar câncer de pulmão e pneumoconiose. Assim, o PG tem despertado o interesse de pesquisas nas últimas duas décadas, visando seu reaproveitamento na indústria da construção e uma das oportunidades está na sua utilização em compósitos cimentícios, alternativa que é justificada por sua composição química (Tabela 2) pela capacidade de nucleação em matrizes cimentícias (Chajec, 2023).

Tabela 2 – Composições químicas de pós de granito.

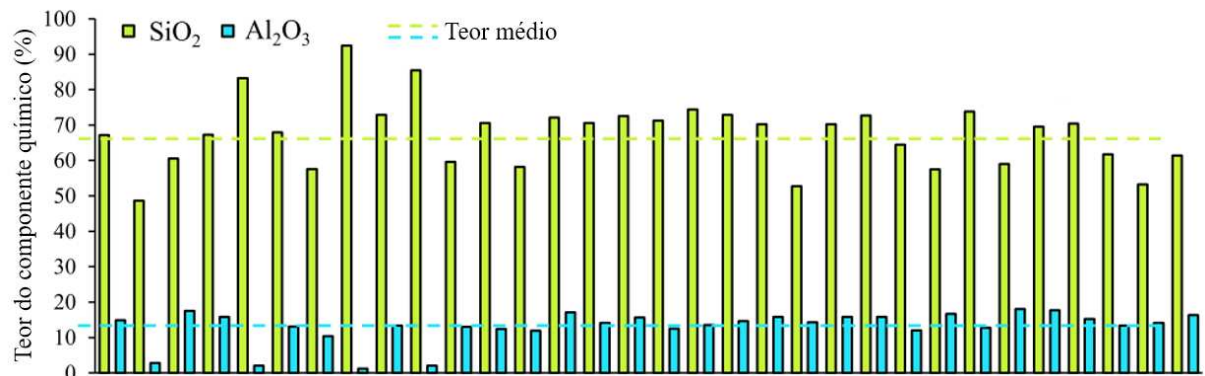
Referência	Componentes (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	Na ₂ O
Mashalyy; Shalaby; Rashwan, (2018)	58,17	11,96	13,35	3,27	0,36	3,84	0,39	0,410	0,370	4,69
Shamsabadi <i>et al.</i> (2018)	72,90	14,65	1,70	1,50	0,37	3,98	0	0,088	0,235	3,85
Ghorbani <i>et al.</i> (2019)	70,20	15,80	1,90	3,70	0,60	3,70	0,60	-	-	2,10
Rashwan <i>et al.</i> (2020)	70,57	12,47	6,09	1,48	0,27	4,12	0,12	-	-	4,21

Fonte: Mashalyy; Shalaby; Rashwan, (2018); Shamsabadi *et al.* (2018); Ghorbani *et al.* (2019) e Rashwan *et al.* (2020).

Por apresentar elevado teor de sílica em sua composição química, como pode ser observado no levamento realizado por Chajec (2023) (Figura 4), o PG possui características pozolânicas que podem reagir com o hidróxido de cálcio durante a

hidratação do cimento, promovendo a formação de compostos adicionais, melhorando a resistência e a durabilidade do concreto. No entanto, ao se utilizar o PG em substituição parcial ao cimento, observa-se que a trabalhabilidade é afetada de modo que quanto maior o percentual de substituição, maior a perda de trabalhabilidade da mistura. Essa consequência pode ser mitigada por meio do uso de superplastificantes (Shamsabadi *et al.*, 2018).

Figura 4 – Teores de alumina e sílica em amostras de PG.



Fonte: Chajec (2023).

As potencialidades do pó de granito em misturas com cimento Portland de diferentes formas: em substituição parcial ao cimento em pastas, argamassas e concretos. Para o caso em que o PG é utilizado em substituição ao cimento, é possível reduzir a quantidade de cimento necessária na mistura, diminuindo assim o impacto ambiental associado à produção de cimento. (Prokopski; Marchuk; Huts, 2020).

Para que essas potencialidades sejam aproveitadas, é necessário que o percentual de substituição do cimento por PG seja estudado cuidadosamente, pois os efeitos associados à percentuais superiores a 20% diminuem a resistência à compressão, enquanto o percentual de 10% é observado como teor ótimo ao apresentar a manutenção e/ou aumento da resistência dependendo das condições de cura utilizadas, bem como a realização de ataque químico (Ghorbani *et al.*, 2019).

Mashallyy, Shalaby e Rashwan (2018) estudaram os efeitos do uso do PG como MCS em argamassas e concretos. Os autores observaram que a presença do PG em teores mais baixos (10 e 20% na pesquisa) na matriz cimentícia provoca o preenchimento de quantidades significativas de vazios com frações suficientemente

finas de PG que densificam e compactam a matriz, além do efeito provocado pelo empacotamento de grãos. Essas alterações nas propriedades resultam em valores semelhantes para resistência à compressão nos percentuais indicados, porém ao se ultrapassar esse intervalo, observa-se o declínio nos valores, pois há redução na quantidade de cimento da mistura e aumento na quantidade de água demandada para manter a trabalhabilidade.

Rashwan *et al.*, (2020) constatou que, ao se utilizar PG em substituição parcial ao cimento em teores de 10, 20, 30 e 40%, obtêm-se melhorias nas propriedades de pasta e de concreto. É possível reduzir a profundidade de penetração da água e elevar a resistência química da mistura em todos os níveis de substituição. Além disso, em relação às outras propriedades (absorção de água, densidade e resistência), observou-se uma diminuição irrisória nos valores até o nível de 20% de substituição, sendo esse o teor de substituição recomendado pelos autores.

Ghorbani *et al.*, (2019) estudou o comportamento mecânico e a durabilidade do concreto utilizando o PG como substituto parcial do cimento. Foi observado que o pó de granito pode ser um MCS eficiente na melhoria da resistência ao ataque químico, pois a presença de PG como MCS reduz a quantidade de poros no concreto e a porosidade, observando-se correlação positiva entre o aumento do teor de PG e a diminuição da perda de massa no ataque químico com H_2SO_4 . Essa correlação foi observada em todos os teores de substituição estudados (5, 10 e 20%) de modo que a substituição no teor de 20% apresentou o melhor resultado para essa característica.

Outra opção que é bastante utilizada na incorporação de resíduos da reciclados encontra-se na produção de blocos de concreto em razão dos requisitos de qualidade serem mais baixos. Em blocos de concreto, o resíduo de corte de granito é capaz de substituir o cimento sem provocar diminuição nas suas propriedades em limites de até 10%, apesar de sua presença dificultar a compactação dos blocos (Santos *et al.*, 2021).

Do ponto de vista mineralógico, o pó de granito apresenta em sua composição os minerais quartzo (SiO_2), feldspato sódico ou albita ($NaAlSi_3O_8$) e anortita ($CaAl_2Si_2O_8$) como principais componentes. Com menor destaque, outros componentes podem ser detectados, como: feldspato potássico ou ortoclase ($KAlSi_3O_8$), actinolita ($Ca_2(Mg/Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$), muscovita ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$) e

caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). Ressalta-se que a identificação das fases apresentadas deve ser complementares com os demais ensaios realizados com a amostra, como a fluorescência de raios-X (Mashally; Shalaby; Rashwan, 2018).

Outras fases características que podem ser evidenciadas no estudo da mineralogia do PG estão associadas à presença de Fe_2O_3 , pois é potencial que exista um percentual representativo na composição química. No entanto, em virtude da baixa cristalinidade de alguns dos compostos associados ao óxido de ferro (III) ou hematita, esses não apresentam picos cristalinos detectáveis na análise (Rashwan *et al.*, 2020).

No difratograma, é perceptível sinais de contaminação da amostra estudada quando se verifica a presença de picos característicos de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e carbonato de cálcio (CaCO_3). Nas indústrias que realizam o beneficiamento de peças de granito, comumente há o processamento de outros tipos de pedras, como o mármore, o que provoca a presença de pequenas quantidades de resíduo de mármore, sendo representados na análise mineralógica pelo CaCO_3 (Li *et al.*, 2019).

