



Marcelly de Figueiredo Mendonça

**Substituição parcial do cimento Portland
por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Alcebíades Negrão Macêdo

Belém – Pará – Brasil

2018

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Marcelly de Figueiredo Mendonça

**Substituição parcial do cimento Portland
por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Alcebíades Negrão Macêdo

Belém,
Junho de 2018

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Marcellly de Figueiredo Mendonça

TÍTULO: Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)

GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcellly de Figueiredo Mendonça

Av. Augusto Correa, n. 1
Campus Universitário do Guamá
Laboratório de Engenharia Civil
Belém, Pará. CEP 66075-970

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

Mendonça, Marcellly de Figueiredo
Substituição parcial do cimento portland por cinzas de Bambu
(*Bambusa Vulgaris*) / Marcellly de Figueiredo Mendonça. — 2018.

Orientador : Alcebíades Negrão Macêdo
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Programa de Pós graduação em Engenharia Civil / UFPA , Belém,
2018.

1. Concreto. 2. Resíduos industriais – Aspectos ambientais. 3.
Bambu. 4. Cimento portland. I. Título.

CDD - 23. ed. 620.136

Elaborado por Hilma Celeste Alves Melo – CRB – 2- 374



SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE BAMBU (BAMBUSA VULGARIS)

AUTORA:

MARCELLY DE FIGUEIREDO MENDONÇA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 28 / 06 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Alcebiades Negrão Macêdo', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Orientador (UFPA)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrielli Morais de Oliveira', written over a horizontal line.

Profa. Dra. Andrielli Morais de Oliveira
Membro Externo (UFG)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marcelo de Souza Picanço', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dênio Ramam Carvalho de Oliveira', written over a horizontal line.

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Aos meus pais, irmão
e à memória do meu avô José Maria.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que guiou cada passo da minha vida e me permitiu chegar até aqui.

Aos professores do PPGEC e FEC da UFPA, que me proporcionaram os conhecimentos utilizados como base para a produção do trabalho. Aos professores Alcebíades e Marcelo que aceitaram me orientar e auxiliar, tornando possível a realização da pesquisa e obtenção do título de mestre.

A CAPES, pelo financiamento da pesquisa na forma de bolsa de mestrado.

A EMBRAPA, pelo fornecimento do bambu utilizado na pesquisa.

Aos laboratórios parceiros, nos quais foram realizados vários ensaios: Laboratório de Física (Pesquisa), Central de Extração da Faculdade de Química, Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química e Laboratório de Metalurgia do IFPA.

Aos meus pais, Jesus e Marly, pessoas incríveis que sempre apoiaram as minhas escolhas e proporcionaram tudo o que foi necessário para a minha vida acadêmica. Ao meu irmão, José, o qual sempre admirei e me espelhei. Aos meus avós, em especial ao meu avô, José Maria, que sempre se orgulhou mesmo das menores conquistas. Aos padrinhos, tios e primos.

Aos colegas e amigos do mestrado, os quais sempre estiveram dispostos a ajudar quando precisei: Neto, Renata, Denisson, André e Igor. A todos os colegas que cursaram as disciplinas e dividiram comigo grupos de estudos e apresentações. Aos meus amigos de vida, que sempre acreditaram no meu potencial e dividiram comigo conquistas.

Muito obrigada.

RESUMO

MENDONÇA, M. F. (2018). **Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu (*Bambusa Vulgaris*)**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 81p.

A substituição parcial do cimento Portland por resíduos industriais ou materiais de origem natural com fonte renovável é um meio que já vem sendo utilizado para minimizar os impactos ambientais gerados durante sua fabricação, tais quais a emissão de CO₂, alto gasto energético e exploração das jazidas de calcário. A substituição parcial desse aglomerante pode melhorar, ainda, certas propriedades de concretos e argamassas e reduzir o custo de produção. Nesse contexto, o bambu surge como um material com potencial para utilização de suas cinzas em substituição parcial ao cimento Portland, como adição mineral do tipo pozolânica, por ser um material natural com fonte renovável e rápido crescimento. Diante disso, o objetivo desse trabalho é avaliar a utilização de cinzas do colmo do bambu (*Bambusa Vulgaris*) como substituição parcial do cimento Portland. Para tal foram produzidas cinzas do colmo do bambu em três temperaturas de calcinação: 500°C, 600°C e 700°C. A cinza produzida a 600°C obteve índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias superior ao estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014). Avaliou-se a hidratação do cimento Portland parcialmente substituído por essa cinza, em proporções de 0%, 6%, 10% e 14% e foi constatado a diminuição da concentração de hidróxido de cálcio, sendo mais expressiva com a incorporação de 10% de cinzas. Argamassas com as mesmas proporções de substituição foram avaliadas no estado fresco e endurecido. A consistência no estado fresco manteve-se constante, enquanto que a resistência à compressão, no estado endurecido, sofreu acréscimo entre 10 e 15% com a adição das cinzas. Portanto, foi concluído que a substituição parcial do cimento Portland por cinzas do colmo do bambu calcinadas a 600°C apresentou benefícios às amostras estudadas, características de materiais considerados pozolânicos.

Palavras-chave

Cinzas do colmo do bambu; Cimento Portland; Substituição parcial.

ABSTRACT

MENDONÇA, M. F. (2018). **Partial replacement of Portland cement by bamboo ashes (*Bambusa Vugaris*)**. MSc Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil, 81p (in Portuguese).

The partial replacement of Portland cement for industrial waste or materials of natural origin with renewable source is a way that has already been used to minimize the environmental impacts generated during its manufacture, such as CO₂ emission, high energy expenditure and exploitation of the limestone deposits. The partial replacement of this binder can further improve certain properties of concrete and mortars and reduce the cost of their production. In this context, bamboo appears as a material with potential to use its ashes in partial replacement to the Portland cement, because it's a natural material with renewable source and fast growth. Therefore, the objective of this paper is to evaluate the use of bamboo stem ashes (*Bambusa Vulgaris*) as partial replacement of Portland cement. For that, bamboo stem ashes were produced at three calcination temperatures: 500°C, 600°C and 700°C. The ashes produced at 600°C obtained a performance index with Portland cement at 28 days higher than that established by NBR 12653 (ABNT, 2014). It was evaluated the hydration of the Portland cement partially substituted by this ash, in proportions of 0, 6, 10 and 14% and it was verified the decrease of the concentration of calcium hydroxide, being more expressive with the incorporation of 10% of ashes. Mortars with the same replacement proportions were evaluated in the fresh and hardened state. The consistency in the fresh state remained constant, while the compressive strength, in the hardened state, increased between 10 and 15% with the addition of the ashes. Therefore, it was concluded that the partial replacement of the Portland cement by bamboo stem ashes calcined at 600°C presented benefits to the studied samples, characteristic of pozzolanic materials.

Keywords:

Bamboo stem ashes; Portland cement; Partial replacement.

Sumário

Capítulo	Página
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Símbolos	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo Geral	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Cimento Portland	6
2.1.1 Conceituação	6
2.1.2 A fabricação do cimento Portland	6
2.1.3 Características Químicas do cimento Portland	7
2.1.4 Hidratação do cimento Portland	8
2.1.5 Microestrutura da pasta de cimento hidratada	10
2.1.6 Técnicas usadas para estudar a hidratação do cimento Portland	12
2.1.7 Tipos de cimento Portland no Brasil	13
2.2 Adições minerais do cimento Portland	14
2.2.1 Definição e tipos de adições	14
2.2.2 Fíler	15
2.2.3 Pozolanas	16
2.3 Bambu	19
2.3.1 Aspectos Gerais	19
2.3.2 Morfologia	20
2.3.3 Composição Química	22

2.3.4 Aplicações	22
2.3.5 Bambusa Vulgaris	24
2.4 Cinzas de bambu	24
2.4.1 Cinzas de bambu e a sustentabilidade	24
2.4.2 Produção das cinzas: processos térmico e físico	25
2.4.3 Características das cinzas de bambu	29
2.4.4 Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu	32
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Cimento Portland	34
3.1.2 Agregado miúdo	35
3.1.3 Água de amassamento	36
3.1.4 Cinzas do colmo do bambu (CCB)	36
3.2 Métodos	37
3.2.1 Caracterização das cinzas do colmo do bambu	37
3.2.1.1 Análise granulométrica	38
3.2.1.2 Determinação da massa específica	38
3.2.1.3 Análise mineralógica	39
3.2.1.4 Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias	40
3.2.2 Análise do cimento parcialmente substituído por CCB em pastas	41
3.2.2.1 Produção das Pastas	41
3.2.2.2 Mineralogia das pastas	42
3.2.2.3 Termogravimetria das pastas hidratadas	43
3.2.3 Argamassas com substituição parcial do cimento por CCB	44
3.2.3.1 Dosagem das argamassas e Avaliação da Consistência	44
3.2.3.2 Análise mecânica – Determinação da resistência à compressão	45
3.2.3.3 Microestrutura das argamassas	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Caracterização das cinzas do colmo do bambu	47
4.1.1 Análise granulométrica	47
4.1.2 Determinação da massa específica	49
4.1.3 Análise mineralógica	50
4.1.4 Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias	52
4.2 Análise do cimento parcialmente substituído por CCB em pastas	53

4.2.1 Mineralogia das pastas hidratadas	53
4.2.2 Termogravimetria das pastas hidratadas	56
4.3 Argamassas com substituição parcial do cimento por CCB	60
4.3.1 Análise no estado fresco – Consistência	60
4.3.2 Análise mecânica – Determinação da resistência à compressão	61
4.3.3 Microestrutura das argamassas	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1 Conclusões	71
5.2 Sugestões	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Compostos do cimento Portland	7
Tabela 2.2 – Composição dos principais tipos de cimento	13
Tabela 2.3 – Requisitos dos materiais pozolânicos	17
Tabela 2.4 – Característica química das cinzas de bambu	30
Tabela 3.1 – Programa experimental	34
Tabela 3.2 – Massas específicas dos cimentos utilizados na pesquisa	35
Tabela 3.3 – Características do agregado miúdo utilizado na pesquisa	35
Tabela 3.4 – Nomenclatura das cinzas do colmo de bambu	37
Tabela 3.5 – Composição das argamassas para avaliação da pozolanicidade das CCB	40
Tabela 3.6 – Teores de cimento e CCB nas pastas	42
Tabela 3.7 – Teores de cimento e CCB nas argamassas	45
Tabela 4.1 – Determinação do diâmetro médio (d50) das CCB após moagem	49
Tabela 4.2 – Resultado do ensaio de massa específica das CCB	50
Tabela 4.3 – Consistência e Resistência Média das argamassas	52
Tabela 4.4 – Legenda dos difratogramas	54
Tabela 4.5 – Perda de massa das pastas por faixa de temperatura	59
Tabela 4.6 – Quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas	59
Tabela 4.7 – Índice de consistência das argamassas	60
Tabela 4.8 – Resultado do EDS da ACB0	67
Tabela 4.9 – Resultado do EDS da ACB6	68
Tabela 4.10 – Resultado do EDS da ACB10	69
Tabela 4.11 – Resultado do EDS da ACB14	70

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – Microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada	10
Figura 2.2 – Microestrutura do cimento hidratado (a) Cristais de etringita e monossulfato hidratado; (b) Cristais de portlandita; (c) Formação do C-S-H	11
Figura 2.3 – Ilustração da microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada	12
Figura 2.4 – Evolução da resistência dos principais tipos de cimento	14
Figura 2.5 – Distribuição geográfica dos bambus no mundo	19
Figura 2.6 – Morfologia externa do bambu	21
Figura 2.7 – Colmo de bambu da espécie <i>Bambusa Vulgaris</i>	21
Figura 2.8 – Curvas TG e DTG da serragem de bambu <i>Bambusa vulgaris</i>	27
Figura 2.9 – Análises termogravimétricas (DTG) de biomassas sobrepostas	28
Figura 2.10 – Difratomogramas de raios-x de cinzas das folhas de bambu calcinadas a 500 °C, 600°C e 700 °C	31
Figura 2.11 – Difrátograma de raios-x de cinza do colmo de bambu calcinada a 600°C por 3 horas	31
Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia e limites das zonas ótima e utilizável, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009)	36
Figura 3.2 – (a) Colmos de bambu; (b) Bambu moído	36
Figura 3.3 – Forno mufla utilizado na pesquisa	37
Figura 3.4 – Processo de moagem das cinzas do colmo do bambu	38
Figura 3.5 – (a) Ensaio de consistência em argamassa; (b) Moldes com argamassas com CCB	41
Figura 3.6 – Ensaio de compressão em argamassa	41
Figura 3.7 – Pastas pulverizadas destinadas às análises.	42
Figura 3.8 – Amostras das pastas destinadas à análise mineralógica por DRX	43
Figura 3.9 – Curva típica de perda de massa do cimento hidratado parcialmente	44
Figura 3.10 – Corpos de provas de ACB0, ACB6, ACB10 e ACB14, em ordem	45
Figura 4.1 – Curvas granulométricas das CCB500	47
Figura 4.2 – Curvas granulométricas das CCB600	47

Figura 4.3 – Curvas granulométricas das CCB700	48
Figura 4.4 – Ilustração de grãos com curvas granulométricas contínua e descontínua	49
Figura 4.5 – Difratoograma da CCB500	50
Figura 4.6 – Difratoograma da CCB600	51
Figura 4.7 – Difratoograma da CCB700	51
Figura 4.8 – (a) Resistência à compressão; (b) Índice de desempenho com o cimento Portland	53
Figura 4.9 – Difratoogramas da PCB0 (a) 28 dias; (b) 56 dias	54
Figura 4.10 – Difratoogramas da PCB6 (a) 28 dias; (b) 56 dias	54
Figura 4.11 – Difratoogramas da PCB10 (a) 28 dias; (b) 56 dias	55
Figura 4.12 – Difratoogramas da PCB14 (a) 28 dias; (b) 56 dias	55
Figura 4.13 – Detalhe do pico da portlandita em $18,1^\circ 2\theta$ (a) 28 dias; (b) 56 dias.	56
Figura 4.14 – TG/DTG da PCB0 (56 dias)	57
Figura 4.15 – TG/DTG da PCB6 (56 dias)	57
Figura 4.16 – TG/DTG da PCB10 (56 dias)	58
Figura 4.17 – TG/DTG da PCB14 (56 dias)	58
Figura 4.18 – Determinação do índice de consistência (a) ACB0; (b) ACB6; (c) ACB10; (d) ACB14	61
Figura 4.19 – Resultado do ensaio de resistência à compressão em argamassas	62
Figura 4.20 – Aparência das argamassas após ensaio de resistência à compressão (28 dias)	62
Figura 4.21 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 3 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste Kruskal-wallis)	63
Figura 4.22 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 7 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)	63
Figura 4.23 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)	64
Figura 4.24 – Resultado da resistência à compressão das argamassas com CCB600 aos 28 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)	64
Figura 4.25 – Superfície aumentada 100x (a) ACB0 (b) ACB14	66
Figura 4.26 – Microestrutura da ACB0	67
Figura 4.27 – Microestrutura da ACB6	68
Figura 4.28 – Microestrutura da ACB10	69
Figura 4.29 – Microestrutura da ACB14	70

LISTA DE SÍMBOLOS

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta tese. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

Símbolo	Significado
%	Porcento
μm	Micrômetro
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
Cal	Caloria
CaO	Óxido de Cálcio ou Cal
cm	Centímetro
cm^2	Centímetro Quadrado
cm^3	Centímetro Cúbico
CO_2	Dióxido de Carbono
g	Grama
J	Joule
kCal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
rpm	Rotação por minuto
s	Segundo
W	Watt

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Há mais de cinquenta anos, já era constatado por pesquisadores que o material de construção mais utilizado no mundo é o concreto. Sendo este produzido a partir de uma mistura de cimento Portland, agregados e água. Naquela época, 63 milhões de toneladas de cimento eram convertidas em 500 milhões de toneladas de concreto, por ano, e seu consumo, em massa, já era cinco vezes maior que o de aço. O sucesso desse material deve-se, principalmente, pela sua excelente resistência à água, por sua fácil possibilidade de moldagem em distintas formas, ao seu, relativo, baixo custo e a disponibilidade no mercado (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Em 2016, segundo o US Geological Survey, foram produzidas 4,2 bilhões de toneladas de cimento no mundo. O Brasil foi o nono maior produtor desse material, produzindo 57,8 milhões de toneladas, um total de 280 kg por habitante. Entretanto, para tal, o consumo final de energia elétrica foi da ordem de 114 kWh por tonelada de cimento produzido, com uma emissão específica *in situ* de 700 kg de CO₂ por tonelada do aglomerante (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

Um grande desafio enfrentado pela indústria do cimento é a busca pela coexistência do desenvolvimento tecnológico com a preservação ambiental. Além do alto gasto energético e emissão de CO₂, há a problemática de exploração das matérias-primas utilizadas, de origem natural, principalmente calcário e argila. Já que o gás carbônico emitido é gerado a partir da calcinação das matérias primas na fabricação do clínquer do cimento, segundo Moir (2003), um meio de minimizar tudo isso é a substituição parcial do clínquer por resíduos industriais ou por materiais de origem natural com fonte renovável. Além de vantagens para o meio ambiente, essa possibilidade de substituição pode melhorar certas propriedades do concreto e, ainda, reduzir seu custo.