3 METODOLOGIA

As etapas que compreendem a sequência definida para essa pesquisa podem ser observadas na figura 5 que compreende desde a obtenção dos materiais até a caracterização das pastas.

Figura 5 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

3.1 OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS

As folhas de bambu utilizadas para produção das cinzas foram coletadas em um bambuzal nas proximidades da cidade de Teresina-PI com coordenadas geográficas a latitude de 4°54'26" sul e a longitude de 42°44'32" oeste. No referido bambuzal, procedeu-se com a coleta das folhas secas que estavam no chão (Figura 6) de modo que as folhas foram separadas manualmente do material que não eram folhas e, portanto, indesejado durante a queima.

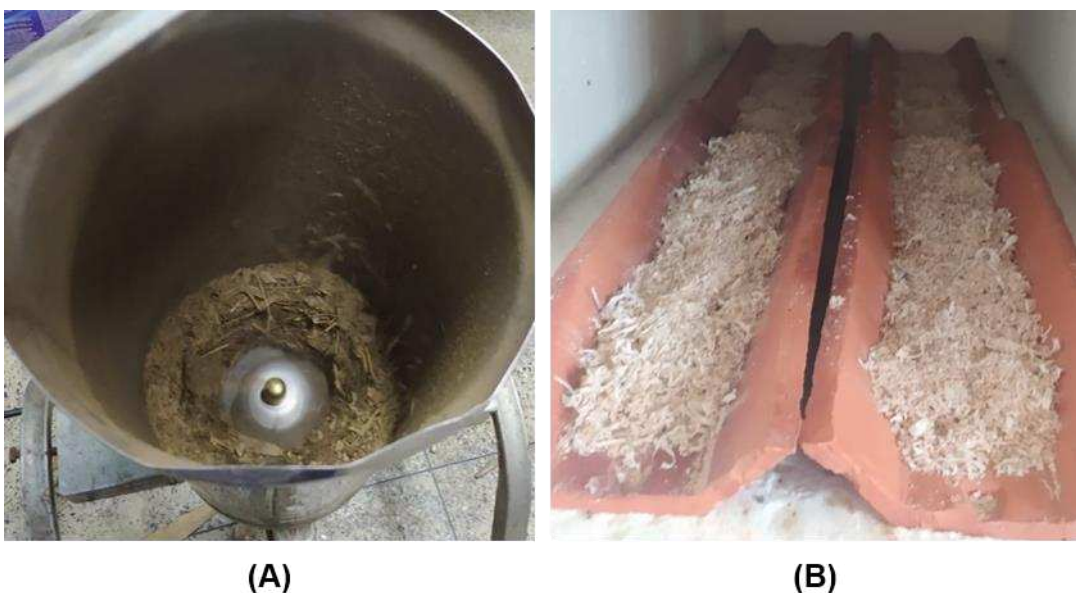
Figura 6 – Espécie de bambu utilizada na pesquisa (A) e folhas secas no solo (B).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

As folhas de bambu passaram por trituração mecânica para facilitar a queima no forno (Figura 7A). Para obtenção das cinzas, as folhas foram queimadas na temperatura de 600° C por duas horas com rampa de aquecimento de 20° C por minuto. O produto obtido (Figura 7B), foi reduzido a pó com uso de pistilo e cadinho com o objetivo de obter maior uniformidade das cinzas e, posteriormente, foram peneiradas na peneira de número 100 (0,149 mm) para remover a porção do material com maior granulometria e a porção do material que não queimou suficientemente.

Figura 7 – Trituração das folhas de bambu (A) e aspecto da cinza obtida (B).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

O pó de granito (Figura 8A) foi obtido a partir da trituração de peças quebradas disponibilizadas por uma empresa local. As peças de granito quebradas foram trituradas manualmente com base metálica e socador (Figura 8B) até a formação de pó e, posteriormente, o material triturado passou na peneira de número 200 (0,075 mm), sendo esse denominado pó de granito nessa pesquisa.

Figura 8 – Peças defeituosas (A) e ferramentas utilizadas para trituração (B).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Após a obtenção dos materiais, ambos foram destinados para as etapas de caracterização e de preparo das misturas. O tipo de cimento utilizado na pesquisa é o cimento Portland tipo II F 32 que contém adição de filer calcário.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A técnica de fluorescência de raios-x (FRX) foi utilizada para determinar a composição química, enquanto o perfil cristalográfico dos materiais foi determinado utilizando a técnica de difração por raios-X (DRX). Para análise dos materiais pozolânicos, foi utilizada a NBR 12653. Para avaliar a eficiência dos materiais na substituição parcial do cimento, foi utilizado a NBR 5752 por meio do índice de atividade pozolânica fundamentado no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade.

3.3 PROPORÇÕES DAS MISTURAS E PREPARO DAS PASTAS

Na Tabela 3, é possível observar as proporções que serão utilizadas no decorrer da pesquisa.

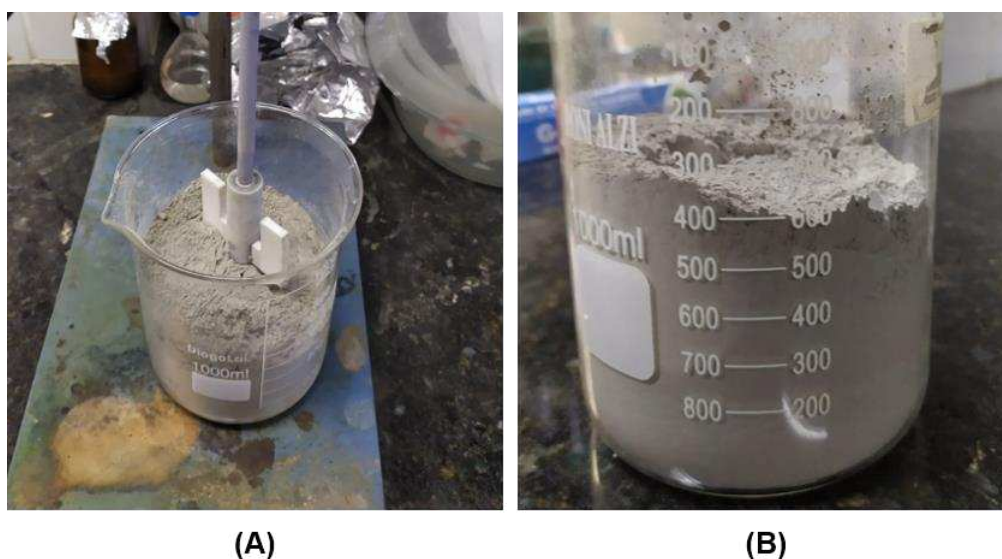
Tabela 3 – Proporções das combinações de cimento, CFB e PG.

Proporção	Cimento	CFB	PG
P0	100	0	0
P1	95	2,5	2,5
P2	90	5	5
P3	80	10	10
P4	70	15	15
P5	60	20	20

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Após realização o preparo dos materiais pozolânicos (calcinação, secagem e peneiramento), procedeu-se com a mistura dos materiais para obtenção das pastas cimentícias de acordo com a Tabela 3. Os materiais foram inseridos em recipiente de 1 litro e levados para agitador mecânico com hélice tipo âncora por tempo suficiente para homogeneizar o pó (Figura 9A e Figura 9B). O fator água/cimento (a/c) adotado foi de 0,5.

Figura 9 – Agitador mecânico com hélice tipo âncora (A) e aspecto da mistura obtida (B).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

3.4 CONFECÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Os moldes para confecção de corpos foram produzidos em PVC, com dimensões dentro do limite informado na NBR 5738: a altura deve ser igual a duas vezes o diâmetro do corpo de prova. O diâmetro dos corpos-de-prova teve 2,5 cm e a altura é igual a 5 cm (Figura 10). Para diminuir a perda de água da pasta, o topo e a base dos corpos foram cobertos com papel filme que é um material não reativo e não absorvente.

Figura 10 – Moldes confeccionados em canos PVC (A) e corpos-de-prova moldados (B).



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Os corpos de-prova foram desmoldados 24 horas após o seu preenchimento. Para facilitar a desmoldagem, as bordas internas dos corpos-de-prova foram revestidas com vaselina sólida. Além disso, foi desenvolvido um aparato (Figura 11) para que a geometria dos corpos não fosse comprometida, permitindo deslocamento lento e controlado durante a desforma.

Figura 11 – Aparato desenvolvido para desforma.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Após a desmoldagem, para minimizar a perda excessiva de água e promover condição mais adequada durante hidratação do cimento, os corpos-de-prova foram colocados em recipiente com água. Com isso, os corpos permaneceram em cura úmida ao longo do armazenamento até as datas dos ensaios de caracterização nas idades de 7 e 28 dias.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS

Para analisar as características das pastas cimentícias produzidas, foram realizados os ensaios em triplicatas, apresentados na seção 3.2, aos 7 e 28 dias. Para isso, foram realizados os ensaios de Fluorescência de raios-x (FRX), Termogravimetria (TG) e o ensaio de resistência à compressão axial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram desenvolvidas cinco diferentes combinações (P0 a P5), variando-se o percentual de substituição da cinza da folha de bambu (CFB) e do pó de granito (PG) até 20% de cada material na mistura. Ao total, 36 corpos-de-prova foram moldados.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA (FRX)

4.1.1 Pastas cimentícias

Os resultados do ensaio de FRX para as pastas cimentícias aos 7 dias (Tabela 4) com valores em percentual. Observa-se que houve redução gradual na quantidade de óxido de cálcio (CaO) presente nas misturas produzidas conforme se avança da amostra P0 para amostra P5. Enquanto os teores de sílica, alumina e hematita aumentaram conforme se elevou o teor de substituição do cimento. A perda ao fogo (PF) reduziu da mesma forma que o CaO. Esse resultado é esperado, pois a parcela de substituição parcial do cimento é aumentada em cada amostra. Verifica-se também que as amostras P1 e P2 possuem composições semelhantes à da amostra de controle (P0).

Tabela 4 – Composições químicas das pastas cimentícias aos 7 dias de hidratação.

Componentes	P0	P1	P2	P3	P4	P5
CaO	73,50	72,74	72,19	67,47	63,87	59,70
SiO ₂	12,57	13,12	13,40	16,53	19,11	22,44
Al ₂ O ₃	2,91	2,97	3,03	3,70	4,13	4,31
Fe ₂ O ₃	4,73	5,01	5,33	5,69	6,09	6,42
SO ₃	3,46	3,34	3,24	3,08	3,10	3,11
MgO	1,96	1,89	1,77	2,02	2,00	1,99
K ₂ O	0,44	0,43	0,50	0,84	0,96	1,02
TiO ₂	0,35	0,40	0,45	0,56	0,62	0,67
MnO	-	-	-	0,11	0,11	0,11
PF	28,70	28,15	27,57	26,90	24,85	21,54

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Os valores observados são semelhantes aos achados de Kolawole *et al.*, (2019) que verificou o aumento do teor dos óxidos pozolânicos (SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃) e redução da quantidade de CaO na medida em que se aumenta o percentual de

substituição do cimento. O aumento dos óxidos pozolânicos poderá influenciar a reação pozolânica e reduzir a quantidade de portlandita gerada durante a hidratação do cimento.

Os resultados do ensaio de FRX para as pastas cimentícias aos 28 dias (Tabela 5) com valores em percentual. As amostras P1 e P2 aos 28 dias repetiram o padrão observado nos resultados aos 7 dias, possuindo a composição química semelhante à amostra P0.

Tabela 5 – Composições químicas das pastas cimentícias aos 28 dias de hidratação.

Componentes	P0	P1	P2	P3	P4	P5
CaO	68,75	68,43	67,53	62,18	59,58	55,55
SiO ₂	16,37	16,46	17,02	20,85	22,59	25,31
Al ₂ O ₃	4,34	4,28	4,34	5,19	5,31	5,51
Fe ₂ O ₃	3,77	4,10	4,40	4,62	5,35	6,00
SO ₃	3,68	3,83	3,63	3,71	3,47	3,17
MgO	1,59	1,35	1,31	1,64	1,39	1,32
K ₂ O	0,40	0,42	0,58	0,72	1,01	1,41
TiO ₂	0,49	0,56	0,61	0,66	0,79	0,81
MnO	0,25	0,26	0,26	0,24	0,25	0,25
SrO	0,30	0,32	0,33	-	0,28	0,26
P ₂ O ₅	-	-	-	0,19	-	0,17
PF	31,18	30,44	29,78	28,24	26,59	24,05

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Semelhante ao que ocorreu nas amostras na idade de 7 dias, a redução de CaO e os aumentos de sílica, alumina e hematita são perceptíveis. Além disso, percebe-se que houve aumento nos valores em relação aos 7 dias, especialmente na sílica. Isso ocorre em virtude do aumento da quantidade de silicatos cálcico hidratados que surgiram com o avanço da hidratação do cimento (Moraes *et al.*, 2019).

4.1.2 Cinza da folha de bambu (CFB) e Pó de granito (PG)

A composição química da CFB e do PG (Tabela 6) apresenta composição de materiais silicoaluminosos, com predominância da sílica. O somatório dos óxidos de

interesse para reação pozolânica ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) representaram 86,89% do total para CFB e 84,48% do total para o PG.

De acordo com a NBR 12653 (2015), verifica-se que os materiais produzidos atendem às exigências químicas para os óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3), pois a norma prevê o valor percentual mínimo de 70% para a soma dos óxidos listados nas pozolanas de classe N (pozolanas naturais) e classe C (pozolanas artificiais).

Tabela 6 – Composições químicas da CFB e do PG.

Componentes	CFB	PG
SiO_2	77,11	57,10
Al_2O_3	7,74	16,82
Fe_2O_3	2,04	10,55
CaO	6,41	5,29
K_2O	1,82	6,91
SO_3	1,32	-
MgO	1,01	0,42
TiO_2	0,90	1,31
P_2O_5	0,90	0,48
MnO	0,17	0,15
BaO	-	0,56
Cl	0,53	-
ZrO_2	-	0,24
PF	5,45	0,46
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	86,89	84,48

Fonte: Elaboração do autor (2023).

Em relação à NBR 12653 (2015), o percentual de SO_3 permitido para as classes N e C são de, no máximo, 4% e 5% respectivamente. Desse modo, os valores apresentados pela CFB (1,32%) e pelo PG (0%), são inferiores aos limites máximos contidos na norma, sendo aceitáveis nessa exigência química, sendo esses bons resultados, pois se distanciam do limite máximo permitido.

A norma também estipula o limite máximo de perda ao fogo para as classes C (10%) e N (6%). Os materiais foram submetidos ao ensaio de termogravimetria, sendo aquecidos até a temperatura de 1000°C, totalizando perda ao fogo de 5,45%

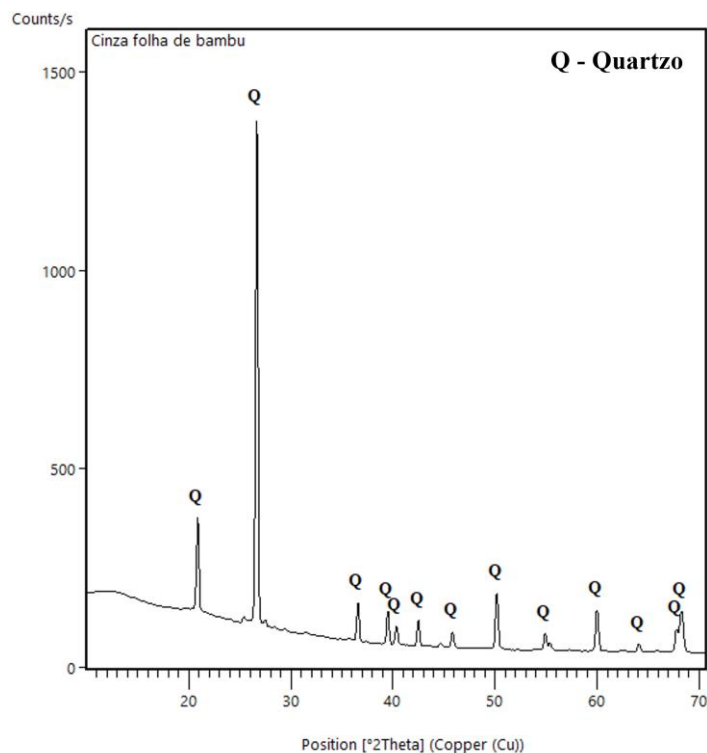
para CFB e 0,46% para PG. Esses valores atendem aos limites máximos indicados na norma, demonstrando que o método escolhido para obtenção dos materiais foi satisfatório por apresentar baixa perda de massa.