Diversos materiais já são utilizados a nível comercial na substituição parcial do clínquer no cimento, tais quais a escória de alto forno, pozolanas naturais e materiais carbonáticos. Há uma busca contínua por novos materiais, que tenham as características necessárias para uso como substituição no cimento. Vários resíduos de origem vegetal, após

tratamento térmico e moagem, já foram estudados nesse sentido, tais quais: casca do arroz (CORDEIRO *et al.*, 2014; PEREIRA *et al.*, 2015), bagaço da cana-de-açúcar (DE PAULA *et al.*, 2010; MORALES *et al.*, 2009; ALTOÉ; MARTINS, 2015), folha da cana-de-açúcar (MORAES, 2015), casca do milho (ADESANYA; RAHEEM, 2009), casca do trigo (MO *et al.*, 2016), casca da cevada (MO *et al.*, 2016), folhas da banana (KANNING *et al.*, 2014), casca da castanha do caju (LIMA; ROSSIGNOLO, 2010) e resíduos da azeitona (CUENCA *et al.*, 2013).

O bambu é um material de origem vegetal com potencial de utilização de suas cinzas em substituição parcial do cimento, nesse contexto. Ele é o recurso natural que se renova em menor intervalo de tempo (JARAMILLO, 2012) e no Brasil, possui a maior diversidade e mais alto índice de florestas endêmicas da América Latina (MURAKAMI, 2007), porém, no país, seu uso ainda é muito incipiente e, excetuando, a produção de papel, destina-se a aplicações tradicionais, como artesanato, vara de pescar, móveis, entre outros (PEREIRA, 2001).

Dwivedi *et al.* (2006), Singh *et al.* (2007) Villar-Cociña *et al.* (2010), Frías *et al.* (2012) e Umoh e Odesola (2015) avaliaram a atividade pozolânica das cinzas provenientes das folhas de bambu, enquanto que Rodier *et al.* (2017) avaliaram a pozolanicidade das cinzas provenientes do colmo. Todas as pesquisas comprovaram a atividade pozolânica desse material, com mais de 50% de sílica e característica amorfa e seu uso como substituto parcial do cimento, sendo capaz de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água e formar materiais mais resistentes

Tendo em vista os problemas ambientais gerados na fabricação do cimento e a incipiente destinação das plantações de bambu no Brasil, objetiva-se, nesse trabalho, a avaliação do potencial de utilização de cinzas do colmo do bambu, da espécie *Bambusa Vulgaris*, como substituição parcial do cimento Portland.

1.2 Justificativa

O uso de cinzas do colmo do bambu como substituto parcial do cimento Portland apresenta diversas vantagens, as quais estão atreladas a incorporação de adição mineral no cimento Portland e a utilização do bambu como matéria-prima.

Adições minerais são materiais finamente divididos adicionados ao cimento, que normalmente possuem origem natural e são usados em sua forma original ou após tratamento

adequado. Ao longo do tempo, vários resíduos industriais transformaram-se nas fontes primárias de adições. A incorporação de adição mineral à composição do cimento Portland possui uma série de benefícios a nível ambiental, econômico e tecnológico. O benefício ambiental principal trata-se da substituição de parte do clínquer Portland pela adição. Sabe-se que para a produção do clínquer, são exploradas jazidas minerais para utilização como matéria-prima. Estas, durante o processo de fabricação, são submetidas a altas temperaturas, ocorrendo a liberação de grande quantidade de gás carbônico e produzindo um alto gasto energético, prejudicando o meio ambiente.

Os cimentos compostos com adições minerais tendem a ser mais baratos, ao substituírem parte do clínquer, que possui elevado custo de fabricação, por materiais de menor custo, beneficiando tanto quem fabrica, quanto quem consome. A nível tecnológico, as adições também proporcionam efeitos positivos no desempenho tecnológico do cimento, tais quais o aumento da resistência mecânica e maior durabilidade.

O uso do bambu como matéria-prima é justificado por tratar-se de um material natural, com fonte renovável e rápido crescimento, além de que, seu cultivo não necessita de solo especial. Os vegetais de rápido crescimento tendem a possuir maior quantidade de sílica do que aqueles de crescimento mais lento. No bambu, a sílica se concentra, principalmente, nas partes mais externas dos colmos.

A sílica destaca-se dentre os componentes inorgânicos do bambu. Logo, ao submeter os colmos do bambu à queima, eliminando a matéria orgânica, o resultado tende a ser a produção de cinzas ricas em sílica. Materiais silicosos, dentre outros fatores, apresentam potencial para serem utilizados como adição mineral pozolânica. A sílica presente nas pozolanas reage com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento Portland e produz materiais mais resistentes, trazendo benefícios técnicos. Mesmo que as cinzas do colmo do bambu não apresentem reatividade significativa quando incorporadas ao cimento Portland, elas podem produzir o efeito físico de densificação da matriz, ao preencher os poros da mistura com material fino inerte.

Portanto, a incorporação de cinzas do colmo do bambu ao cimento Portland beneficia o meio ambiente ao reduzir a quantidade de gases estufa e exploração das matérias-primas gerados na fabricação do clínquer Portland. A incorporação de um material de origem natural com fonte de rápida renovação, pode trazer efeitos positivos no desempenho do aglomerante, tais quais uma maior resistência mecânica e durabilidade. E, por fim, reduz, ainda, o custo do produto final.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o potencial de utilização de cinzas do colmo do bambu (*Bambusa Vulgaris*), calcinadas em três temperaturas distintas (500°C, 600°C e 700°C), como substituição parcial do cimento Portland em pastas e argamassas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) realizar a caracterização física, mineralógica e quanto a pozolanicidade das cinzas provenientes do colmo do bambu nas três temperaturas de queima a fim de determinar a temperatura de calcinação das cinzas do colmo do bambu mais adequada para o beneficiamento do material;
- b) avaliar o comportamento das cinzas do colmo do bambu, a partir das análises mineralógica e termogravimétrica, utilizadas como substituição parcial do aglomerante nos teores de 0, 6, 10 e 14% em pastas;
- c) analisar a influência da incorporação das cinzas do colmo do bambu, utilizadas como substituição parcial do cimento nos teores de 0, 6, 10 e 14%, no estado fresco e endurecido de argamassas, a partir da avaliação da consistência, resistência à compressão e microestrutura.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está dividida em cinco capítulos. Em ordem: introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e discussão e considerações finais. Além das referências bibliográficas.

No primeiro capítulo, introdutório, são abordadas as considerações iniciais, justificativa, objetivos geral e específicos e, por fim, a presente estrutura da dissertação.

A revisão bibliográfica acerca de temas relevantes ao entendimento da pesquisa está disposta no segundo capítulo. São abordados os seguintes tópicos: cimento Portland, adições minerais do cimento Portland, bambu e cinzas de bambu.

No terceiro capítulo, o programa experimental é explicado a partir dos materiais e métodos utilizados na pesquisa.

O quarto capítulo contém a apresentação e discussão dos resultados obtidos na pesquisa, a partir da aplicação dos materiais e métodos delineados no capítulo anterior.

Por fim, no capítulo cinco, o trabalho é encerrado com as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

2.1.1 Conceituação

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido a partir da moagem do clínquer e que usualmente contém sulfato de cálcio. O clínquer é um material parcialmente fundido a partir de um processo de aquecimento em altas temperaturas e constituído, predominantemente, por silicatos de cálcio hidratados (ASTM C219 – 14a, 2014). De modo geral, o cimento Portland pode ser definido como um pó fino com propriedades aglomerantes, que enrijece na presença de água (ABCP, 2002).

2.1.2 A fabricação do cimento Portland

Os insumos para a fabricação do cimento Portland devem prover cálcio e sílica em formas e proporções adequadas. Normalmente, o cálcio advém do calcário e a sílica, da argila. Quartzo e/ou dolomita podem aparecer como impurezas da fonte de cálcio. A argila, por sua vez, contém, também, alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e álcalis, que facilitam na formação dos produtos da hidratação em temperaturas mais baixas. Quando esses minerais de ferro e alumina não estão presentes nas matérias-primas, são incorporados na mistura bruta através da adição de materiais secundários, como bauxita e minério de ferro (MEHTA; MONTEIRO, 2006; TAYLOR, 1997).

As matérias-primas cruas são moídas até a obtenção de um pó muito fino, misturadas em quantidades pré-determinadas e queimadas em um grande forno rotativo em uma temperatura próxima a $1400^{\circ}C$, onde vai ocorrer a sinterização do material e a sua fusão parcial na forma de clínquer. Após o resfriamento, uma determinada quantidade de gipsita (sulfato de cálcio) é adicionada e a mistura é moída mais uma vez, resultando no cimento Portland comercial (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Várias reações químicas ocorrem ao longo do forno. A massa de carvão utilizada para formar uma tonelada de clínquer varia entre 100 kg e 350 kg, dependendo do processo. Também podem ser utilizados gás ou outros combustíveis (NEVILLE; BROOKS, 2013; MEHTA e MONTEIRO, 2006). A reação que requer maior energia é a de descarbonatação do carbonato de cálcio (Equação 2.1), na qual é liberado o dióxido de carbono. Ela acontece em temperaturas entre $700^{\circ}C$ e $1000^{\circ}C$ em uma mistura típica que contém 80% de calcário. A energia gasta na descarbonatação é de, aproximadamente, 400 kcal por quilograma de

clínquer, correspondendo a metade de toda a energia gasta na produção do clínquer (MOIR, 2003).



2.1.3 Características Químicas do cimento Portland

Os quatro principais compostos do cimento Portland são também denominados de minerais do clínquer e suas composições, abreviaturas e nome dos minerais podem ser visualizadas na Tabela 2.1. A denominação abreviada é utilizada pela química de cimento, na qual cada óxido é descrito por uma letra, sendo: CaO = C, SiO₂ = S, Al₂O₃ = A e Fe₂O₃ = F (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tabela 2.1 – Compostos do cimento Portland (NEVILLE; BROOKS, 2013; MOIR, 2003)

Nome do Composto	Composição em óxidos	Nome do mineral	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	Alita	C ₃ S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	Belita	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	Aluminato	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	Ferrita	C ₄ AF

Os silicatos são os compostos mais importantes, pois são os responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. O C₃S constitui de 50% a 70% do clínquer e reage rapidamente com a água, sendo responsável pelo ganho de resistência da mistura até os 28 dias de idade. Enquanto que o C₂S constitui de 15% a 30% do clínquer e reage lentamente com a água, contribuindo pouco com a resistência até os 28 dias. É responsável, entretanto, pelo aumento da resistência em idades mais avançadas (NEVILLE; BROOKS, 2013; TAYLOR, 1997).

O aluminato tricálcico é, ao mesmo tempo, indesejável e benéfico para o cimento Portland. Além de pouco contribuir para a resistência da pasta hidratada, caso a mistura seja atacada por sulfatos, a formação de etringita (sulfoaluminato de cálcio) pode causar a desagregação do concreto. Entretanto, o C₃A facilita a combinação do óxido de cálcio com a sílica. O C₄AF, por sua vez, não afeta significativamente o comportamento do cimento, comparado aos outros três compostos. Porém, ele reage com a gipsita formando sulfoferrito de cálcio, podendo acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Além dos compostos principais, que constituem cerca de 95% do clínquer, há a existência de compostos secundários, tais quais: Na₂O, K₂O, SO₃, MgO, TiO₂, Mn₃O₄ e P₂O₅. O Na₂O e o K₂O são os álcalis do cimento e, assim, como o SO₃ precisam ter seu teor máximo na mistura controlado (PETRUCCI, 1998). Os óxidos de sódio e potássio (Na₂O e K₂O,

respectivamente) podem reagir com alguns agregados, em concretos, e os produtos da reação álcali-agregado podem causar a desintegração da mistura (NEVILLE; BROOKS, 2013). O óxido de magnésio (MgO) pode atuar como expansivo acima de certos limites, podendo ser nocivo a estabilidade de volume da mistura. Os outros óxidos – de titânio (TiO₂), manganês (Mn₃O₄) e o anidrido fosfórico (P₂O₅) – geralmente não são determinados separadamente por encontrarem-se em pequenas quantidades (PETRUCCI, 1998).

A quantidade de gipsita adicionada ao clínquer depende dos teores de C₃A e álcalis. O teor ótimo de sulfato de cálcio é determinado com base no calor de hidratação gerado, de forma que garanta que uma parte das reações iniciais ocorra e que uma pequena quantidade de C₃A esteja disponível após todo o sulfato de cálcio se combinar. Em excesso, esse composto pode causar expansão e desagregação da pasta de cimento endurecida (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Apesar de constituir-se, essencialmente, de vários compostos de cálcio, os resultados da composição química do cimento são rotineiramente expressos em termos dos óxidos de elementos presentes. Para calcular a quantidade dos compostos do cimento são utilizadas uma série de equações desenvolvidas por R. H. Bogue, porém esse processo não é necessário para o controle de rotina (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

As porcentagens de resíduo insolúvel e perda ao fogo são comumente identificados nas análises químicas do cimento. O resíduo insolúvel é uma medida da adulteração do cimento decorrente, principalmente, de impurezas na gipsita. Já a perda ao fogo, indica a extensão da carbonatação e hidratação da cal e do magnésio livres devido a exposição ao ar (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.4 Hidratação do cimento Portland

A hidratação do cimento, nada mais é, que a transformação de compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis. Durante esse processo, ocorre a formação de uma camada de gel ao redor dos grãos dos compostos anidros, assim, na zona de transição – zona intermediária entre o cristal primário e o gel – a solução é supersaturada em relação aos compostos hidratados (PETRUCCI, 1998).

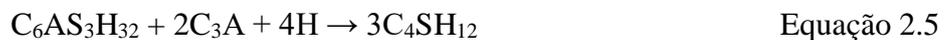
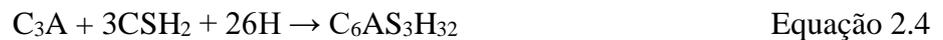
Sabe-se que os silicatos (C₃S e C₂S) são os principais compostos do cimento. O C₃S se hidrata muito mais rápido que o C₂S, porém com produtos similares. Como produto da hidratação dos silicatos tem-se o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um composto hidratado microcristalino, e o hidróxido de cálcio na forma cristalina (NEVILLE; BROOKS, 2013). As

reações de hidratação dos silicatos (equações 2.2 e 2.3) estão descritas a seguir, de acordo com as abreviações explicadas anteriormente e onde “H” corresponde ao H₂O.



A área superficial elevada e, conseqüentemente, a propriedade adesiva da pasta de cimento hidratada devem-se, essencialmente, à formação do C-S-H (METHA; MONTEIRO, 2006). O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada e pode ser responsável por problemas de durabilidade, ao ser, facilmente, lixiviado pela água. Tal lixiviação aumenta a porosidade da mistura e a torna vulnerável ao ataque de agentes nocivos (AITCIN, 2000).

O aluminato tricálcico reage rapidamente com a água e chega a uma estrutura cristalina estável após formar composições intermediárias. A gipsita, adicionada ao clínquer com o propósito de retardar ou, pelo menos, inibir parcialmente as reações extremamente rápidas do C₃A, reage com este composto e forma o sulfoaluminato de cálcio, etringita (equação 2.4), que produz uma camada de baixa permeabilidade na superfície do aluminato tricálcico e impede a rápida hidratação do composto. A etringita é altamente instável e se converte em cristais de monossulfoaluminato de cálcio hidratado (equação 2.5). O C₃A que não foi hidratado nas idades iniciais pode ainda formar aluminatos de cálcio hidratados (equação 2.6), porém estes podem se converter para fases mais estáveis (equação 2.7). Essa reação ocorre em poucos dias em condições normais. A hidratação do C₄AF é análoga ao do C₃A, porém mais lenta (MOIR, 2003).



As reações de hidratação são exotérmicas e a quantidade de calor (em joules) por grama de cimento anidro até a hidratação completa a uma dada temperatura é definida como calor de hidratação. Para os cimentos Portland mais usados, aproximadamente metade do calor de hidratação é liberado entre o primeiro e o terceiro dia, três quartos em sete dias e cerca de 90% em seis meses. O calor de hidratação depende da composição química do

cimento e pode ser comparada a soma dos calores de hidratação individuais de cada composto (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.1.5 Microestrutura da pasta de cimento hidratada

Microestrutura, nada mais é, que a estrutura de um material aumentada obtida por microscópio. Com um microscópio eletrônico de baixa ampliação (200 μm) é possível visualizar que uma pasta de cimento hidratada não possui estrutura homogênea, apresentando áreas bastante densas e outras, altamente porosas. Maiores ampliações nas áreas porosas permitem visualizar os produtos de hidratação do cimento de forma individual. Como exemplo, na Figura 2.1 é possível distinguir maciços cristais de portlandita, longas e finas agulhas de etringita e pequenos cristais fibrosos de C-S-H nas ampliações de 2000x e 5000x (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

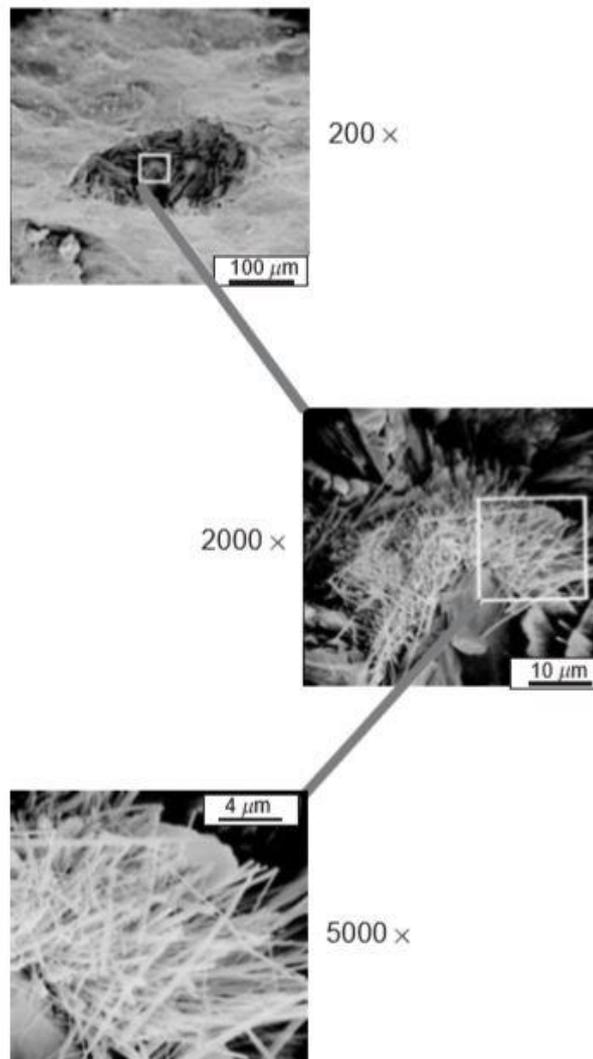


Figura 2.1 – Microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada (MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Quando o cimento Portland é disperso em água, os primeiros cristais formados, com poucos minutos de hidratação, são os de etringita (Figura 2.4a), com forma de agulha. Horas depois, grandes cristais prismáticos de portlandita (Figura 2.4b) e cristais muito pequenos de C-S-H (Figura 2.4c) começam a preencher os espaços anteriormente vazios ocupados pela água e partículas de cimento dissolvidas. Após alguns dias, dependendo da proporção de alumina e sulfatos na composição do cimento, a etringita pode se tornar instável e decompor-se formando monosulfoaluminato de cálcio hidratado (Figura 2.4a), que possui formas de placas hexagonais. Essa morfologia de mineral é também característica dos aluminatos de cálcio hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Na Figura 2.3 é ilustrada uma representação dos cristais presentes na pasta hidratada de cimento.