4.2 ANÁLISE MINERALÓGICA (DRX)

4.2.1 Cinza da folha de bambu (CFB)

O perfil cristalográfico da CFB (Figura 12) permitiu identificar a presença de quartzo compatível com o código de referência 00-046-1045. Sendo o pico (26,67°) mais representativo do perfil. O resultado demonstra que a cinza produzida é rica em sílica, além de ser convergente com as informações do ensaio de fluorescência de raios-X que indica elevado percentual de SiO_2 na composição da CFB.

Figura 12 – Perfil cristalográfico para CFB.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

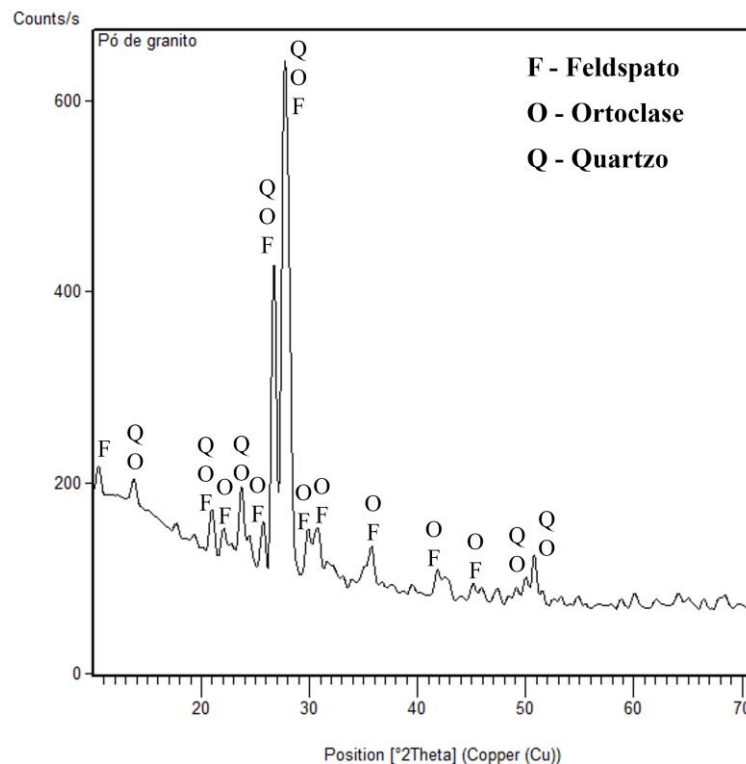
Observa-se a presença de um halo amorfo entre 15° e 35° em 2θ de modo que os picos de quartzo estão localizados em 20,89° e 26,67°. De acordo com Moraes *et al.* (2019), esses picos são evidências de fases cristalinas no material e estão associados a contaminação do material pelo solo, considerando que as folhas

foram coletadas na terra. No perfil cristalográfico da CFB, observa-se um desvio característico da linha de base o que sugere comportamento amorfo para a cinza produzida. Os resultados se aproximam dos perfis obtidos por Batista *et al.* (2023) e Silva *et al.* (2023b), sendo esperada alta reatividade pozolânica para a CFB produzida.

4.2.2 Pó de granito (PG)

Na difração de raios-X, foram visualizados feldspato $((K/Na/Ca)(Si/Al)_4O_8)$, ortoclase $(KAlSi_3O_8)$, que é um tipo de feldspato rico em potássio, e quartzo (SiO_2) como constituintes mineralógicos do PG produzido. As fases visualizadas são compatíveis com os códigos de referência 96-900-3091, 96-900-0163 e 96-500-0036 respectivamente. O difratograma do pó de granito (Figura 13) está convergente com os trabalhos de Rashwan *et al.* (2020) e Santos *et al.* (2021), pois as fases apresentadas são esperadas em composições mineralógicas de pó de granito e estão em consonância com os resultados obtidos na FRX do PG.

Figura 13 – Perfil cristalográfico para PG.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

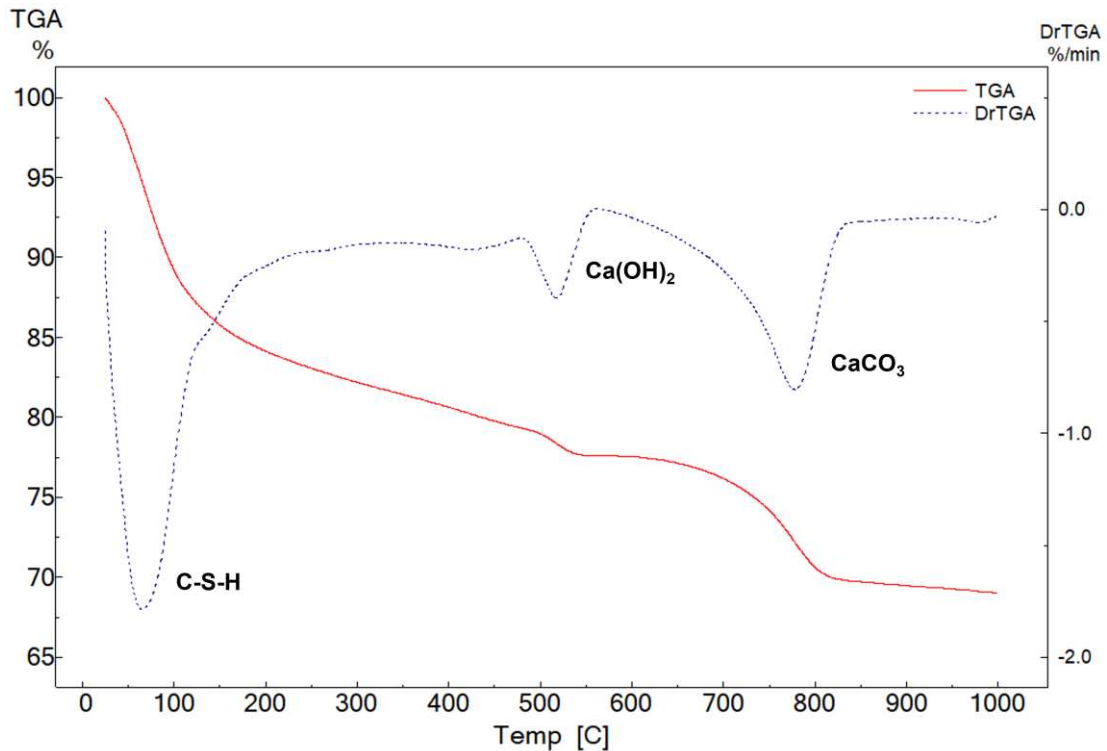
Não foi possível determinar picos cristalinos que apresentassem na composição ferro (Fe) nas suas diferentes formas $\text{FeO}(\text{OH})$ ou Fe_2O_3 . Esse resultado corrobora com Mashally; Shalaby; Rashwan (2018), pois são fases de baixa cristalinidade.

4.3 ANÁLISE TÉRMICA

4.3.1 Pastas cimentícias

Observa-se a curva termogravimétrica e sua derivada para a amostra P0 (Figura 14). Na curva, verifica-se o comportamento característico de pastas cimentícias delimitado por três principais estágios. O primeiro relacionado à perda de massa pelos C-S-H formados; o segundo associado ao teor de portlandita existente e sua decomposição (Hoppe Filho *et al.*, 2017b); e o terceiro relacionado à decomposição do carbonato de cálcio e pela carbonatação dos C-S-H formados (Pavlík *et al.*, 2016).