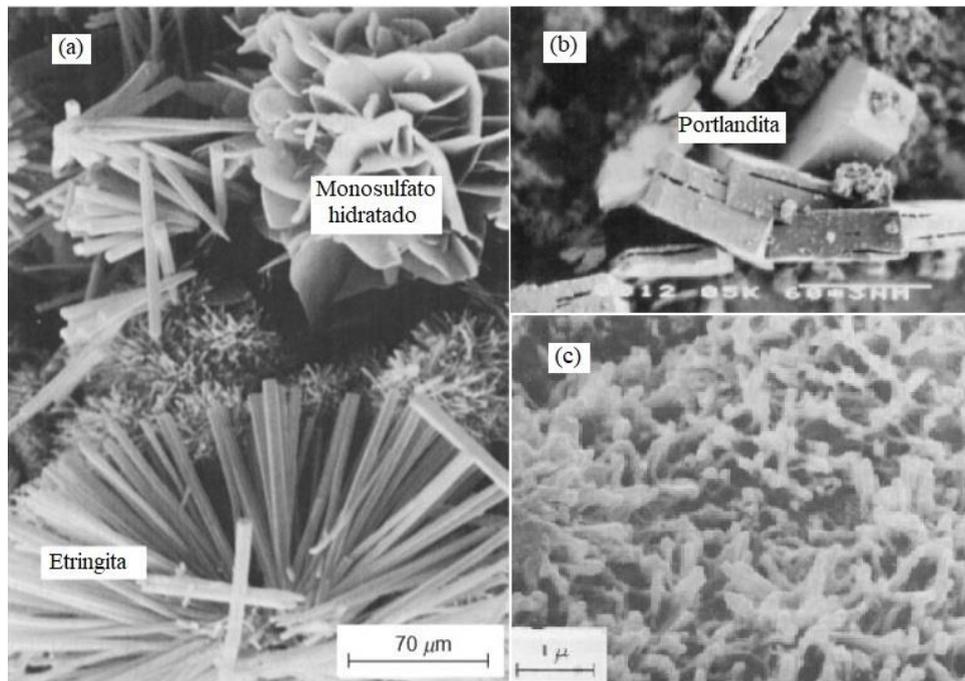


Figura 2.2 – Microestrutura do cimento hidratado (a) Cristais de etringita e monosulfato hidratado; (b) Cristais de portlandita; (c) Formação do C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2006 adaptado)

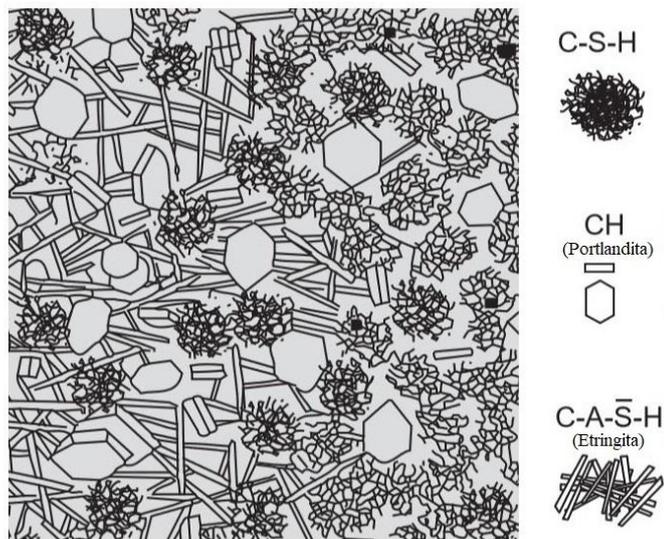


Figura 2.3 – Ilustração da microestrutura da pasta de cimento Portland hidratada (METHA; MONTEIRO, 2006 adaptado).

O C-S-H corresponde entre 50% e 60% do volume sólido da pasta de cimento completamente hidratada e é, portanto, a fase mais importante e determinante das propriedades da pasta. O C-S-H é um composto não definido, por isso utiliza-se o hífen em sua nomenclatura. A proporção entre cálcio de sulfato pode variar de 1,5 a 2,0 e o teor de água quimicamente ligada varia ainda mais. A morfologia do C-S-H também varia de simples fibras cristalinas a redes reticulares. Devido às suas dimensões coloidais e tendência ao agrupamento, os cristais de C-S-H só puderam ser desvendados com o advento da microscopia eletrônica. As literaturas antigas referiam-se a esse composto como gel de C-S-H. Apesar da estrutura interna desse cristal continuar desconhecida, anteriormente assumia-se que ele possuía estrutura semelhante a do mineral natural tobermorita e, por isso, é, ainda, chamado de gel de tobermorita (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

2.1.6 Técnicas usadas para estudar a hidratação do cimento Portland

Segundo Moir (2003), algumas das técnicas usadas no estudo da hidratação do cimento Portland são: análise térmica, difração de raios-x e microscópio eletrônico de varredura. Sendo que, a análise térmica é mais comumente realizada a partir da análise termogravimétrica.

Na análise termogravimétrica, uma pequena amostra de cimento hidratado é posicionada em uma termobalança e a variação de massa é registrada conforme a amostra é aquecida a uma taxa controlada de temperatura. A partir dessa técnica é possível determinar a proporção de hidratos presentes na amostra. A etringita e a portlandita, por exemplo, podem ser quantitativamente avaliadas (MOIR, 2003).

A análise por difração de raios-x é rápida, entretanto, fornece informações limitadas. É possível avaliar a portlandita e a etringita, que possuem cristais bem definidos. Entretanto, o C-S-H e o monossulfatoaluminato de cálcio são pouco cristalinos e fornecem padrões de difração mal definidos (MOIR, 2003).

A microscopia eletrônica por varredura (MEV) é uma técnica de análise poderosa e pode envolver técnicas semelhantes à fluorescência de raios-x para determinar a composição química dos hidratos presentes no campo de visão. A alta resolução do MEV permite estudar a microestrutura da pasta de cimento hidratada em concretos ou argamassas. No entanto, deve-se ter cautela ao interpretar as imagens, pois a preparação da amostra e o vácuo requerido pela maioria dos microscópios podem gerar características que não estão presentes na pasta úmida (MOIR, 2003).

2.1.7 Tipos de cimento Portland no Brasil

A mistura de clínquer e material regulador de pega, normalmente a gipsita, corresponde ao cimento Portland comum. Entretanto, existem diversos tipos de cimento, que diferem na sua composição por possuírem distintos tipos e quantidades de adições. Estas são outras matérias-primas que são adicionadas ao clínquer na fase de moagem, podem ser escórias de alto-forno, materiais pozolânicos ou materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui normas específicas para cada tipo de cimento, as quais devem ser seguidas por todas as fábricas produtoras desse aglomerante no Brasil. A classificação dos principais tipos de cimento, segundo a ABNT, pode ser visualizada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição dos principais tipos de cimento

Tipo	Sigla	Composição (% em massa)				Norma
		Clínquer + gesso	Escória (sigla E)	Pozolana (sigla Z)	Filer (sigla F)	
Comum	CP I	100	-	-	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95	-	1-5	-	
	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	
Composto	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	NBR 11578
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Existem, ainda, outros tipos de cimento que são consumidos em menor escala, por possuírem características especiais de aplicação. São eles: cimento Portland resistente aos sulfatos, cimento Portland branco, cimento Portland branco de baixo calor de hidratação e cimento Portland para poços petrolíferos (ABCP, 2002).

O tipo de cimento é escolhido, normalmente, a partir da disponibilidade do mercado e ao fim a que será destinado, ou seja, às propriedades desejadas. Os cimentos são, também, divididos em classes, de acordo com a resistência mínima aos 28 dias, que pode ser: 25 MPa, 32 MPa ou 40 MPa (ABCP, 2002). De maneira comparativa, observa-se na Figura 2.4 a evolução média da resistência dos principais tipos de cimento Portland.

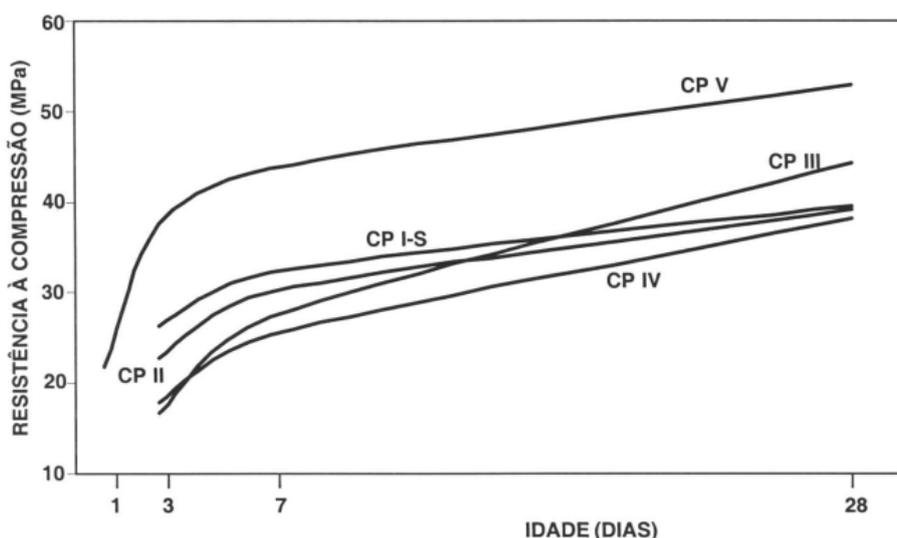


Figura 2.4 – Evolução da resistência dos principais tipos de cimento (ABCP, 2002)

Os distintos cimentos apresentados diferem-se na sua composição química, variando a quantidade de clínquer e adições minerais que os compõe. Dependendo do tipo e quantidade de adições minerais, os concretos e argamassas produzidos a partir deles apresentaram diferentes melhorias em suas propriedades.

2.2 Adições minerais do cimento Portland

2.2.1 Definição e tipos de adições

Adições minerais são materiais finamente divididos adicionados ao cimento. Materiais de origem natural são muito usados em sua forma original ou após tratamento. E, ainda, devido questões econômicas e ambientais, vários resíduos industriais transformaram-se nas fontes primárias de adições (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Dentre os principais tipos de cimento Portland utilizados, estão o CP II, o CP III e o CP IV. O CP II é o cimento Portland composto e apresenta pequenas quantidades de adições minerais, que segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), podem ser materiais pozolânicos, escória granulada de alto-forno e/ou materiais carbonáticos (fíler). Os CP III e CP IV possuem maiores quantidades de escória e pozolanas, respectivamente, do que os CP II, que podem ter pequenas quantidades de escória, pozolana ou fíler na composição química.

A escória granulada de alto-forno difere dos materiais pozolânicos, pois possui propriedades aglomerantes na presença de água, já as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água formando compostos resistentes, não possuindo propriedades aglomerantes por si só. Os materiais carbonáticos agem fisicamente na mistura e também podem ser chamados de “fíler” (ABCP, 2002).

De modo geral, as adições proporcionam redução nos custos de produção do cimento ao substituírem uma parcela do clínquer por materiais de menor custo energético. Além do viés econômico, as adições minimizam os impactos ambientais gerados na produção do clínquer Portland, ao reduzir a quantidade de CO₂ emitido e a exploração das jazidas de calcário. De modo geral, as adições também proporcionam efeitos positivos no desempenho tecnológico do cimento, porém de variadas formas dependendo da classificação (escória, pozolana ou fíler).

2.2.2 Fíler

São denominados de fíler, os materiais finamente divididos e quimicamente inertes, ou seja, sem atividade química, que causam o efeito físico de empacotamento granulométrico (GOBBI, 2014). Alguns exemplos são o fíler calcário, o fíler quartzoso e o pó de pedra (DAL MOLIN, 2011).

O fíler deve ter, aproximadamente, a mesma finura do cimento Portland e devido as suas propriedades físicas apresenta alguns efeitos benéfico nas propriedades de concretos, tais quais na trabalhabilidade, densidade, permeabilidade, capilaridade ou exsudação. Apesar de geralmente inerte, é vantajoso que possa apresentar propriedades hidráulicas sem causar prejuízo (NEVILLE, 2015).

O efeito fíler dá-se a partir da maior compactação da mistura devido a inclusão de partículas finas e ultrafinas de aditivo mineral. Partículas mais finas de cimento Portland, teoricamente, poderiam proporcionar o mesmo efeito físico, entretanto, na presença de água,

elas se dissolvem rapidamente, tornando ineficiente o efeito de densificação da mistura (MALHOTRA; MEHTA, 1996).

A adição de partículas extremamente finas ao cimento Portland também resulta em uma aceleração das reações de hidratação, pois elas se alojam nos interstícios dos cristais de clínquer, aumentando a superfície efetiva de contato (CORDEIRO, 2006). Um efeito adverso, entretanto, é a diluição. Quanto menos cimento, menos produtos resistentes formados na hidratação do cimento (LAWRENCE *et al.*, 2003).

O fíler calcário é proveniente das rochas calcárias e é essencial que ele seja uniforme e finamente dividido. O fíler quartzoso, por sua vez, é proveniente de material silicoso com elevado grau de moagem (GOBBI, 2014).

2.2.3 Pozolanas

Os materiais pozolânicos são definidos como materiais silicosos ou silico-aluminosos com pouca ou nenhuma propriedade aglomerante, mas que ao serem finamente divididos e na presença de água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades hidráulicas (ABNT, 1990).

As pozolanas naturais são materiais vítreos e amorfos, normalmente de origem vulcânica. Os materiais vulcânicos resultam da explosão do magma e são formados com o seu resfriamento, eles contêm mais de 50% de sílica, além de alumina, óxido de ferro e cal, mas normalmente possuem mais de 10% de álcalis. As pozolanas naturais também podem ser materiais sedimentares ou diagenéticos. Os primeiros, tem origem nos esqueletos de organismos, compostos de opala, e possuem um alto teor de sílica, mas são, frequentemente, contaminados com argila. Os materiais diagenéticos derivam da erosão de rochas silicosas e são ricos em sílica no estado amorfo e, normalmente, possuem baixo teor de outros óxidos (LEWIS *et al.*, 2003).

A origem das pozolanas pode, também, ser artificial, como, por exemplo, em usinas de energia que utilizam carvão como combustível e fornos metalúrgicos produtores de ferro fundido, metais silicosos e ligas de ferro-silício. Esses resíduos quando despejados em áreas de terra, próximo a córregos, geram um grande desperdício de material, além de um grave problema ambiental (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A reutilização desses materiais como substituição parcial do cimento Portland gera além da economia energética já relatada na produção do cimento, um fim para esses resíduos que seriam despejados no meio ambiente.

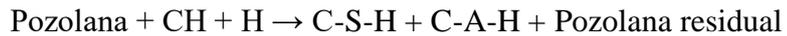
Os materiais pozolânicos no Brasil, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014) são divididos em três classes: N, C e E. A classe N diz respeito às pozolanas naturais e artificiais, a classe C refere-se às cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em usinas termoelétricas e a E, por fim, engloba as outras pozolanas que não se encaixam nas classes anteriores. Os requisitos químicos e físicos, segundo a mesma norma, estão dispostos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Requisitos dos materiais pozolânicos (ABNT, 2014)

Requisitos Químicos	Classe do material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%
SO ₃	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%
Teor de umidade	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%
Perda ao fogo	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5%	≤ 1,5%	≤ 1,5%
Requisitos Físicos			
Material retido na peneira 45 µm	< 20%	< 20%	< 20%
Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

As pozolanas naturais mais utilizadas são provenientes de cinzas vulcânicas (pumicina, opalina, micas e calcedônias), terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada. Enquanto que os materiais pozolânicos artificiais mais comuns são a sílica ativa, subproduto das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício; a cinza volante, proveniente da queima do carvão mineral em termoelétricas; e a cinza da casca de arroz, resíduo de engenhos e olarias agrícolas (MORAES, 2001).

A atividade pozolânica se refere às reações que ocorrem entre os constituintes ativos dos materiais pozolânicos, a água e a cal (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Sendo que os principais constituintes ativos dos materiais pozolânicos são a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃) quando na forma amorfa (CORDEIRO, 2006). De modo geral, a reação pozolânica ocorre quando as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, formando produtos resistentes, tais quais o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e/ou o silico-aluminato de cálcio hidratado (S-A-C-H) (TASHIMA, 2006). A reação pozolânica pode ser resumida conforme a equação 2.8, na qual a pozolana residual atuaria apenas como fíler (CORDEIRO, 2009).



Equação 2.8

De modo geral, para que as pozolanas consigam reagir com o hidróxido de cálcio, formando materiais resistentes semelhantes aos formados na hidratação do cimento Portland, elas devem possuir alto teor de SiO_2 ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ser um material fino e ser, predominantemente, amorfo (TASHIMA, 2006; HEWLETT, 2008).

A sílica é um mineral polimórfico, ou seja, sua estrutura cristalina pode sofrer modificações com a variação da temperatura e pressão externa. Existem três formas cristalinas principais para a sílica: quartzo, cristobalita e tridimita (CALLISTER, 2010). A estrutura da fase amorfa, por sua vez, é metaestável, apresentando a tendência de cristalizar-se. Caso a sílica amorfa seja mantida em temperaturas acima de 870°C por muito tempo, recristaliza-se na forma de cristobalita e, eventualmente, tridimita (GRIMSHAW, 1971). O quartzo é a forma mais estável e comum da sílica, ocorrendo sob condições de temperaturas mais baixas (DEER *et al.*, 1992). O entendimento do polimorfismo dos silicatos contribui na escolha da temperatura de calcinação de materiais pozolânicos que passam por tratamento térmico.

Dentre os benefícios da incorporação das pozolanas ao cimento Portland, três aspectos se destacam. Primeiramente, a reação torna-se mais lenta, possuindo uma baixa liberação de calor de hidratação, resultando em menos problemas de fissuração por conta da retração. Em segundo lugar, o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, que pouco contribuiria para a resistência do mesmo e, ainda, poderia causar problemas na durabilidade, será consumido pela reação pozolânica. E, por fim, tem-se a distribuição do tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados. Os produtos da reação pozolânica preenchem eficientemente os espaços capilares da pasta hidratada, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema (CORDEIRO, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além dos benefícios relacionados à química da reação pozolânica, as pozolanas possuem, ainda, um efeito físico nas misturas com cimento Portland. A densidade da mistura aumenta, devido ao efeito microfíler, ocorrendo o preenchimento de vazios pelas minúsculas partículas do material pozolânico, que normalmente é mais fino que o cimento. Há o refinamento da estrutura dos poros e dos produtos da hidratação do cimento, pois os pequenos cristais formados preenchem os espaços deixados pela hidratação do cimento Portland. Em concretos, ocorre ainda a densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (DAL MOLIN, 2011).

2.3 Bambu

2.3.1 Aspectos Gerais

Os bambus pertencem a subfamília Bambusoideae da família Poaceae, e dividem-se em três tribos, Arundinarieae, Bambuseae e Olyreae (SORENG *et al.*, 2015). A maioria das espécies de bambu se desenvolve em temperaturas entre 8°C e 36°C e se distribuem naturalmente por todos os continentes, exceto o europeu. A Ásia possui a maior parte das espécies nativas, cerca de 62%, seguida das Américas (34%), África (4%) e Oceania (4%) (GUARNETTI, 2013). A distribuição geográfica dos bambus no mundo pode ser visualizada na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Distribuição geográfica dos bambus no mundo (EEOB, 2018 adaptado)

No Brasil, há 258 espécies de bambus distribuídos em duas tribos, Bambuseae e Olyreae, e 35 gêneros, sendo que 12 gêneros e 175 espécies são endêmicos. A tribo Bambuseae possui maior porte, colmos lignificados e lenhosos, além de conter 18 gêneros e 165 espécies, enquanto que a tribo Olyreae apresenta bambus herbáceos de menor porte divididos em 17 gêneros e 93 espécies (FILGUEIRAS; VIANA, 2017; GUILHERME *et al.*, 2017). As espécies mais comuns no país são: *Bambusa vulgaris vittata* (bambu imperial), *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa tuldoides* (bambu-comum), *Dendrocalamus giganteus* (bambu-gigante ou bambu-balde) e algumas espécies do gênero *Phyllostachys*. Sendo de origem asiática, essas espécies foram trazidas pelos primeiros imigrantes e foram disseminadas por todo o país, devido à boa adaptação ao clima tropical brasileiro (TEIXEIRA, 2006).

Embora o Brasil seja o país com maior diversidade de espécies de bambu lenhosos das Américas, com 81% dos gêneros (LONDOÑO, 2004), sua exploração é, ainda, pequena frente a sua versatilidade. Países como a Colômbia e o Equador usam o bambu como material de

construção popular, além de utilizá-lo em agroindústrias, potencializando o desenvolvimento rural. Apesar da exploração de bambu no Brasil ser objeto da Lei nº 12.484 de 8 de setembro de 2011 - a qual estimula o seu cultivo e manejo sustentável - há, ainda, a carência de maior aporte tecnológico para a produção de colmos com padrão para comercialização. A própria Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMCB) reconhece que há a necessidade de muito investimento na cadeia produtiva do bambu para que ele seja valorizado como produto agro-silvo-cultural eficiente como fonte de renda para a agricultura familiar (GUILHERME *et al.*, 2017).

Sendo considerado um dos principais produtos florestais não madeiráveis, o bambu é uma alternativa propícia à madeira em atividades que buscam o desenvolvimento sustentável, já que possui capacidade de sequestrar rapidamente carbono atmosférico, além de possuir excelentes características físicas e mecânicas (FAO, 2007; BONILLA *et al.*, 2010). Segundo Mognon *et al.* (2017), o maior estoque de carbono, nos bambus se concentra nos colmos, seguido dos galhos e folhas, respectivamente, e essa quantidade também varia de acordo com a espécie.

O uso do bambu como matéria-prima apresenta diversas vantagens sob variados aspectos. O primeiro deles seria seu rápido crescimento, já que leva um tempo muito menor que qualquer árvore para atingir seu crescimento, cerca de 4 a 5 anos. Apresenta também plantio, colheitas e manutenções consideradas fáceis, já que não há a necessidade de uso de pesticidas e fertilizantes em seu plantio, a colheita é feita de forma manual e o transporte é favorecido por ser um material mais leve que a madeira. Também é considerada vantagem a versatilidade do bambu, o qual possui diversas aplicações, como combustível, na fabricação de papel, na construção civil e nos setores de alimentos e têxtil. Ao substituir a madeira, o bambu diminui, ainda, o impacto ambiental causado pelo desflorestamento, além de contribuir para a diminuição da erosão do solo (PEREIRA, 2001)

2.3.2 Morfologia

Em relação à morfologia, o bambu pode ser dividido em raiz, caule, folhas e inflorescências (Figura 2.6). O caule possui uma porção subterrânea, chamada de rizoma, e outra aérea, denominada colmo. Os colmos são formados por nós, entrenós e gemas. As folhas são constituídas por bainha e lâmina. As flores são agrupadas em pequenas inflorescências denominadas espiguetas e os frutos são denominados cariopse (FILGUEIRAS; VIANA, 2017). Apesar de serem caracterizados como gramíneas, os bambus possuem hábito arborescente, ou seja, apresentam parte aérea e subterrânea (GUARNETTI, 2013).

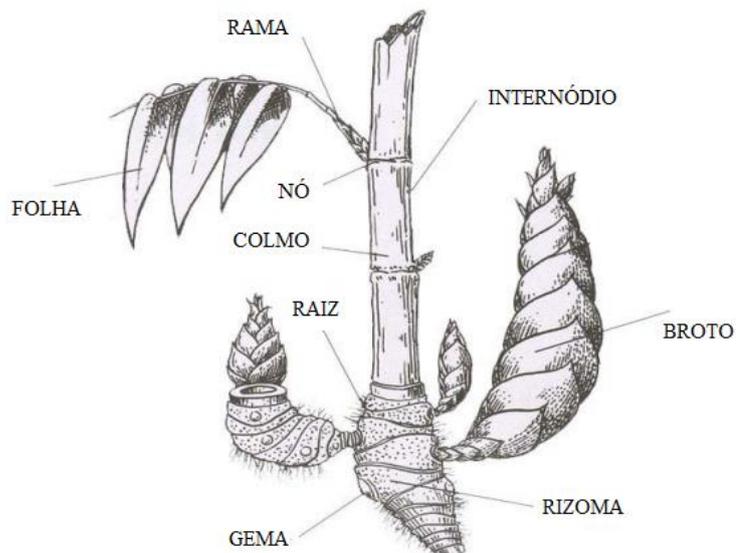


Figura 2.6 – Morfologia externa do bambu (NMBA, 2004 *apud* OLIVEIRA, 2013 adaptado)

Os bambus formam os bambuzais, um tipo de maciço florestal, apesar de não serem árvores. Estes bambuzais são renovados a partir da brotação de novos colmos pelos rizomas, a qual ocorre anualmente, continuamente no mesmo período. Caso haja luz, espaço e os nutrientes necessários, a cada ano podem nascer até dez novos colmos de uma moita. Diferentemente com o que ocorre nas árvores, os colmos dos bambus permanecem com o mesmo diâmetro por toda a vida, crescendo apenas verticalmente. De modo geral, o colmo (Figura 2.7) é cilíndrico, oco e separado transversalmente pelo diafragma, que externamente é representado pelo nó, local de nascimento dos ramos e das folhas (GUARNETTI, 2013).

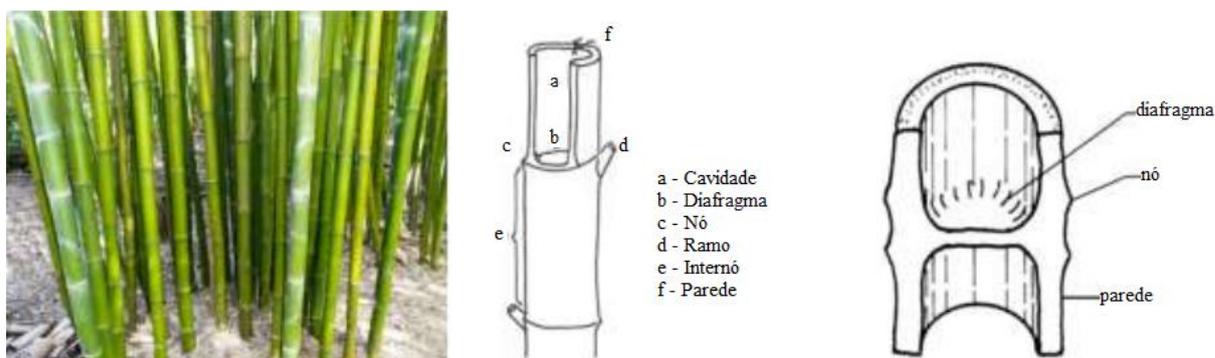


Figura 2.7 – Colmo de bambu da espécie *Bambusa Vulgaris* (GUARNETTI, 2013)

O rápido crescimento do bambu deve-se à eficiência com que realiza a fotossíntese, sendo que as folhas são as responsáveis por esse processo. Estas crescem em galhos na forma de lâminas de folhas caulinares, onde conectam-se às bainhas, em forma de haste. Uma folha sobrevive cerca de 2 anos e quando seca, a haste quebra e a bainha continua conectada ao nó do colmo. Constantemente, as folhas depositam-se no solo, após a queda, estocando material

orgânico que contribui para a eliminação de plantas invasoras e diminui o custo do cultivo (GUARNETTI, 2013).

2.3.3 Composição Química

A composição química do bambu é semelhante à da madeira, diferenciando-se por possuir maiores teores de extratos alcalinos, cinzas e sílica (HIGUCHI, 1981). Dentre os principais constituintes do colmo estão a celulose, cerca de 55%, lignina, aproximadamente 25%, e hemicelulose, próximo a 20%, além de resinas, ceras e sais inorgânicos, em menor escala (LIESE, 1998).

O teor de cinzas do bambu, ou seja, de componentes inorgânicos, pode variar de 0,8% a 9,7%, com maiores valores para as regiões nodais em relação às intermodais. Os componentes inorgânicos do bambu consistem em sílica, cobre, zinco, ferro, potássio, cálcio, magnésio, manganês, entre outros. A sílica é o principal constituinte da epiderme e consiste em pequenos cristais de dióxido de silício, localizando-se principalmente nas menores células epidérmicas e apresentando-se em maior quantidade nas partes mais externas dos colmos (LIESE, 1998).

2.3.4 Aplicações

Segundo López (2003), o bambu foi o material utilizado pelo homem pré-histórico para construção da sua habitação e dos utensílios essenciais a sua sobrevivência. Nas Américas, o uso do bambu desde a época pré-colombiana foi confirmado por Ubidia (2001). Graça (1988) comenta que o primeiro filamento de lâmpada elétrica foi feito de bambu, assim como o primeiro avião também era composto dessa planta.

É fato que o bambu possui um extenso e variado potencial de utilização, que vai desde o consumo de seus brotos como alimento até seu uso como matéria-prima para a construção civil. Atualmente, o bambu vem sendo utilizado na indústria farmacêutica, no cultivo de bactérias, como biomassa, em tecidos, em cordas, na produção de papel, em artesanato, em objetos, em móveis, na construção civil e rural, na engenharia de alimentos, entre outros (FERMIANO et al., 2002 *apud* TEIXEIRA, 2006).

Os colmos dos bambus podem substituir plásticos e metais, devido às suas excelentes propriedades físicas e mecânicas. Possuem, ainda, características como leveza, força, dureza, flexibilidade e facilidade de trabalho, que garantem o potencial para uso em diferentes propósitos tecnológicos (PEREIRA, 1997 *apud* GUARNETTI, 2013).

Na construção civil, o bambu surge como uma matéria-prima sustentável, já que é um recurso renovável de rápido crescimento, que pode substituir os recursos naturais não-renováveis ou de lenta renovação utilizados, como madeira, aço, agregados do concreto, entre outros. As características estruturais do bambu, além da sua estética e relação resistência-peso garantem sua larga aplicação na arquitetura e construção. Entre seus atributos, destacam-se também seu potencial como isolante térmico e acústico. Em projetos populares, o uso bambu apresenta uma economia de cerca de 50% em relação ao uso de materiais convencionais, apresentando, ainda, uma qualidade superior à dos materiais utilizados nas construções populares (ARAGÃO, 2015).

Inspirado pela busca de um desenvolvimento sustentável, Ghavami (2005) aborda possíveis aplicações do bambu como reforço em elementos estruturais de concreto. O autor afirma a viabilidade de uso do bambu como substituto do aço no concreto armado, devido às suas características físicas e mecânicas, apontando a necessidade de garantir a durabilidade desse material.

O bambu já é utilizado como matéria-prima em diversos setores a nível mundial, no Brasil, entretanto, a utilização desse material ainda está se consolidando. Nos estados de Pernambuco e Maranhão há a utilização de bambu na produção de celulose e papel. Já nos setores de construção civil e de móveis, a utilização ainda é informal. A laminação, apesar de ser um setor em potencial, apresenta um estágio de desenvolvimento lento, necessitando de um maior investimento em pesquisa (MANHÃES, 2008).

Existem, entretanto, algumas iniciativas, no Brasil, para a aplicação do bambu em construção de casas populares, tal qual o Instituto Bambu, em Alagoas, o qual possui um projeto de construção de casas populares utilizando um “microconcreto” com bambu e raspas de pneus, reduzindo em 40% o custo em relação a uma casa convencional. E, ainda, o Projeto Cantoar, espaço-instituição da Universidade de Brasília, que pesquisa sobre arquitetura e matérias-primas de origem vegetal, principalmente o bambu (MANHÃES, 2008).

Recentemente, no Brasil, o bambu vem sendo explorado como biomassa em caldeiras, ou seja, é queimado para a obtenção de vapor a ser utilizado em processos industriais (GUARNETTI, 2013). A maior parte da biomassa dessa gramínea se concentra no colmo (50-70%), seguida pelas raízes e rizomas (15-20%) e folhas e ramos (15-20%) (LIESE, 1998).

16 mil hectares de bambu da espécie *Bambusa Vulgaris* são explorados, no Maranhão, pelo grupo João Santos, voltados à produção de biomassa. O cultivo foi implantado há

décadas e nunca houve a necessidade de replantio. O grupo Penha explora 3 mil hectares, na Bahia, da mesma espécie, também visando fins energéticos ao utilizar a biomassa na forma de cavacos queimados em caldeira para obtenção de vapor utilizado no processo de reciclagem de papel (GUARNETTI, 2013).

Balduino Junior et al. (2016) avaliaram o potencial energético de colmos de bambu provenientes de Florianópolis, para uso comercial e doméstico. Foram utilizados colmos da espécie *Bambusa vulgaris* avaliados na forma natural e como carvão vegetal. Os autores concluíram que a espécie estudada possui potencial para energia nas duas formas avaliadas, sendo a forma natural destinada às caldeiras, de uso comercial, e o carvão para uso doméstico. Dessa forma, o bambu poderia substituir as espécies madeireiras usadas para estes fins na região sul do Brasil.