Figura 14 – TG e DTG para a amostra P0 aos 28 dias de hidratação.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

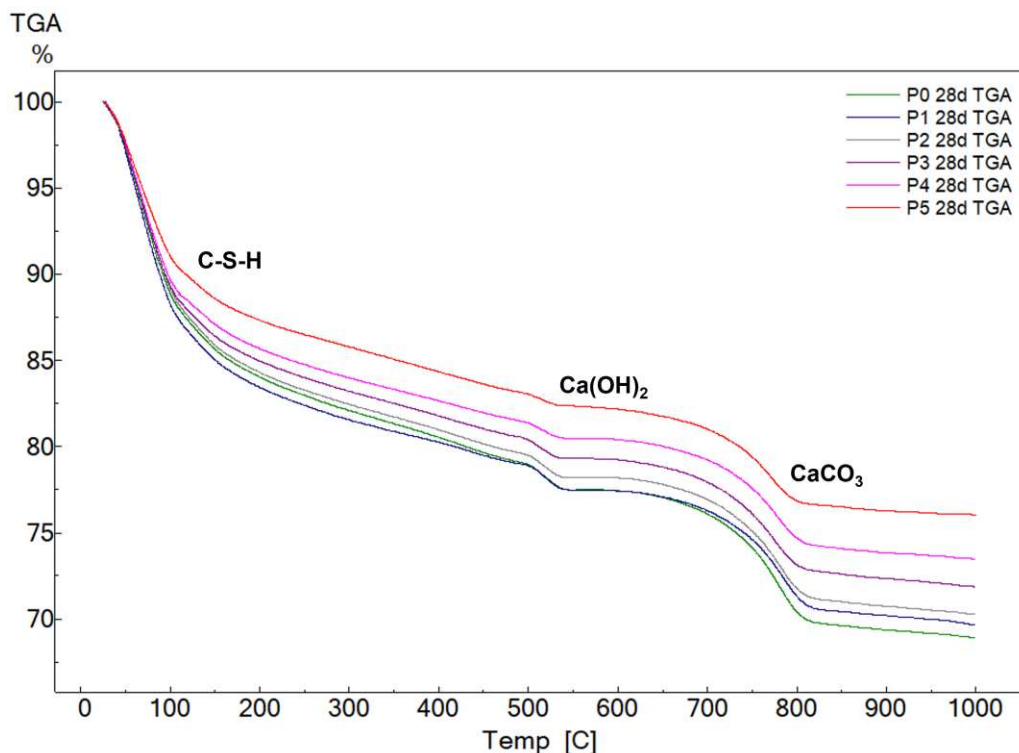
Na amostra P0, o primeiro estágio está contido no intervalo de 25°C a 225°C

representado pelo primeiro pico da DTG e apresentou perda de massa igual a 16,43%. No segundo estágio, definido no intervalo entre 480°C e 560°C que é indicado no segundo pico, foi constatada perda de massa igual a 1,74%. O terceiro estágio é apresentado no terceiro pico, sendo contemplado pelo intervalo entre 560°C e 840°C, com perda de massa correspondente igual à 7,82%.

De acordo com Hoppe Filho *et al.*, (2017a) e Pavlík *et al.*, (2016), os estágios apresentados na curva termogravimétrica são explicados pela: perda de água quimicamente combinada presente nos C-S-H e a liberação da água fisicamente ligada aos poros (1° estágio), perda de água de composição do Ca(OH)_2 oriunda da cal livre presente no cimento anidro e da hidratação parcial dos C-S-H (2° estágio) e liberação do dióxido de carbono durante a reação de decomposição do CaCO_3 no 3° estágio.

Para as demais amostras (P1, P2, P3, P4 e P5), a figura 15 apresenta suas respectivas curvas termogravimétricas em conjunto com a curva P0 para fins comparativos. Observa-se que as curvas apresentaram os mesmos comportamentos, sem diferenças em seus estágios. No entanto, verifica-se atenuação na perda de massa total a qual é evidenciada pelo deslocamento das curvas.

Figura 15 – TG e DTG para as amostras P1, P2, P3, P4 e P5 aos 28 dias de hidratação.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Analisando-se os estágios individualmente (Tabela 7), é observado que as amostras P1 e P2 apresentam desempenhos próximos aos da amostra de controle. No primeiro estágio, verificam-se valores semelhantes de modo que esse é um indício da manutenção da quantidade de C-S-H formados durante a hidratação e aumento, como é o caso da amostra P1. Em relação ao teor de portlandita, observa-se que há uma redução gradativa como se verifica em todas as amostras. Esse efeito ocorre em virtude da redução de cal livre disponível do cimento anidro, pois sua quantidade é substituída por MCS e pela atividade pozolânica dos MCS utilizados. No entanto, esse efeito não provoca, necessariamente, aumento de resistência à compressão.

Tabela 7 – Perdas de massa das pastas cimentícias aos 7 dias e aos 28 dias de hidratação nos principais estágios em percentual.

7 dias						
Componentes	P0	P1	P2	P3	P4	P5
1º estágio: C-S-H	16,94	17,70	16,70	16,07	15,87	14,09
2º estágio: Ca(OH) ₂	1,77	1,75	1,63	1,51	1,22	1,06
3º estágio: CaCO ₃	7,07	5,89	6,29	6,11	5,89	5,07
28 dias						
Componentes	P0	P1	P2	P3	P4	P5
1º estágio: C-S-H	16,43	17,20	16,28	15,63	14,89	13,18
2º estágio: Ca(OH) ₂	1,75	1,63	1,53	1,34	1,12	0,92
3º estágio: CaCO ₃	7,83	6,99	7,17	6,65	6,34	5,75

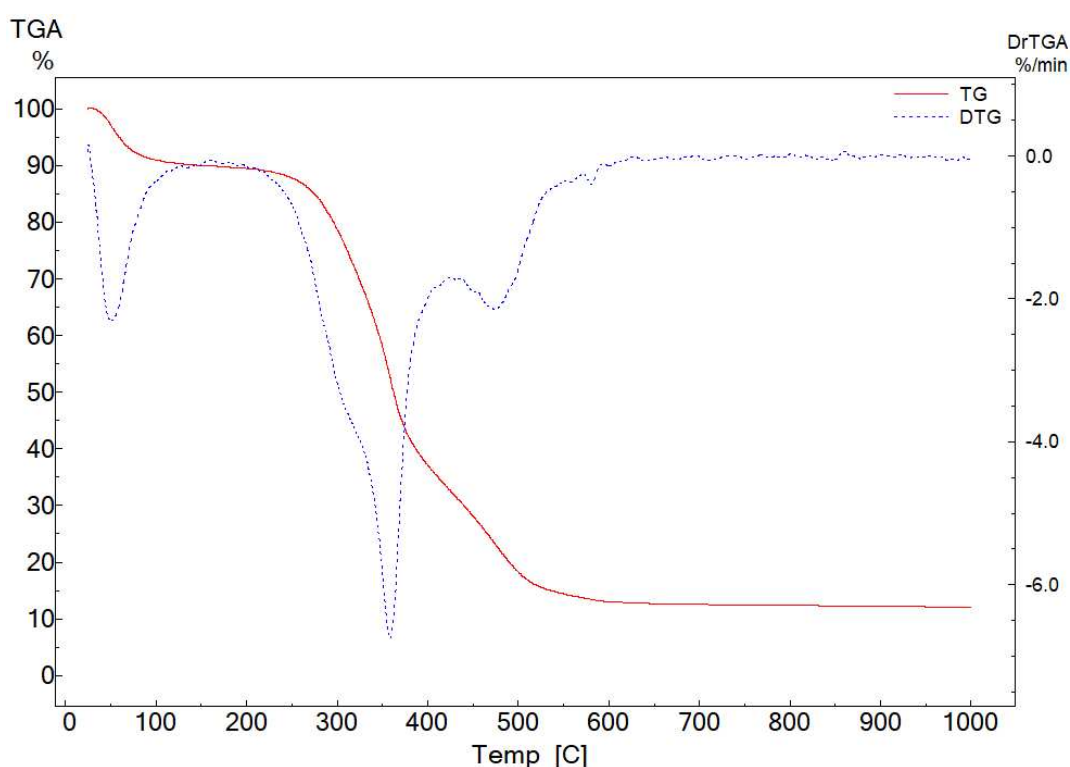
Fonte: Elaboração do autor (2023).