2.3.5 *Bambusa Vulgaris*

A espécie *Bambusa Vulgaris* é natural da Ásia e chegou ao Brasil por intermédio dos portugueses, sendo difundida no país e utilizada em fazendas para diversos fins (BALDUINO JUNIOR *et al.*, 2015). Essa espécie se destaca a nível nacional, sendo utilizada nos programas de reflorestamento, principalmente na região nordeste, ocupando entre 35.000 e 40.000 hectares destinados à produção de celulose de fibra longa (TOMAZELLO FILHO; AZZINI, 1987)

Segundo o National Tropical Botanic Garden (2014, *apud* BALDUINO JUNIOR *et al.*, 2015), a espécie *Bambusa Vulgaris* consta na lista de espécies de bambu prioritárias para pesquisa no mundo. Essa espécie possui alta taxa de crescimento, curto período de renovação sob diversas condições de solo e clima e fácil propagação (SUN *et al.*, 2013).

2.4 Cinzas de bambu

2.4.1 Cinzas de bambu e a sustentabilidade

O bambu é, provavelmente, o recurso natural e material de construção com mais rápido crescimento e maior rendimento disponível à espécie humana. Entretanto, a aplicação do bambu também gera resíduos. Em alguns países, quantidades significativas de bambu são processadas, gerando um alto volume de resíduos sólidos. No próprio Brasil, a produção de papel consome cerca de 500.000 toneladas por ano de bambu cultivado, gerando 190.000 toneladas de resíduos agrícolas, os quais normalmente são queimados a céu aberto, gerando um impacto negativo ao meio ambiente (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2010).

Há uma busca contínua, nas indústrias cimentícias, pela diminuição do custo de produção e do consumo de matérias-primas, proteção do meio ambiente e melhoria de qualidade do produto final. O uso de materiais de baixo custo, tal qual o bambu, como substituição parcial do clínquer do cimento seria um meio de alcançar os objetivos dispostos (DWIVEDI *et al.*, 2006).

A escassez de recursos naturais e/ou a crise econômica atual geraram uma tendência de busca de adições minerais alternativas para a produção de cimentos compostos ecoeficientes (FRÍAS *et al.*, 2012). A adição de cinzas derivadas da combustão de resíduos sólidos agrícolas vem sendo uma prática frequente devido a reatividade das cinzas com a portlandita gerada durante a hidratação do cimento Portland (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2010). As cinzas da casca do arroz e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar já estão em uso na indústria da construção como adições em cimentos compostos (SINGH *et al.*, 2007).

Os cimentos compostos, muitas das vezes, apresentam melhores propriedades que o cimento comum. Esse tipo de cimento reduz a energia consumida na indústria, protege a atmosfera e reduz a quantidade de hidróxido de cálcio durante a hidratação, transformando-o em compostos resistentes (SINGH *et al.*, 2007).

Dentre os componentes inorgânicos do bambu, destaca-se a sílica, a qual está presente em maior quantidade nas paredes mais externas do colmo (LIESE, 1998). As pozolanas, por sua vez, caracterizam-se por serem materiais ricos em sílica na forma amorfa (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Diante disso, eliminando a matéria orgânica, as cinzas do bambu apresentam grande quantidade de sílica e dependendo da forma e temperatura de queima, característica amorfa.

2.4.2 Produção das cinzas: processos térmico e físico

Para serem usadas como adições minerais pozolânicas, os resíduos agrícolas necessitam passar por um processo de ativação, o qual tem influência direta nas propriedades pozolânicas das cinzas produzidas e conseqüentemente na performance dos cimentos compostos por elas (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018). Esse processo de ativação refere-se à queima que os materiais são submetidos para produção das cinzas.

Dwivedi *et al.* (2006), Singh *et al.* (2007), Villar-cociña *et al.* (2010) e Umoh e Odesola (2015) produziram cinzas provenientes da folha do bambu a partir da calcinação por um tempo de retenção de 2 horas em mufla elétrica sob temperatura constante de 600°C.

Todos os autores obtiveram como resultado cinzas com potencial pozolânico, entretanto a escolha do tratamento térmico não foi discutida.

Frías *et al.* (2012) também utilizaram, como temperatura de calcinação de cinzas da folha do bambu, 600°C e o processo também se deu em mufla elétrica, o tempo de retenção escolhido, todavia, foi de 1,2 horas. Os autores concluíram que as cinzas avaliadas são consideradas como material pozolânico adequado, entretanto as características da cinza são atribuídas a diferentes fatores, além das condições de calcinação, tais quais a origem do material (Pirassununga, no estado de São Paulo), a composição química e a natureza amorfa apresentada.

Villar-cociña *et al.* (2018) observaram que as pesquisas realizadas com as cinzas da folha do bambu, presentes nos periódicos, apontavam a temperatura de 600°C como a mais adequada do ponto de vista energético. Entretanto, os autores em questão acreditavam que havia a necessidade de explorar outras temperaturas de calcinação, sendo avaliadas tanto do ponto de vista energético, como técnico. Para tal, foram produzidas por esses pesquisadores cinzas provenientes de três temperaturas de queima distintas: 500°C, 600°C e 700°C. As cinzas foram produzidas em mufla elétrica sob temperatura constante, durante 2 horas. Entretanto, antes de serem submetidas à calcinação em mufla, o material foi submetido à uma temperatura de 400°C durante 60 minutos em forno elétrico para retirada do material orgânico. Os resultados apontaram para a formação de sílica cristalina na forma de cristobalita nas amostras produzidas a 700°C e, como consequência, as amostras, a 500°C e 600°C mostraram-se mais reativas que à 700°C e sem diferença significativa entre si. Portanto, a possibilidade de redução da temperatura de queima das cinzas provenientes da folha do bambu de 600°C para 500°C foi uma descoberta bastante relevante a nível energético e técnico.

Rodier *et al.* (2017) produziram cinzas provenientes do colmo do bambu a partir do processo de calcinação em mufla elétrica sob temperatura constante de 600°C durante 3 horas. Como conclusão, os autores apontaram que os resultados obtidos sugeriram cinzas com quantidade significativa de sílica e material amorfo, sendo caracterizadas como pozolânicas a partir dos ensaios realizados. Na atual literatura, não foram identificados outros estudos acerca da produção e caracterização de cinzas do colmo do bambu para utilização como adição mineral do cimento Portland.

Costa *et al.* (2004) submeteram amostras de *Bambusa vulgaris*, na forma de serragem, aos ensaios de termogravimetria (TG), juntamente com a termogravimetria

derivada (DTG), para avaliar o potencial desse material como carvão mineral. As curvas TG e DTG obtidas em atmosfera de ar (Figura 2.8) mostraram que ocorreu 9,6% de perda de massa entre 25°C e 120°C, devido a evaporação da água. Já entre 120°C e 400°C ocorreu uma perda mais significativa, de aproximadamente 65%, que seria devido a decomposição térmica do bambu, fase na qual ocorre a formação de carbono elementar. Ocorreu ainda uma perda de massa de 24,63% até os 550°C, que seria atribuída à oxidação do carbono e formação de cinzas, com um teor de 1,3%.

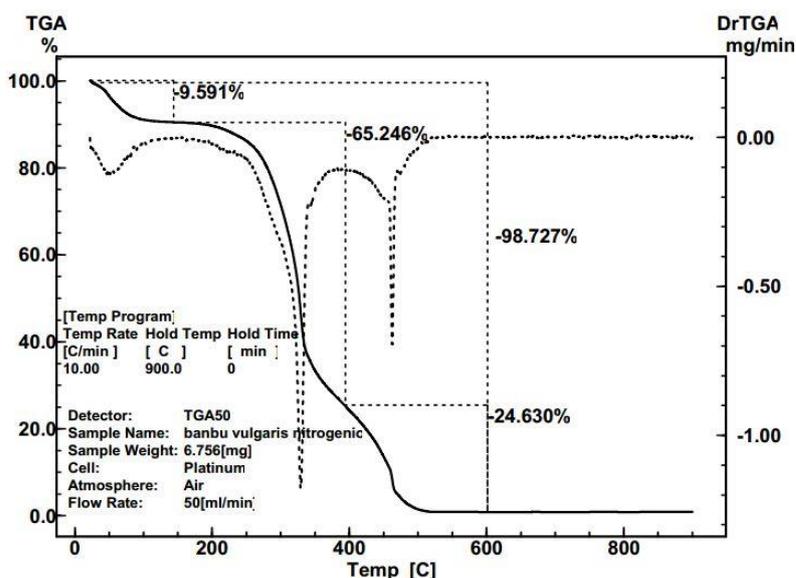


Figura 2.8 – Curvas TG e DTG da serragem de bambu *Bambusa vulgaris* (COSTA *et al.*, 2004)

Rambo *et al.* (2015) avaliaram diferentes biomassas lignocelulósicas a partir da análise termogravimétrica, em atmosfera de nitrogênio, e dentre elas, o bambu na forma de pó. Os autores comprovaram que as diversas biomassas avaliadas, inclusive o bambu, possuem um comportamento típico de degradação térmica apresentando três etapas bem definidas. Entre 50°C e 100°C ocorre a liberação da umidade, no intervalo de 250°C a 400°C os carboidratos (hemicelulose e celulose) se decompõem e acima de 400°C há uma degradação contínua e lenta associada a lignina, ocorrendo a formação de carvão e cinzas ao final do processo. Na Figura 2.9 podem ser visualizadas as DTG sobrepostas das biomassas avaliadas. Pode-se visualizar que a partir dos 400°C todas as biomassas avaliadas apresentam constância de massa, sugerindo um comportamento semelhante, por exemplo, entre a casca de arroz e o bambu quando submetidos a altas temperaturas.

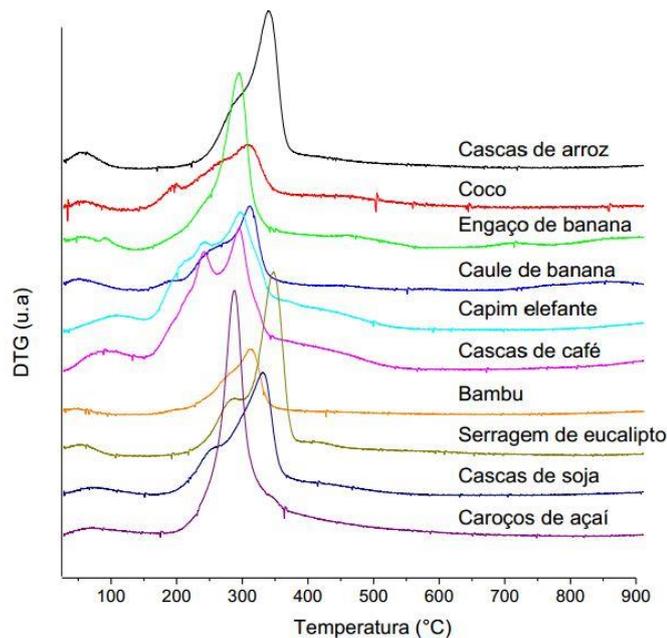


Figura 2.9 – Análises termogravimétricas (DTG) de biomassas sobrepostas (RAMBO *et al.*, 2015)

Payá *et al.* (2001) observaram que na produção das cinzas da casca do arroz, quando a temperatura de combustão atingia valores superiores a 600°C, a cinza apresentava certo caráter cristalino e quanto maior essa temperatura, mais fases cristalinas surgiam. Além disso, os autores afirmam que o tempo de queima também influencia na reatividade da cinza, tempos muito longos geram cinzas com baixa reatividade. Logo, devem ser utilizados tempos de queima relativamente curtos.

Ao avaliar o índice de amorfismo, ou seja, a quantidade de material amorfo, em cinzas da casca do arroz produzidas em distintas temperaturas de queima, Cordeiro (2009) percebeu que quanto maior a temperatura de queima, menor a quantidade de material amorfo nas cinzas. A autora afirma que apesar de importante para as reações pozolânicas, o índice de amorfismo não é o único fator que influencia o aumento da resistência à compressão de matrizes cimentícias contendo as cinzas, dependendo, esta, também, do diâmetro das partículas.

Ao produzir cinzas de casca de arroz a partir de diferentes temperaturas de calcinação, na faixa entre 500°C e 1100°C, Pinheiro (2016) observou uma característica predominantemente amorfa a 500°C, com pequenos picos de quartzo, e um material cristalino, com picos de alta intensidade a 1100°C. A transição de fases foi observada nas amostras de 800°C e 900°C, pois a primeira apresentou alto teor de sílica amorfa, enquanto a segunda, baixo teor, explicado pelo polimorfismo da sílica. O autor denominou as amostras de forma

que a de 600°C foi caracterizada como alto teor de sílica amorfa (maior que 70%), a de 900°C, com teor intermediário (entre 20% e 70%) e da 1100°C, baixo teor (menor que 20%).

Segundo Tashima (2006), há uma associação entre a coloração das cinzas e seu grau de amorfismo. As cinzas amorfas tendem a ser mais escuras e as cristalinas mais claras. O autor explica que quanto maior a temperatura de queima, menor a quantidade de carbono presente na cinza, que resulta na mudança de coloração. Quanto menor a quantidade de carbono, mais clara é a cinza e a quantidade desse elemento influencia na absorção de água, pois as moléculas de carbono são extremamente finas, aumentando essa característica.

De Paula (2006) afirma que na calcinação de vegetais, nos quais a sílica presente é naturalmente amorfa, a utilização de temperaturas próximas ao ponto de fusão provoca a aglomeração de partículas e a recristalização da sílica. O autor explica que para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, até os 100°C ocorre a perda de massa por evaporação da água absorvida; a queima propriamente dita inicia a partir dos 350°C com a ignição do material mais volátil; na faixa entre 400°C e 500°C, o carbono residual é oxidado, ocorrendo a perda mais substancial de massa e após essa etapa a cinza torna-se predominantemente amorfa; a partir dos 700°C, pode ocorrer a formação de quartzo e outras formas cristalinas; acima dos 800°C as cinzas tornam-se, predominantemente, cristalinas. Em relação à finura, Isaia (1995 apud DE PAULA, 2006) considera que apenas partículas abaixo de 15 µm possuem atividade pozolânica.

Cordeiro (2006) observou que o emprego de cinzas do bagaço da cana de açúcar sem moagem não se mostrou apropriado, pois estas apresentaram baixa atividade pozolânica e granulometria grosseira. Enquanto que as cinzas ultrafinas provenientes do mesmo material melhoraram as propriedades do concreto no estado fresco e possibilitaram a manutenção das propriedades mecânicas do concreto, tendo um menor consumo de cimento; as cinzas sem moagem comprometeram a resistência do concreto ao deixá-lo com a estrutura muito porosa. Portanto, a moagem é necessária para ativar as reações químicas, que aumentam proporcionalmente à superfície específica do material, e para conferir maior compacidade à mistura.

2.4.3 Características das cinzas de bambu

Na Tabela 2.4 estão dispostas as composições químicas dessas cinzas, determinadas por análise de fluorescência de raios-x, caracterizadas por diversos autores (DWIVEDI *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2007; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; FRÍAS *et al.*, 2012; UMOH;

ODESOLA, 2015; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018, RODIER *et al.*, 2017). Percebe-se que apesar de ser um material natural, que apresenta diferenças em sua composição química dependendo do seu local de origem, idade, características do solo, condições climáticas, entre outros, o bambu ao ser transformado em cinzas apresenta, de modo geral, como principal óxido, em sua composição, o SiO₂.

Tabela 2.4 – Característica química das cinzas de bambu

Autores	T ¹ (°C)	t ² (h)	Composição Química das cinzas de folha de bambu (%)										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PF ³
Dwivedi <i>et al.</i> (2006)	600	2	75,90	4,13	1,22	7,47	1,85	5,62	0,21	0,20	-	-	-
Singh <i>et al.</i> (2007)	600	2	75,90	4,13	1,22	7,47	1,85	5,62	0,21	0,20	-	-	-
Villar- Cociña <i>et al.</i> (2011)	600	2	80,40	1,22	0,71	5,06	0,99	1,33	0,08	-	0,56	0,20	8,04
Frías <i>et al.</i> (2012)	600	1,2	78,71	1,01	0,54	7,82	1,83	3,78	0,05	0,08	0,99	-	3,83
Umoh <i>et al.</i> (2015)	600	2	72,25	4,08	1,97	4,23	1,01	3,15	-	0,35	0,74	0,22	2,93
Villar- Cociña <i>et al.</i> (2018)	500	2	71,77	0,10	0,92	3,93	3,07	-	0,37	-	1,65	-	8,55
Villar- Cociña <i>et al.</i> (2018)	600	2	73,90	0,13	0,11	4,51	3,53	-	0,43	-	2,01	-	4,14
Villar- Cociña <i>et al.</i> (2018)	700	2	74,70	0,15	0,21	4,48	3,23	-	0,56	-	1,87	-	3,98
Autor	T ¹ (°C)	t ² (h)	Composição Química das cinzas de colmo de bambu (%)										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	PF ³
Rodier <i>et al.</i> (2017)	600	3	68,74	0,15	0,16	11,92	5,83	0,54	0,74	-	-	-	0,42

Legenda: ¹Temperatura de calcinação; ²tempo de calcinação; ³Perda ao fogo.

A mineralogia das cinzas da folha do bambu possui característica amorfa quando calcinadas a 600°C por duas horas (DWIVEDI *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2007; VILLAR-

COCIÑA *et al.*, 2010). Villar-Cociña *et al.* (2018) verificou que as cinzas da folha do bambu calcinadas a 500°C e 700°C também possuem característica amorfa, a partir da análise de difração de raios-x (Figura 2.10). As cinzas do colmo do bambu calcinadas a 600°C por três horas caracterizadas por Rodier *et al.* (2017) também apresentaram halo amorfo bem definido, no difratograma de raios-x (Figura 2.11).