Verifica-se numericamente que houve consumo de hidróxido de cálcio em todas as pastas produzidas, pois é verificável que a quantidade de perda de massa no segundo estágio diminui ao passo em que se avança nas misturas, o que indica a redução da disponibilidade daquele composto na amostra analisada. Paralelamente, é observável um leve aumento na quantidade de massa perdida no terceiro estágio. Essa perda de massa se relaciona com a carbonatação dos C-S-H, sendo um indício do aumento de sua quantidade (Pavlík *et al.*, 2016).

4.3.2 Folha de bambu

A análise termogravimétrica da folha de bambu foi utilizada para determinar a temperatura de queima (Figura 16). A curva termogravimétrica da folha de bambu utilizada na pesquisa apresenta a degradação do material com três estágios definidos que podem ser visualizados a partir de sua derivada. De acordo com Zakikhani et al. (2016), a degradação do bambu e dos seus componentes possuem, fundamentalmente, três estágios: desidratação inicial, pirólise ativa e pirólise passiva.

Figura 16 – TG e DTG para folha de bambu.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

No primeiro estágio, entre 25°C e 160°C, o material perdeu 10,15% de massa. Tal perda é caracterizada pela desidratação do material quando o material perde umidade nas temperaturas iniciais do ensaio. No segundo estágio, entre 160°C e 425°C, verificou-se a perda de 57,35%. Sendo esse o mais representativo para perda de massa em decorrência da decomposição da celulose e da hemicelulose (Silva *et al.*, 2023b).

O terceiro estágio, compreendido entre 425°C e 600°C, apresentou 19,54% de perda de massa. É observada a decomposição de constituintes com cadeias

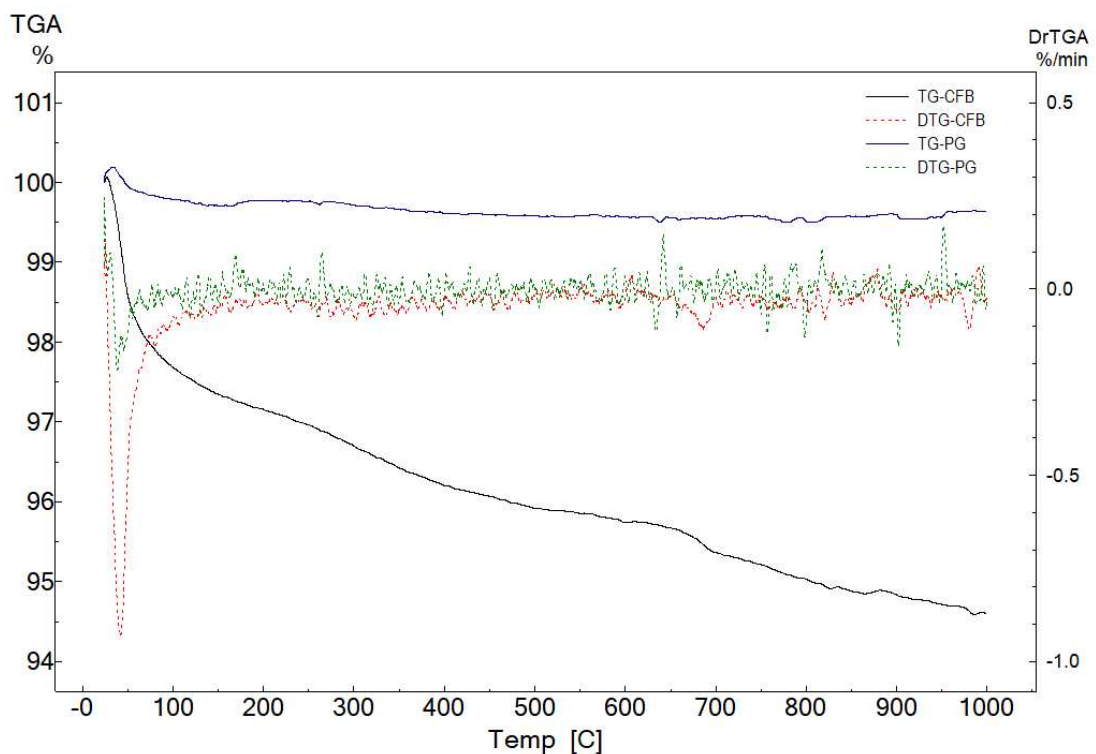
mais complexas, como a lignina que apresenta compostos aromáticos em sua estrutura, sendo mais complexa quando comparada à celulose e à hemicelulose (Campos *et al.*, 2020).

Após esse estágio, não é observada perda de massa significativa na análise, aproximadamente 1%, indicando que a amostra estava praticamente decomposta ao atingir 600°C. Portanto, a temperatura de 600°C foi adotada para obtenção da CFB. De acordo com Silva *et al.* (2023a), essa é a temperatura utilizada pela maioria dos trabalhos com CFB.

4.3.3 Cinza da folha de bambu (CFB) e Pó de granito (PG)

As curvas TG e DTG para a CFB e para o PG (Figura 17). Os dois materiais apresentaram comportamento semelhante, possuindo um leve estágio de desidratação no início e reações de ordem menor até o final do ensaio, demonstrando presença irrisória de materiais orgânicos e possíveis contaminantes. A CFB apresentou 5,45% de perda de massa, enquanto o PG possuiu 0,46%.

Figura 17 – TG e DTG para CFB e PG.



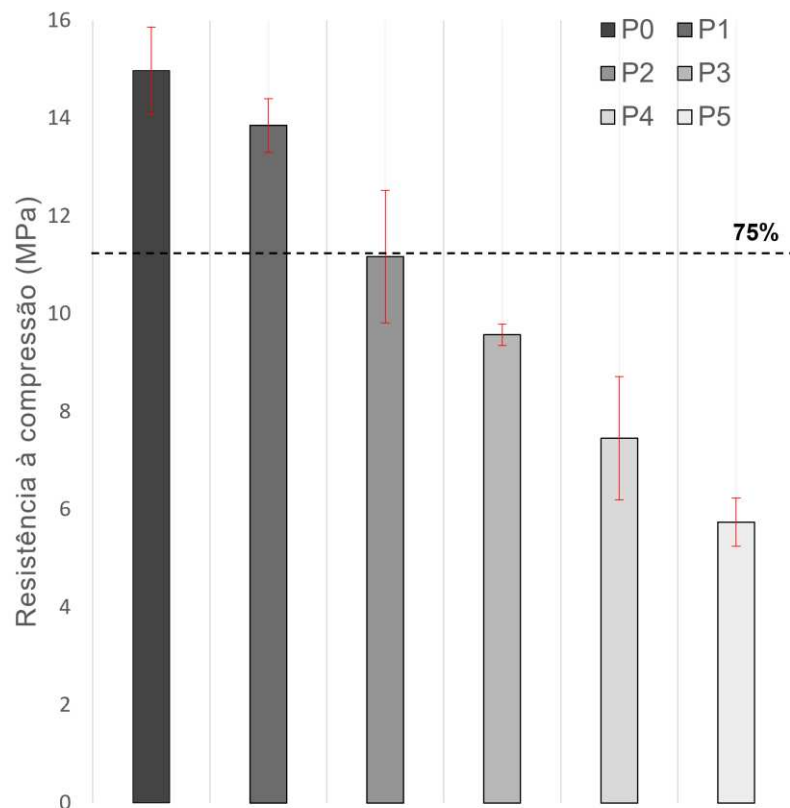
Fonte: Elaboração do autor (2023).

A perda de massa obtida pela CFB se mostrou próxima da média obtida (5,25%) por Carvalho e Velasco (2021). A perda de massa para o PG é significativamente mais baixa quando compara à CFB. O resultado obtido nesse trabalho se assemelha ao achado (0,41%) de Shamsabadi *et al.*, (2018).