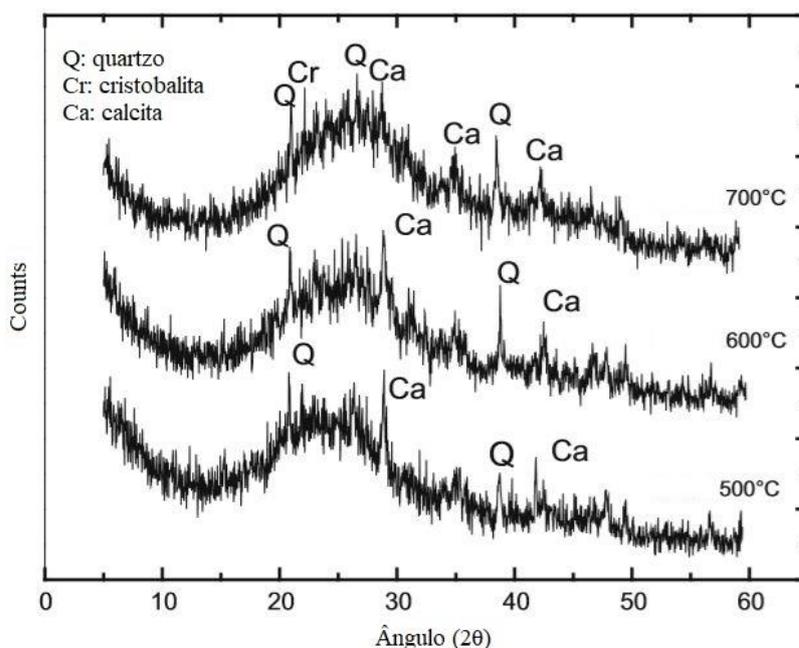


Figura 2.10 – Difratomogramas de raios-x de cinzas das folhas de bambu calcinadas a 500 °C, 600°C e 700 °C (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018)

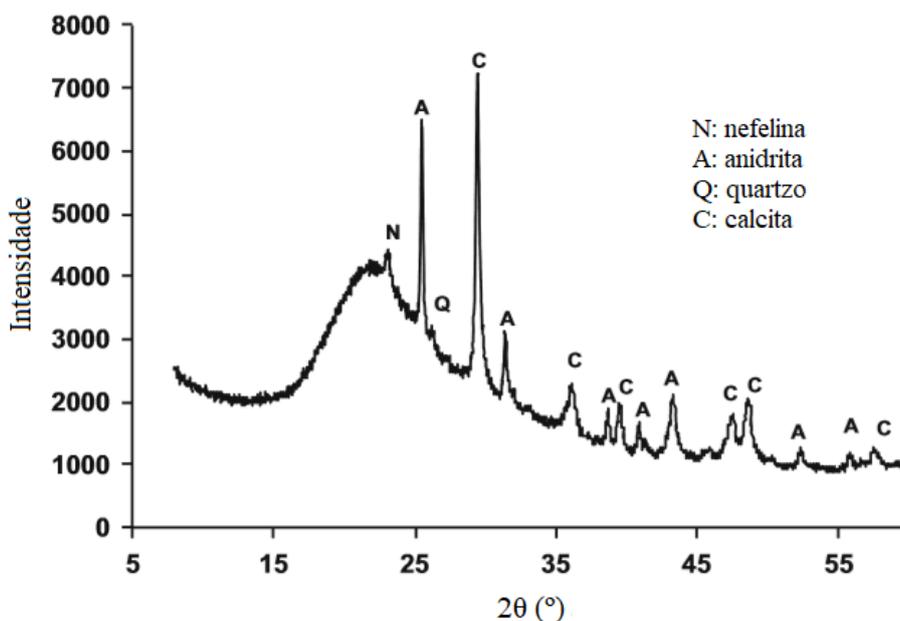


Figura 2.11 – Difrátograma de raios-x de cinza do colmo de bambu calcinada a 600°C por 3 horas (RODIER *et al.*, 2017)

As cinzas de bambu supracitadas, tanto provenientes das folhas (DWIVEDI *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2007; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2010; FRÍAS *et al.*, 2012; UMOH; ODESOLA, 2015; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018), quanto do colmo (RODIER *et al.*, 2017) apresentaram características de material pozolânico. Os materiais pozolânicos contém sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) reativas, normalmente na forma amorfa, que são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (portlandita), produzido durante a hidratação do cimento Portland, e formar C-S-H e/ou aluminato de cálcio hidratado adicionais (LEWIS *et al.*, 2003).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos precisam ser finamente divididos para reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água. Villar-cociña *et al.* (2018) e Rodier *et al.* (2017) submeteram as cinzas pós-calcinação a moagem em moinho de bolas para diminuir e uniformizar o diâmetro dos grãos. Em relação às características físicas das cinzas de colmo de bambu, Rodier *et al.* (2017) encontraram valores de massa específica, diâmetro médio e finura Blaine na ordem de 2,25 g/cm³, 11,36 µm e 14,852 cm²/g, respectivamente.

2.4.4 Substituição parcial do cimento Portland por cinzas de bambu

As cinzas de bambu, de modo geral, tendem a possuir características comuns às pozolanas, a partir da caracterização por ensaios físicos, químicos e mineralógicos ((DWIVEDI *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2007; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; FRÍAS *et al.*, 2012; UMOH; ODESOLA, 2015; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018; RODIER *et al.* 2017). Espera-se, então, que esse material se comporte como uma adição mineral do tipo pozolânica quando utilizada em substituição parcial ao cimento Portland.

Frías *et al.* (2012) analisaram a resistência à compressão de argamassas com 0%, 10% e 20% de substituição de cimento Portland por cinzas de folha de bambu. Os autores perceberam que as cinzas demandaram uma quantidade maior de água na mistura. As argamassas com 10% e 20% de substituição demandaram 19% e 46% de água a mais, respectivamente, que a argamassa com cimento puro para uma mesma consistência. Em relação ao tempo de pega, não houve diferença significativa entre as misturas. As argamassas possuíam traço 1:3 (aglomerante:areia) e relação água-cimento de 0,5 e foram moldadas na forma de cubos com 4 x 4 x 16 cm de dimensão. Aos 7 dias de idade, as argamassas com substituição apresentaram um pequeno decréscimo na resistência à compressão em relação à argamassa de controle, de 1,2% e 6,7% para 10% e 20% de substituição, respectivamente. Aos 28 e 90 dias de cura, respectivamente, a diminuição na resistência para as argamassas

com 10% e 20% de substituição foram de 1% e 2,8% em relação à argamassa sem cinzas. Ou seja, praticamente não houve diferença entre as resistências.

Rodier *et al.* (2017) avaliaram, entre outros materiais, o comportamento de pastas e argamassas com 10% de substituição do cimento por cinzas de colmo de bambu em comparação a misturas com 100% de cimento puro. A partir da análise termogravimétrica das pastas aos 7 dias de idade, foi possível quantificar o hidróxido de cálcio das misturas aos 7, 28 e 90 dias. Apesar de aumentar com o tempo, a quantidade de hidróxido de cálcio na pasta com 10% de bambu foi menor que na pasta de referência em todas as idades. Sendo que aos 90 dias, a pasta com substituição apresentou 17,27% de hidróxido de cálcio, enquanto que a pasta sem substituição apresentou 22,29% desse composto, evidenciando, portanto, que a portlandita reagiu com as fases ativas da cinza de colmo de bambu. As argamassas foram avaliadas quanto à resistência à compressão, sendo que a argamassa com substituição de cimento pelas cinzas apresentou 80% da resistência da argamassa de referência aos 7 e 28 dias.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho foi realizado em quatro etapas. A primeira etapa foi a de produção das cinzas do colmo do bambu (CCB) a partir da calcinação em três temperaturas distintas e, posterior, moagem. Subsequentemente, a segunda etapa consistiu na caracterização das cinzas a fim de verificar suas propriedades mineralógicas, físicas e pozolânicas e, a partir de então, determinar a temperatura de calcinação mais adequada para sua utilização como substituto parcial do cimento Portland. A terceira etapa consistiu na análise do cimento parcialmente substituído pelas cinzas do colmo do bambu, a partir da produção de pastas. Por fim, na etapa final, foram produzidas argamassas, utilizando as cinzas como substitutas parciais do cimento, que foram avaliadas no estado fresco e endurecido. Na Tabela 3.1 estão descritas as etapas e métodos aplicados no programa experimental.

Tabela 3.1 – Programa experimental

Delimitação da Pesquisa	Equipamento / Método	Material / Amostras
1 Produção das CCB: Calcinação (500°C, 600°C e 700°C) Moagem (1 h, 2 h, 4 h, 6 h e 8 h)	Mufla Elétrica Moinho de Bolas	Serragem do colmo do bambu CCB500, CCB600 e CCB700 ¹
2 Caracterização das CCB: Análise granulométrica Determinação da massa específica Análise mineralógica Pozolanicidade	Granulometria a laser NBR 16605 (ABNT, 2017) Difração de raios-x NBR 5752 (ABNT, 2014)	CCB500, CCB600 e CCB700 CCB500, CCB600 e CCB700 CCB500, CCB600 e CCB700 CCB500, CCB600 e CCB700
3 Avaliação em pastas: Mineralogia das pastas Termogravimetria das pastas	Difração de raios-x Curvas TG/DTG ⁴	PCB0, PCB6, PCB10 e PC14 ² PCB0, PCB6, PCB10 e PC14
4 Comportamento de argamassas: Consistência (estado fresco) Resistência à compressão Microestrutura	NBR 7215 (ABNT, 1996) NBR 7215 (ABNT, 1996) MEV ⁵	ACB0, ACB6, ACB10 e AC14 ³ ACB0, ACB6, ACB10 e AC14 ACB0, ACB6, ACB10 e AC14

Legenda:

¹cinzas do colmo do bambu calcinadas à 500°C, 600°C e 700°C, respectivamente.

²pastas com 0%, 6%, 10% e 14% de cinzas de bambu, respectivamente.

³argamassas com 0%, 6%, 10% e 14% de cinzas de bambu, respectivamente.

⁴curvas termogravimétrica e termogravimétrica derivada.

⁵microscópio eletrônico de varredura.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados dois tipos de cimento nessa pesquisa. Para a determinação do índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias foi utilizado o cimento Portland

composto com fíler, CP II-F, com classe de resistência 32, conforme prescrito pela NBR 5752 (ABNT, 2014). Nas outras matrizes cimentícias avaliadas, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, por ser o cimento mais puro (maior quantidade de clínquer), dentre os disponíveis na região, possibilitando a realização de análises mais precisas quanto ao comportamento das cinzas do colmo do bambu utilizadas em substituição parcial ao cimento. As massas específicas dos dois cimentos foram determinadas conforme o ensaio prescrito na NBR 16605 (ABNT, 2017) e estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Massas específicas dos cimentos utilizados na pesquisa

Tipo de Cimento	Massa Específica (g/cm³)
CP II-F-32	3,08
CP V-ARI	2,99

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi areia de origem quartzosa, proveniente de leitos de rios próximos a região metropolitana de Belém. O agregado passou por um processo de secagem prévio em estufa, para que sua umidade não interferisse na relação água/cimento das argamassas. A caracterização da areia utilizada está disposta na Tabela 3.3, sendo que a massa específica foi determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), a massa unitária e o índice de vazios segundo o prescrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006) e o módulo de finura, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 3.3 – Características do agregado miúdo utilizado na pesquisa

Massa Específica	Massa Unitária	Índice de Vazios	Módulo de Finura
2,57 g/cm ³	1,61 g/cm ³	37,35%	1,95

Segundo a curva granulométrica (Figura 3.1), obtida segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), a areia utilizada na pesquisa se enquadra na zona utilizável inferior, caracterizando-se como um material bastante fino. De modo geral, agregados mais finos tendem a demandar uma maior quantidade de água para que a argamassa produzida apresente consistência adequada para a moldagem.

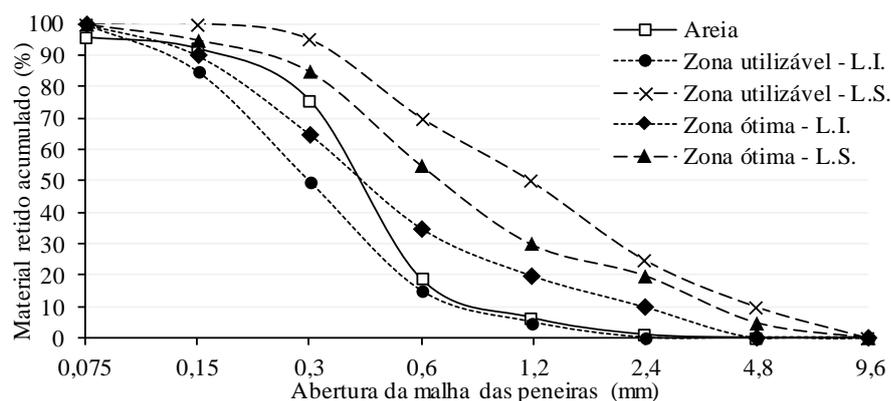


Figura 3.1 – Curva granulométrica da areia e limites das zonas ótima e utilizável, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.1.3 Água de amassamento

Utilizou-se, para a produção das matrizes cimentícias, água potável proveniente da Cidade Universitária Professor José da Silveira Netto (Campus da UFPA em Belém), sendo fornecida pela estação de tratamento de água própria.

3.1.4 Cinzas do colmo do bambu (CCB)

O bambu utilizado para a produção das cinzas pertence a espécie *Bambusa Vulgaris*, proveniente da região metropolitana de Belém. Os colmos deste material foram fornecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – Amazônia Oriental cortados em pedaços de aproximadamente 1 metro de comprimento (Figura 3.2a), devido a maior facilidade de transporte. Previamente à produção das cinzas, os colmos foram cortados em pedaços menores, com ferramentas manuais, e, posteriormente, submetidos a um moinho de facas e martelo na Central de Extração da Faculdade de Química da UFPA, do qual foi retirado com aspecto de serragem (Figura 3.2b).



(a)

(b)

Figura 3.2 – (a) Colmos de bambu; (b) Bambu moído

O bambu moído foi transformado em cinzas a partir do processo de calcinação, realizado em um forno mufla microprocessado (Figura 3.3) com 3720W de potência e 220V de voltagem, na Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da UFPA. Os colmos de bambu foram calcinados em três temperaturas distintas – 500°C, 600°C e 700°C - em vistas de correlacionar a temperatura de calcinação com que as cinzas do colmo do bambu foram produzidas e as suas respectivas características físicas e mineralógicas. As cinzas foram nomeadas conforme a Tabela 3.4.



Figura 3.3 – Forno mufla utilizado na pesquisa

Tabela 3.4 – Nomenclatura das cinzas do colmo de bambu

Nomenclatura das cinzas	Temperatura de calcinação
CCB500	500°C
CCB600	600°C
CCB700	700°C

Para todas as temperaturas, o bambu moído permaneceu duas horas sob temperatura constante. Foram utilizados quatro recipientes de porcelana para que o material fosse depositado no interior da mufla, evitando que houvesse contaminação. O resfriamento foi lento, realizado dentro da própria mufla, a qual foi aberta após 24 horas de seu desligamento.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização das cinzas do colmo do bambu

As CCB500, CCB600 e CCB700 foram submetidas a uma série de análises para determinação de suas propriedades mineralógicas, físicas e pozolânicas. Tais análises permitiram determinar o potencial de uso das CCB em matrizes de cimento Portland.

3.2.1.1 Análise granulométrica

A moagem, ao diminuir o tamanho dos grãos, aumenta a superfície específica do material, possibilitando um aumento nas reações químicas e conferindo maior compacidade à mistura. As cinzas do colmo do bambu foram submetidas à moagem em moinho de bolas (Figura 3.4) horizontal, no LEMAC do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, após o processo de calcinação. Empregou-se a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg de cinzas, sendo 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, conforme a metodologia utilizada por Pouey (2006). As cinzas foram moídas nos tempos de 1, 2, 4, 6 e 8 horas e, posteriormente, submetidas à análise de granulometria a laser.



Figura 3.4 – Processo de moagem das cinzas do colmo do bambu

A metodologia da análise por granulometria à laser consistiu na inserção de 1 g de material em 7 ml de água destilada, a qual foi pipetada em uma unidade de dispersão que também utiliza água como líquido de suspensão. Utilizou-se um analisador de partículas a laser modelo Analysette 22 Micro Tec Plus da marca Fritsch GmbH, com intervalo de medida de 0,08 a 2000 μm , para gerar as curvas granulométricas das cinzas. Essa análise foi realizada no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações do Instituto de Geociências da UFPA.

3.2.1.2 Determinação da massa específica

A determinação da massa específica foi realizada no LEMAC do laboratório de Engenharia Civil da UFPA, conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), que estabelece o método para determinação da massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó a partir do frasco volumétrico de Le Chatelier. Essa propriedade, definida pela norma supracitada como “massa da unidade de volume do material”, é calculada a partir do deslocamento do líquido (não reagente) no interior do recipiente com a introdução de uma massa conhecida do

material ensaiado. O ensaio foi realizado em cada uma das amostras, produzidas com diferentes temperaturas de calcinação, duas vezes.

Foram utilizados, como equipamentos, frasco volumétrico de Le Chatelier, balança com resolução de 0,01 g, recipiente para mensurar a massa das CCB, funis auxiliares de barra longa e curta e banho termorregulador. O frasco foi enchido, com auxílio do funil de barra longa, com querosene até o nível compreendido entre as marcas zero e 1 cm³, posteriormente, o interior do frasco acima desse nível foi seco e o equipamento colocado em banho de água, na posição vertical, submerso durante 30 min, equalizando a temperatura do líquido no frasco e do banho. A primeira leitura foi registrada (V₁).

Aproximadamente 50 g das CCB foram introduzidas no frasco com auxílio do funil de barra curta, evitando a ocorrência de aderência de material na parede do frasco. A leitura final (V₂) foi registrada após o frasco permanecer no banho de água, novamente, por 30 min. A massa específica foi calculada a partir da equação 3.1, sendo “p” a massa específica da amostra ensaiada e “m” a massa de CCB utilizada no ensaio.

$$\rho = \frac{m}{(V_2 - V_1)} \quad \text{Equação 3.1}$$

3.2.1.3 Análise mineralógica

A mineralogia das cinzas foi determinada a partir da análise por difratometria de raios x (DRX). Os raios x são um tipo de radiação eletromagnética, que possui alta energia e curto comprimento de onda, na ordem dos espaçamentos atômicos dos sólidos. A difração de raios x consiste na incidência de radiação em uma amostra pulverizada, onde os ângulos nos quais a difração ocorre são identificados pelo difratômetro. Esses ângulos de difração se relacionam com a distância entre os planos dos materiais cristalinos presentes na amostra de acordo com a Lei de Bragg (equação 3.2), sendo “n” um número inteiro referente à ordem de reflexão, “λ” o comprimento de onda do raio X, “d” a distância entre os planos dos cristais e “θ” a distância entre o feixe incidente e o refratado. O aparelho gera um difratograma, relacionando a intensidade do feixe difratado com o ângulo 2θ (ângulo de difração), quando a condição de difração de Bragg é satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos, ocorrem picos de alta intensidade, identificados por seus índices de planos (CALLISTER; RETHWISCH, 2010).

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Equação 3.2}$$

A análise foi realizada no Laboratório de Pesquisa da Faculdade de Física da UFPA, em um difratômetro modelo D8 ADVANCE da marca BRUKER, e foi utilizado o software High Score Plus para identificação dos minerais nos picos dos difratogramas. As condições para realização da análise foram: i) radiação: Cu K α ; ii) tensão: 40 kV; iii) corrente: 40 mA; iv) varredura com passo de 0,02° 2 θ ; v) tempo por passo: 0,3 s; vi) intervalo de varredura: 5 a 60° (2 θ); vii) fenda divergente: 0,6 mm; viii) fenda Soller: 2,5°; ix) filtro: K β de Ni.

3.2.1.4 Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias

O índice de desempenho com o cimento Portland foi verificado conforme o prescrito na NBR 5752 (ABNT, 2014). Esse método avalia a pozolanicidade dos materiais a partir do ensaio de compressão simples em argamassas. Foram preparadas quatro argamassas, em misturador mecânico, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), e descritas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Composição das argamassas para avaliação da pozolanicidade das CCB

Argamassa	CP II-F-32 (g)	CCB500 (g)	CCB600 (g)	CCB700 (g)	Areia (g)	Água (g)
IAP:REF	624,00	-	-	-	1872,00	374,40
IAP:CCB500	468,00	156,00	-	-	1872,00	374,40
IAP:CCB600	468,00	-	156,00	-	1872,00	374,40
IAP:CCB700	468,00	-	-	156,00	1872,00	374,40

Terminada a mistura, as argamassas foram submetidas ao ensaio de consistência (Figura 3.5a) de acordo com o anexo B da mesma norma. Foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos, de 50 x 100 mm, para cada uma das argamassas (Figura 3.5b). Após 28 dias, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão (Figura 3.6), segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), em máquina de ensaio modelo DL200 da marca EMIC, com velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. O índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias foi calculado conforme a equação 3.3 (ABNT, 2014), para cada uma das argamassas, sendo “ f_{cB} ” a resistência à compressão aos 28 dias da argamassa com substituição do cimento e “ f_{cA} ” a da argamassa IAP:REF. Para que o material ensaiado seja considerado pozolânico, esse índice deve ser maior ou igual a 90%, de acordo os requisitos físicos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.3}$$



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) Ensaio de consistência em argamassa; (b) Moldes com argamassas com CCB



Figura 3.6 – Ensaio de compressão em argamassa

3.2.2 Análise do cimento parcialmente substituído por CCB em pastas

Após a caracterização das CCB500, CCB600 e CCB700, foi definida a cinza do colmo do bambu que apresentou características mais promissoras para a aplicação como substituto parcial do cimento Portland. Para que seja possível entender o efeito das CCB na hidratação desse aglomerante, foram produzidas pastas com teores de substituição do cimento pelas CCB baseados no cimento Portland composto, conforme NBR 11578 (ABNT, 1991). Os produtos da hidratação das pastas foram estudados a partir de análises mineralógica e termogravimétrica.

3.2.2.1 Produção das Pastas

As pastas foram produzidas com cimento Portland CP V-ARI e CCB em teores variados, conforme Tabela 3.6, e a relação água/aglomerante foi mantida constante, igual a 0,40. Os percentuais de substituição foram baseados no cimento tipo CP II-Z, conforme a

NBR 11578 (ABNT, 1991). Na data das análises, as amostras foram fragmentadas e moídas. O pó resultante foi passado na peneira com abertura de 0,075 mm e o material passante foi armazenado e destinado aos ensaios (Figura 3.7).

Tabela 3.6 – Teores de cimento e CCB nas pastas

Pastas	PCB0	PCB6	PCB10	PCB14
CCB (%)	0	6	10	14
CP V-ARI (%)	100	94	90	86



Figura 3.7 – Pastas pulverizadas destinadas às análises.

3.2.2.2 Mineralogia das pastas

As pastas produzidas foram submetidas à análise de DRX nas idades de 28 e 56 dias, as amostras podem ser visualizadas na Figura 3.8. A análise foi realizada no Laboratório de Pesquisa da Faculdade de Física da UFPA, em um difratômetro modelo D8 ADVANCE da marca BRUKER, e foi utilizado o software High Score Plus para identificação dos minerais nos picos dos difratogramas. As condições para realização da análise foram: i) radiação: Cu K α ; ii) tensão: 40 kV; iii) corrente: 40 mA; iv) varredura com passo de 0,02° 2 θ ; v) tempo por passo: 0,3s; vi) intervalo de varredura: 5 a 60° (2 θ); vii) fenda divergente: 0,6 mm; viii) fenda Soller: 2,5°; ix) filtro: K β de Ni.

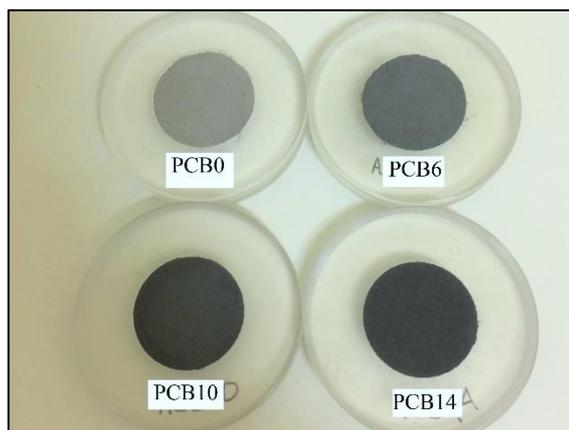


Figura 3.8 – Amostras das pastas destinadas à análise mineralógica por DRX

3.2.2.3 Termogravimetria das pastas hidratadas

A análise termogravimétrica consiste na medição da perda de massa da amostra devido a variação da temperatura em um ambiente controlado. Foram analisadas amostras das pastas descritas anteriormente, na idade de 56 dias, nas quais as perdas de massa ocorreram devido a desidratação dos produtos da hidratação do cimento Portland. O ensaio foi realizado no Laboratório de Óleos da Amazônia, no Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá, e foi utilizada uma termobalança, da marca Shimadzu, com as seguintes condições de ensaio: i) cadinho de alumina; ii) faixa de temperatura: 0-1000 °C; iii) razão: 10 °C/min; iv) atmosfera de gás nitrogênio; v) fluxo: 40 ml/min.

Foram traçadas as curvas termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG). A TG mostra a variação de massa da amostra, em porcentagem, em relação à temperatura, enquanto que a DTG, é a derivada da TG em relação ao tempo, na qual os degraus da TG são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais à variação de massa da amostra.

El-Jazairi e Illston (1977) definiram três faixas de temperatura nas análises termogravimétricas de pastas de cimento: a primeira vai de 105°C a 430°C e corresponde a perda de massa devido a desidratação do C-S-H e da etringita; a segunda faixa corresponde à decomposição do CH e está entre 430°C e 580°C; e na última, que vai de 580°C até 1000°C, ocorre a decomposição do CaCO₃ (Figura 3.9).

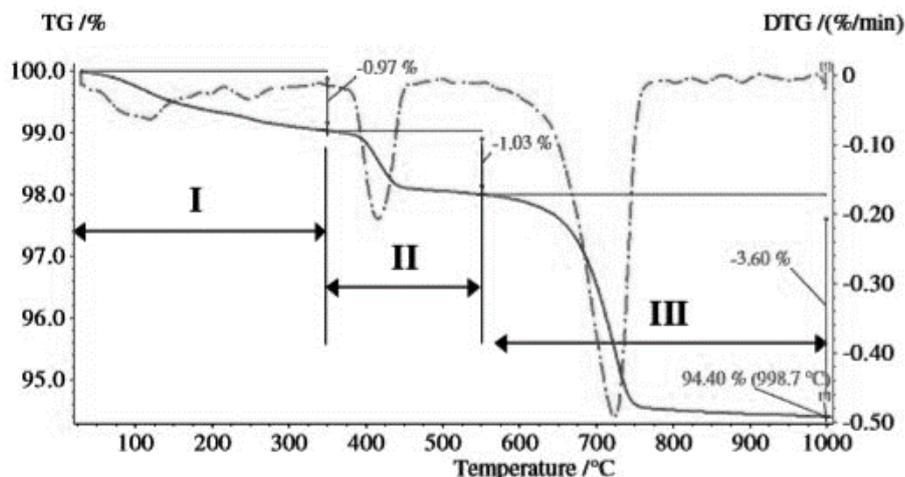


Figura 3.9 – Curva típica de perda de massa do cimento hidratado parcialmente (BETIOLI *et al.*, 2008 adaptado)

O teor de portlandita pode ser estimado a partir do desprendimento da água adsorvida na transformação de Ca(OH)_2 em CaO , referente ao segundo pico da DTG, na faixa II. A porcentagem de hidróxido de cálcio (CH%) foi calculada a partir da equação 3.4, na qual M_o e M_f referem-se à massa inicial e final, em porcentagem, na respectiva faixa de temperatura, M_{CH} e M_{H} às massas molares do hidróxido de cálcio e da água, respectivamente (RODIER *et al.*, 2017).

$$\% \text{ CH} = (M_o - M_f) \cdot \left(\frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{H}}} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

3.2.3 Argamassas com substituição parcial do cimento por CCB

A última etapa da pesquisa, consistiu na produção de argamassas com as mesmas proporções de substituição parcial do cimento por CCB utilizadas nas pastas produzidas na etapa anterior, baseadas no cimento Portland composto, conforme a NBR 11578 (ABNT, 1991). Também foi utilizada a mesma CCB selecionada para a produção das pastas. As argamassas produzidas foram analisadas quanto à consistência no estado fresco e à resistência mecânica à compressão. Por fim, fragmentos das argamassas, após os ensaios, foram analisados em MEV.

3.2.3.1 Dosagem das argamassas e Avaliação da Consistência

As argamassas foram compostas de cimento Portland CP V-ARI e CCB em diferentes proporções, conforme Tabela 3.7; e areia e água em quantidades constantes, sendo a relação aglomerante/areia igual a 1:3 e a relação água/aglomerante, 0,55. A mistura dos materiais, em misturador mecânico, e o ensaio de consistência, em mesa para índice de consistências, foram

realizados conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). O índice de consistência foi medido a partir do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa após o abatimento.

Tabela 3.7 – Teores de cimento e CCB nas argamassas

Argamassas	ACB0	ACB6	ACB10	ACB14
CCB (%)	0	6	10	14
CP V-ARI (%)	100	94	90	86

Após a mistura das argamassas e determinação dos índices de consistência, foram moldados 12 corpos de prova de 50 x 100 mm, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), para cada uma das argamassas, a serem submetidos ao ensaio de compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias (4 corpos de prova para cada idade). Na figura 3.10 pode ser visualizado um corpo de prova de cada argamassa produzida.



Figura 3.10 – Corpos de provas de ACB0, ACB6, ACB10 e ACB14, em ordem

3.2.3.2 *Análise mecânica – Determinação da resistência à compressão*

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) nos corpos de prova moldados a partir das argamassas previamente citadas nas idades de 3, 7 e 28 dias. Após a moldagem dos corpos de prova, eles foram curados ao ar durante 24 horas e subsequentemente desmoldados. Após isso, foram curados em água até a idade do ensaio.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em prensa hidráulica universal modelo WAW – 1000C. Cada corpo de prova foi posicionado na máquina de ensaio de modo que ficasse, rigorosamente, centrado em relação ao eixo de carregamento, que foi aplicado a uma velocidade de 2 mm/min. A resistência à compressão de cada corpo de prova foi calculada a partir da divisão da carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova.

Os dados foram analisados estatisticamente, quanto a normalidade e homocedasticidade, a partir dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente.

Posteriormente, a análise de variância foi realizada pelos testes de Kruskal-wallis e ANOVA (Tukey), nos quais foram consideradas diferenças significativas quando $p < 0,05$.

3.2.3.3 Microestrutura das argamassas

A microestrutura das argamassas foi visualizada a partir de análise em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo VEJA 3 LMU da marca TESCAN, realizada no Laboratório de Metalurgia do IFPA. Para tal, foram extraídos fragmentos dos corpos de prova de argamassa submetidos ao ensaio de resistência à compressão, na idade de 28 dias. Após rompidos, os corpos de prova foram seccionados com serra circular, de modo que fosse extraída uma seção cilíndrica de argamassa com, aproximadamente, 0,5 cm de altura. As amostras extraídas foram submetidas à temperatura de 100°C em estufa, para que as imagens geradas no MEV não fossem prejudicadas por umidade e, posteriormente, foram fragmentadas em pequenos pedaços retangulares, os quais foram armazenados e destinados à análise. Todas as amostras foram metalizadas com ouro, anteriormente ao início da análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das cinzas do colmo do bambu

4.1.1 Análise granulométrica

As curvas granulométricas, obtidas a partir da análise por granulometria à laser, das CCB500, CCB600 e CCB700 podem ser visualizadas nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente. Foram obtidas curvas para cada tempo de moagem a que as cinzas foram submetidas: 1, 2, 4, 6 e 8 horas.