4.4 ANÁLISE MECÂNICA

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 7 dias (Figura 18) são comparados com a amostra de controle (P0), pois os corpos ensaiados devem atingir, no mínimo, 75% da resistência da amostra que contém 100% de cimento para atender as exigências físicas contidas na NBR 12653 (2015). A norma internacional, ASTM C618 (2019), indica que as amostras devem atingir o mesmo percentual de controle aos 7 dias de hidratação.

Figura 18 – Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo CFB e PG aos 7 dias de hidratação.

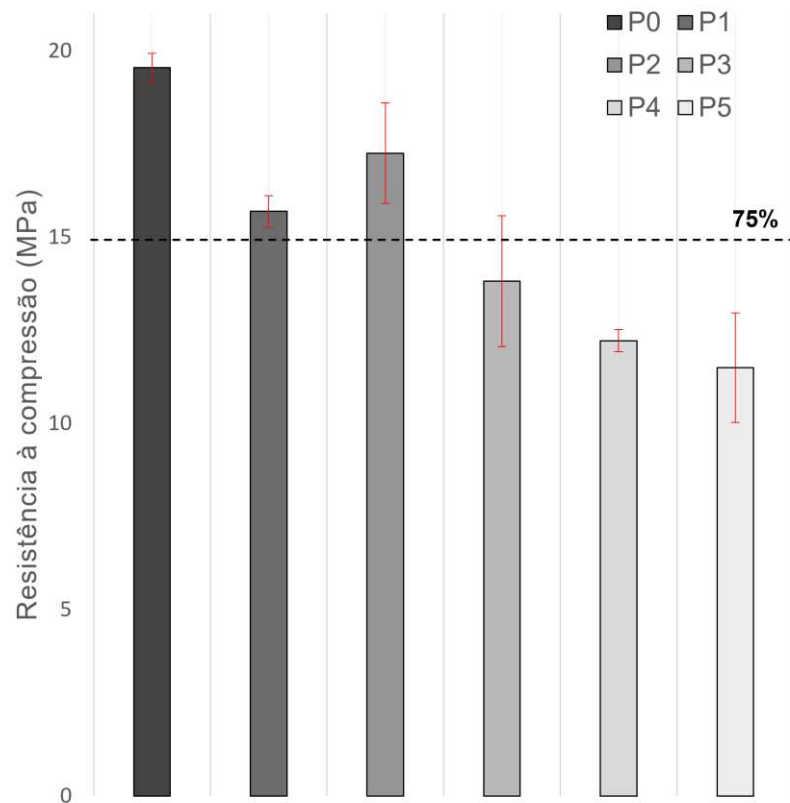


Fonte: Elaboração do autor (2023).

Verifica-se que somente a amostra P1, que contém 5% de substituição parcial do cimento Portland distribuídos em 2,5% de CFB e 2,5% de PG e P2 que contém o dobro das proporções, atendem às exigências físicas da ASTM C618 (2019). O resultado obtido nos demais corpos de prova é esperado em razão da velocidade da reação pozolânica ser mais lenta que a reação de hidratação do cimento Portland. Logo, o desenvolvimento da resistência à compressão se torna mais expressivo em idades avançadas da hidratação.

A resistência à compressão para as amostras P0 a P5 (Figura 19) é comparada às amostras do grupo controle (P0). Os corpos das proporções P1 e P2 ultrapassaram o percentual de controle (75%), sendo aceitáveis dentro das exigências físicas da norma brasileira. Esses resultados ratificam as observações realizadas na análise térmica, pois verificou-se a diminuição da Portlandita, além de P1 e P2 apresentarem características semelhantes às da amostra P0.

Figura 19 – Resistência à compressão das pastas cimentícias contendo CFB e PG aos 28 dias de hidratação.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Os corpos que contém materiais cimentícios suplementares (MCS) obtiveram aumentos de resistência à compressão substanciais, com exceção da amostra P0. Em destaque, estão as amostras P2, P4 e P5 que tiveram 54,43%, 63,81% e 100,35% de aumento de resistência aos 28 dias em relação aos 7 dias de hidratação. Verifica-se que existe uma linha de tendência da resistência à compressão na medida em que se eleva o percentual de substituição do cimento. As médias obtidas no ensaio e os respectivos aumentos podem ser verificados na Tabela 8.

Tabela 8 – Média dos valores de resistência à compressão, aumento relativo e índice de atividade pozolânica (IAP) aos 7 e aos 28 dias.

Amostra	Resistência à compressão (MPa)		Aumento relativo	IAP ASTM C618	IAP NBR 5752
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias
P0	14,97	19,56	30,60%	-	-
P1	13,85	15,69	13,26%	93%	81%
P2	11,17	17,26	54,43%	75%	89%
P3	9,57	13,82	44,36%	64%	71%
P4	7,46	12,22	63,81%	50%	63%
P5	5,74	11,50	100,35%	39%	59%

Fonte: Elaboração do autor (2023).

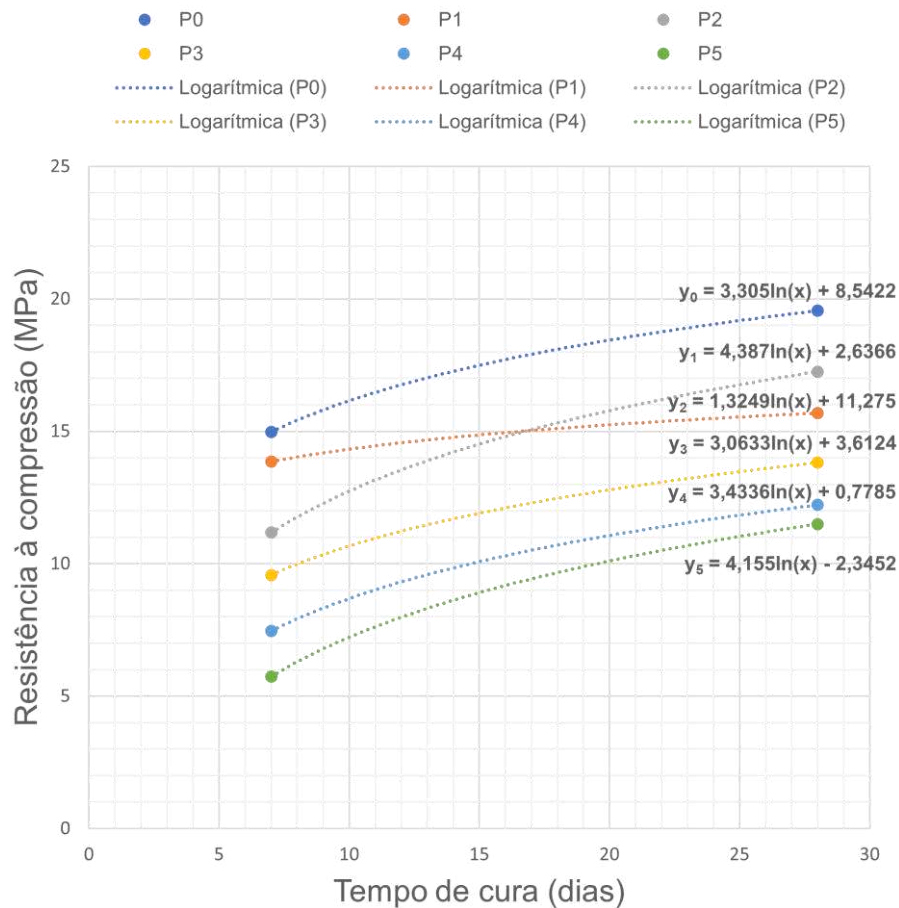
Para a amostra P2, o resultado se mostra diferenciado, pois o aumento relativo encontrado foi superior a amostra P3 que possui o dobro de material pozolânico em percentual. Esse achado pode estar relacionado ao retardamento e endurecimento da pasta, provocado pelo aumento da parcela de sílica disponível na mistura.

Na medida em que se eleva o percentual de MCS na pasta, o aumento relativo se intensifica e é um fenômeno observável, pois é potencial que os corpos das amostras P3, P4 e P5 desenvolvam satisfatoriamente a resistência ao longo do tempo, se aproximando dos valores obtidos no grupo controle. Esse é um resultado convergente aos estudos de Kolawole *et al.* (2019) que verificou o aumento de resistência para concretos com MCS com o avanço da hidratação em idades superiores a 28 dias.

O aumento de resistência observado dos 7 dias aos 28 dias (Figura 20) pode

ser analisado a partir da linha de tendência logarítmica, obtendo-se as equações logarítmicas que permitem as projeções da resistência das pastas cimentícias em idades avançadas.

Figura 20 – Resistência à compressão ao longo do tempo e respectivas equações logarítmicas.



Fonte: Elaboração do autor (2023).

Ao se utilizar as equações apresentadas, verifica-se que em idades iguais a 91 e 112 dias os corpos-prova se aproximam e ultrapassam 70% da resistência do grupo controle (Tabela 9), sendo mais um indício do ganho de resistência à compressão ao longo do tempo.

A linha de tendência logarítmica não é capaz de representar completamente o ganho de resistência tendo em vista a quantidade de variáveis presentes na hidratação do cimento. Por essa razão, verifica-se uma leve distorção nos valores apresentados para a amostra P1. Extrapolando o tempo para 365 dias, os valores se aproximam cada vez mais do grupo controle.

Tabela 9 – Valores de resistência à compressão calculados para 90, 112 e 365 dias e respectivos índices de atividade pozolânica.

Amostra	Resistência à compressão (MPa)			IAP	IAP	IAP
	90 dias	112 dias	365 dias	90 dias	112 dias	365 dias
P0	23,41	24,14	28,04	-	-	-
P1	17,24	17,53	19,09	73,62%	72,61%	79,10%
P2	22,38	23,34	28,52	95,57%	96,68%	118,16%
P3	17,40	18,07	21,69	74,30%	74,85%	89,84%
P4	16,23	16,98	21,04	69,31%	70,35%	87,15%
P5	16,35	17,26	22,17	69,84%	71,51%	91,85%

Fonte: Elaboração do autor (2023).

5 CONCLUSÃO

Foram desenvolvidas cinco combinações de pastas cimentícias com cinza da folha de bambu e pó de granito com percentuais idênticos variando de 2,5% até 20% de substituição em peso para cada material. O desenvolvimento possibilitou a obtenção de duas combinações passíveis de uso para produção de pastas cimentícias.

Os materiais produzidos nessa pesquisa, cinza da folha de bambu (CFB) e pó de granito (PG) se mostraram adequados nas exigências químicas da NBR 12653 e parcela de óxidos pozzolânicos significativa, demonstrando que os métodos de obtenção utilizados foram adequados. Além disso, a CFB apresentou comportamento predominantemente amorfo, sendo considerada um material com elevada reatividade.

O estudo da atividade pozzolânica por meio da resistência à compressão, determinou as amostras P1 e P2 como aceitáveis, pois atingiram 75% da resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias em relação à amostra de controle (P0) como consta na ASTM C618 e na NBR 12653. Os demais corpos, P3, P4, e P5, não atingiram esse critério, mas apresentaram aumento relativo no valor da resistência em relação aos 7 dias de hidratação.

As amostras P1 e P2 alcançaram 80,24% e 88,24% da resistência de compressão em relação ao grupo controle e as demais pastas apresentaram potencial no desenvolvimento de resistência em idades avançadas na medida em que se aumenta o percentual de substituição do cimento na pasta até o teor de 20% para cada material.

As combinações P1 e P2 são as indicadas para confecção de pastas cimentícias tendo em vista os resultados apresentados no ensaio de resistência à compressão. Além disso, as misturas apresentam apelo sustentável ao substituir o cimento em 5% para P1 e em 10% para P2, potencialmente reduzindo os custos, o consumo energético e a emissão de CO₂.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Limitar o percentual de materiais cimentícios suplementares em até 15% contemplando mais faixas.
- Realizar estudo de caso utilizando os percentuais aprovados para determinar a viabilidade técnico-econômica.
- Fazer uso de outras técnicas de beneficiamento dos materiais pozzolânicos.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653** – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697** – Cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738** – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5752** – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618-05**: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete Philadelphia, EUA, 2019.
- BATISTA, J. P. B. *et al.* Influence of Sugar Cane Straw Ash in Mechanical and Microstructural Characteristics of Alkali-Activated Materials Based on Red Clay Brick Waste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 4, p. 04023035, 2023.
- CAMPOS, R. F. *et al.* Avaliação da decomposição térmica de espécies de bambu por termogravimetria. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 259-268, 2020.
- CARVALHO, Y. M.; VELASCO, L. F. (2021). Bamboo ashes as an eco-friendly alternative to cement - a systematic review. **ForScience**, v. 9(2), e00889.
- CHAJEC, A. The use of granite powder waste in cementitious composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 25, p. 4761-4783, 2023.
- GHORBANI, S. *et al.* Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 143-152, 2019.
- HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete**. Butterworth-Heinemann, 2019.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017a.
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017b.

IEA/WBCSD (2018), **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. IEA and WBCSD, Paris and Geneva. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>> Acesso em 13 nov. 2022.

IEAGHG (International Energy Agency Greenhouse Gases), 2013. **Deployment of CCS in the Cement Industry**. Report 2013/19. Cheltenham: IEAGHG, 2013. 122 p. 168 Disponível em: <https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf> Acesso em 13 nov. 2022.

KOLAWOLE, J. T. *et al.* Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete. **Materialia**, v. 15, p. 101045, março 2021.

KUMAR, Y. Y.; VARDHAN, C. M. V.; ANITHA, A. Use of Granite Waste as Partial Substitute to Cement in Concrete. **Journal of Engineering Research and Application**. vol. 5, p. 25-31, 2015.

LI, L. G. *et al.* Filler technology of adding granite dust to reduce cement content and increase strength of mortar. **Powder Technology**, v. 342, p. 388-396, 2019.

MASHALY, A. O.; SHALABY, B. N.; RASHWAN, M. A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 800-818, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MENDONÇA, M. F. *et al.* Partial replacement of portland cement by bamboo ashes. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 28, p. e20220298, 2023.

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

NATALLI, J. F.; *et al.* A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, p. e14603, 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete technology**. Harlow, England; New York: Prentice Hall, 2010. 448 p.

PAVLÍK, Z. *et al.* DSC and TG analysis of a blended binder based on waste ceramic powder and portland cement. **International Journal of Thermophysics**, v. 37, p. 1-14, 2016.

PROKOPSKI, G.; MARCHUK, V.; HUTS, A. The effect of using granite dust as a component of concrete mixture. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00349, dezembro, 2020.

RASHWAN, M. A. *et al.* Behaviour of fresh and hardened concrete incorporating marble and granite sludge as cement replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101697, 2020.

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

SANTOS, K. V. *et al.* ESTUDO PARA REAPROVEITAMENTO DE RESIDUO DE CORTE DE GRANITO EM BLOCOS DE CONCRETO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 277-292, 2021.

SHAMSABADI, E. *et al.* Performance of concrete with waste granite powder: The effect of superplasticizers. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1808, 2018.

SILVA, L. H. P. *et al.* Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102769, outubro 2021.

SILVA, L. H. P. *et al.* Potential of bamboo leaf ash as supplementary binder materials - A systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, p. 106547, 2023a.

SILVA, H. D. A. *et al.* AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DA FOLHA DE BAMBU EM TIJOLOS SOLO-CIMENTO. **Igapó**, v. 17, n. 1, 2023b.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ª ed, 1997, 459 p.

WINTER, N. B. **Understanding Cement**: An introduction to cement production, cement hydration and deleterious processes in concrete. Woodbridge: WHD Microanalysis Consultants Ltd, 2012, 206 p.

ZAKIKHANI, Parnia *et al.* Thermal degradation of four bamboo species. **BioResources**, v. 11, n. 1, p. 414-425, 2016.