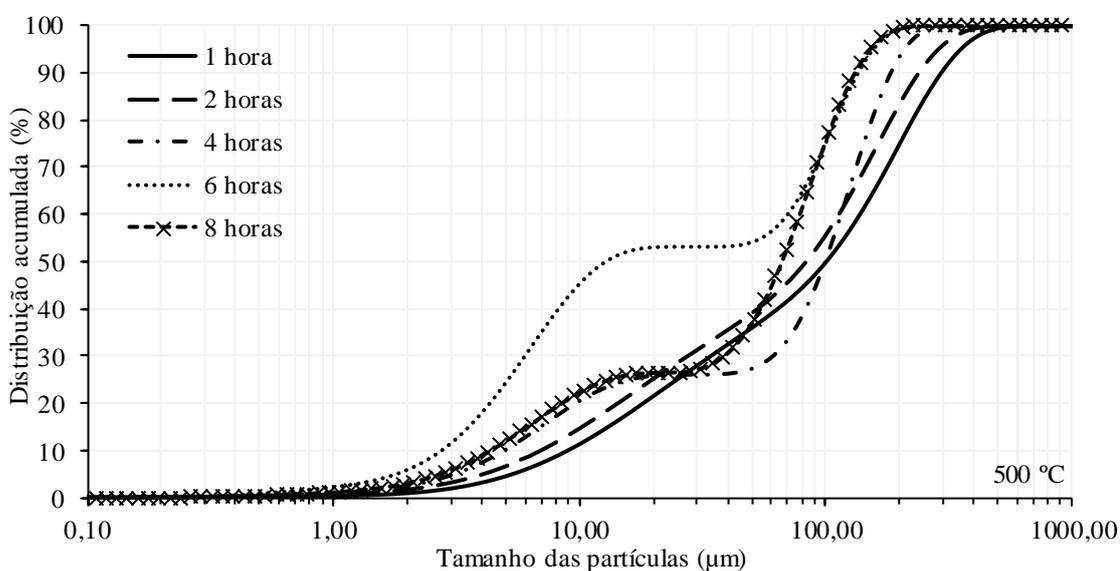


Figura 4.1 – Curvas granulométricas das CCB500

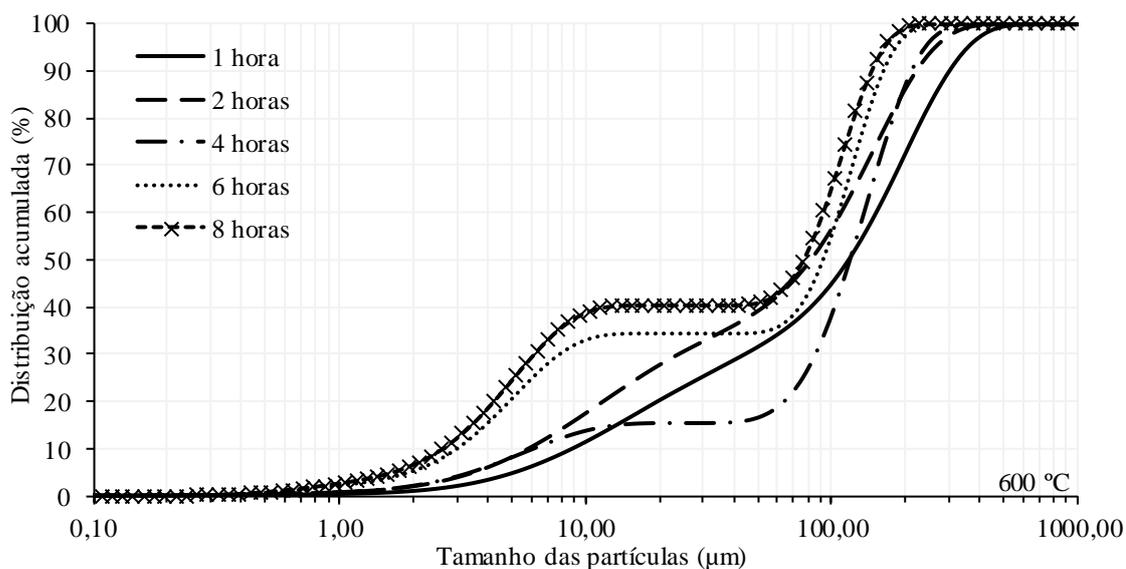


Figura 4.2 – Curvas granulométricas das CCB600

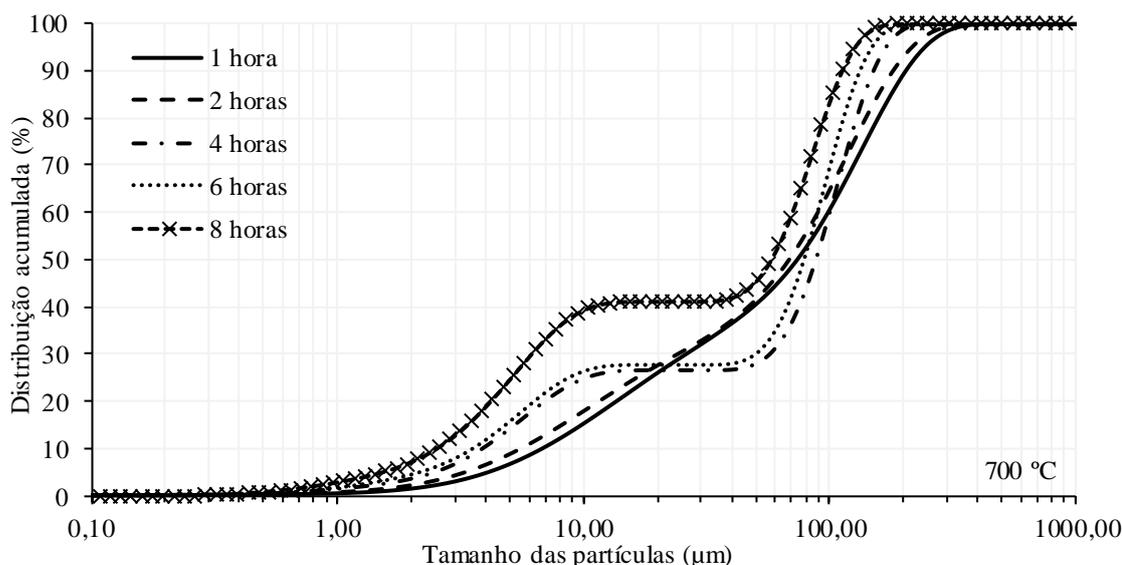


Figura 4.3 – Curvas granulométricas das CCB700

De modo geral, a distribuição das curvas mostra que para as cinzas CCB600 e CCB700, quanto maior o tempo de moagem, menor os tamanhos dos grãos obtidos. A CCB500, entretanto, apresentou um material mais fino com 6 horas de moagem, em relação ao obtido com 8 horas do processo. O mesmo fenômeno foi observado por Cordeiro (2009), ao analisar cinzas da casca do arroz calcinadas a 500°C, a autora constatou que a partir de 12 horas de moagem, o diâmetro da amostra sofreu um aumento de 7% em relação ao obtido na moagem por 9 horas. Pouey (2006) também verificou a ocorrência desse fenômeno em cinzas da casca do arroz. Ambas autoras explicam esse comportamento como um resultado da aglomeração de partículas no interior do moinho, durante processos de moagem mais prolongados.

Verifica-se, ainda, que a partir da moagem por 1 e 2 horas, todas as amostras apresentaram curva granulométrica contínua, enquanto que a partir das 4 horas de moagem, todas as curvas apresentam característica descontínua. Conforme ilustrado na Figura 4.4, a curva granulométrica contínua indica que os grãos estão bem graduados, a descontínua, por sua vez, indica a ausência de grãos com diâmetros intermediários, ou seja, há grãos bastante pequenos e outros, com diâmetros bem maiores. Fazendo um paralelo com o comportamento dos agregados, quando estes apresentam curvas granulométricas contínuas, eles tendem a preencher e densificar mais efetivamente as misturas do que os agregados com curvas descontínuas.

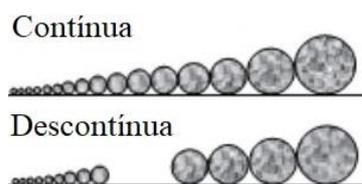


Figura 4.4 – Ilustração de grãos com curvas granulométricas contínua e descontínua (FARIAS et al., 2007 adaptado)

Determinou-se, ainda, o diâmetro médio (d_{50}) de todas as amostras, a fim de avaliar quantitativamente o tamanho dos grãos (Tabela 4.1). Observa-se que a moagem da CCB500 por 6 horas foi a mais efetiva ao diminuir o tamanho dos grãos, dentre todas as amostras, com a obtenção de um diâmetro médio igual a 11,51 μm . A moagem das CCB500 por 8 horas resultou em um d_{50} igual a 62,35 μm . Já as CCB600 e CCB700 apresentaram os menores diâmetros médios com 8 horas de moagem, 76,06 μm e 56,45 μm , respectivamente.

Tabela 4.1 – Determinação do diâmetro médio (d_{50}) das CCB após moagem

Amostra	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h
CCB500 (μm)	92,78	76,06	92,78	11,51	62,35
CCB600 (μm)	113,18	84,01	113,18	92,78	76,06
CCB700 (μm)	68,87	68,87	84,01	76,06	56,45

Segundo a NBR 12653 (2014), para que um material seja considerado pozolânico, 80% dele deve possuir granulometria inferior a 45 μm . Portanto, apenas a CCB500 moída por 6 horas se adequa a essa norma, já que possui diâmetro médio de 11,51 μm . Já as CCB600 e CCB700 moídas por 8 horas, que apresentaram os menores d_{50} dentre os tempos de moagem aplicados, não se adequam com seus d_{50} de 76,06 μm e 56,45 μm , respectivamente.

A quantidade de carbono e a presença de material cristalino nas cinzas são fatores que podem dificultar a moagem e consequente a diminuição do tamanho das partículas. Segundo Lima (2008), a presença de cristais de alta densidade pode suportar temperaturas extremas sem dissociar ou difundir, além de dificultar uma moagem mais efetiva de cinzas. E, Cordeiro (2006) explica que o carbono torna a estrutura do material mais densa, exigindo uma maior energia de moagem.

Para a realização do restante da pesquisa, foram utilizadas as cinzas moídas nos tempos em que apresentaram menor diâmetro médio das partículas: CCB500 moída por 6 horas, CCB600 moída por 8 horas e CCB700 moída por 8 horas.

4.1.2 Determinação da massa específica

Os resultados das massas específicas das CCB, obtidos pela média de dois ensaios consecutivos estão dispostos da Tabela 4.2. As massas específicas aumentaram com o

aumento da temperatura, comportamento semelhante ao analisado por Cordeiro (2009) para cinzas da casca do arroz.

Tabela 4.2 – Resultado do ensaio de massa específica das CCB

Cinza	Amostra	m (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ _{médio} (g/cm ³)
CCB500	CCB500-1	50,06	0,2	24,0	2,10	2,11
	CCB500-2	50,13	0,3	23,9	2,12	
CCB600	CCB600-1	50,20	0,6	23,5	2,19	2,18
	CCB600-2	50,05	0,2	23,3	2,17	
CCB700	CCB700-1	50,11	0,8	23,8	2,18	2,20
	CCB700-2	50,02	0,9	23,5	2,21	

A massa específica da CCB700 foi a mais próxima do resultado encontrado por Rodier *et al.* (2017) para CCB calcinada a 600°C, que foi de 2,25 g/cm³. Umoh e Odesola (2015) encontraram valores na ordem 2,64 g/cm³ para cinzas provenientes da folha do bambu. Logo, as CCB tendem a apresentar menor massa específica se comparadas com as cinzas da folha do bambu.

4.1.3 Análise mineralógica

A partir dos difratogramas gerados pela análise de DRX nas amostras de CCB500 (Figura 4.5), CCB600 (Figura 4.6) e CCB700 (Figura 4.7), foram identificados a presença dos minerais silvita (KCl), calcita (CaCO₃) e dolomita (CaMg(CO₃)₂), independente da temperatura de calcinação. O mineral que apresentou a maior quantidade e intensidade de picos foi a silvita. O difratograma da CCB700 foi o único que apresentou pico identificado como quartzo (SiO₂), uma forma cristalina da sílica.

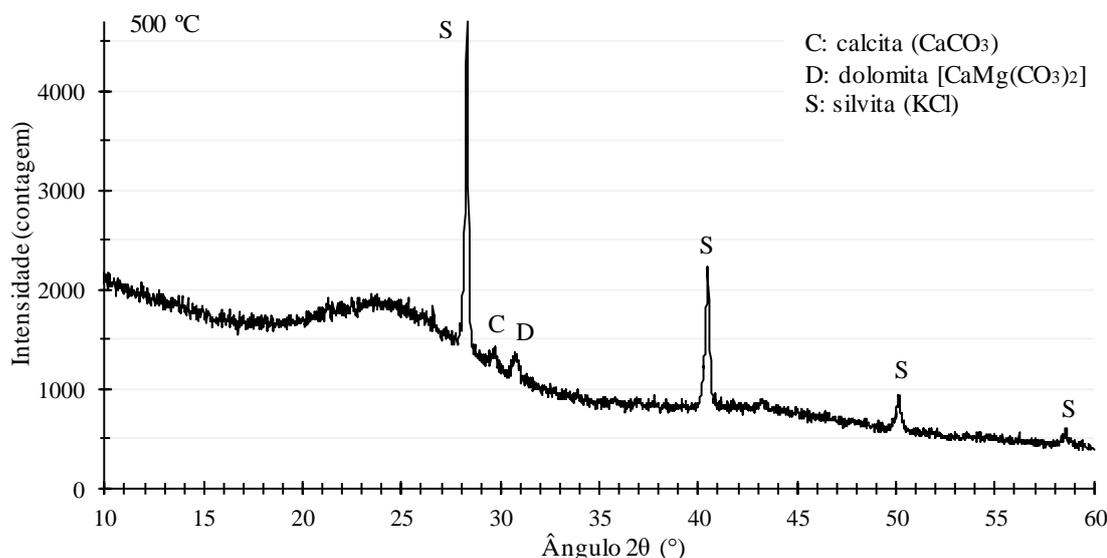


Figura 4.5 – Difratograma da CCB500

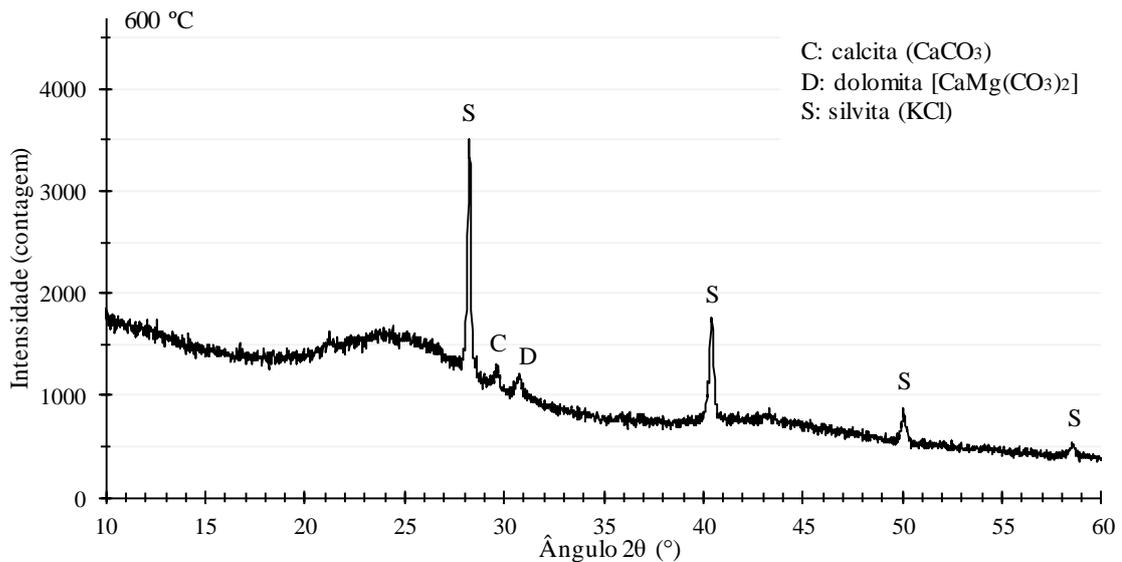


Figura 4.6 – Difratoograma da CCB600

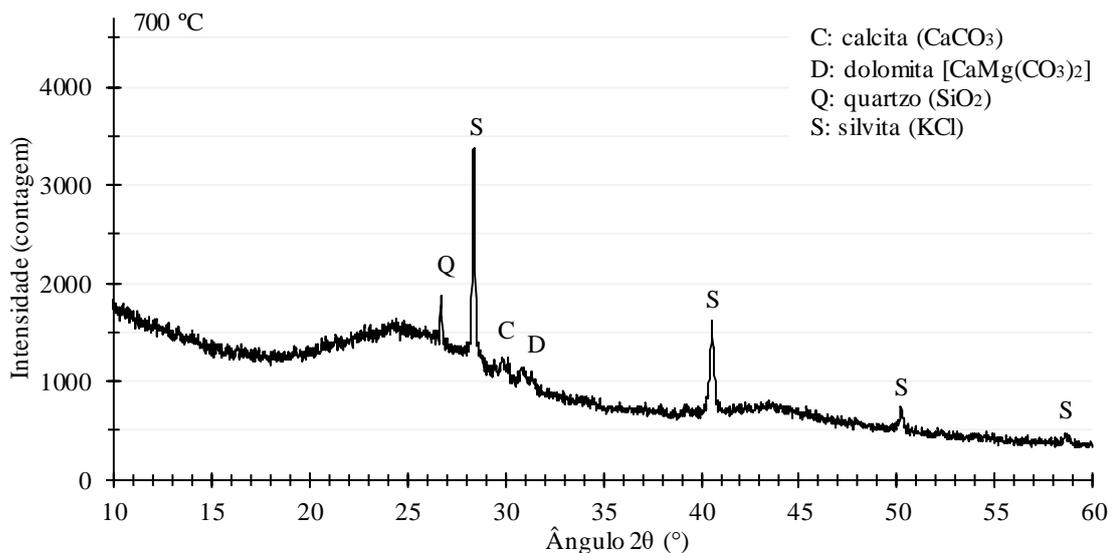


Figura 4.7 – Difratoograma da CCB700

Segundo John *et al.* (2003), alguns materiais que contêm sílica na forma amorfa apresentam um halo centrado na posição $22^\circ 2\theta$, podendo estar sobrepostos a ele diferentes formas cristalinas da sílica. Tal halo amorfo é identificado em todos os difratogramas, entretanto somente na análise da CCB700, há a presença de um pico de quartzo sobreposto a ele. Diante disso, pode-se depreender que a partir da temperatura de 700°C , ocorreu a cristalização, na forma de quartzo, de parte da sílica amorfa presente nas cinzas.

Percebe-se, também, que com o aumento da temperatura, ocorreu uma diminuição na intensidade dos picos de minerais cristalinos, principalmente, o da silvita. O óxido de potássio (K_2O) é um dos álcalis do cimento Portland e seu teor deve ser controlado, pois pode reagir

com alguns agregados, em concretos, e os produtos da reação álcali-agregado podem causar a desintegração da mistura (NEVILLE; BROOKS, 2013). Logo, a diminuição na intensidade desse mineral com o aumento da temperatura, pode ser um fator benéfico para o material, quando inserido em materiais cimentícios.

4.1.4 Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias

Os resultados de resistência à compressão individual dos corpos de prova, resistência à compressão média das argamassas avaliadas, desvios relativos e índice de consistência estão dispostos na Tabela 4.3. Percebe-se que mesmo com a substituição de 25% do cimento por CCB, não houve grande variação no índice de consistência. A IAP:CCB500 apresentou menor índice de consistência, seguida pela IAP:CCB700 E IAP:CCB600, respectivamente. A IAP:REF apresentou o maior índice de consistência, 0,5cm maior que o da IAP:CCB600. O uso de aditivo foi dispensado.

Tabela 4.3 – Consistência e Resistência Média das argamassas

Argamassa	Corpo de Prova	Resistência Individual (MPa)	Desvio Relativo Máximo	Índice de Consistência (cm)	Resistência Média (MPa)
IAP:REF	REF-01	17,05	3,15%	23,0	17,6050
	REF-02	18,53	-5,25%		
	REF-03	17,40	1,16%		
	REF-04	17,44	0,94%		
IAP:CCB500	500-01	13,42	-0,39%	21,5	13,3675
	500-02	13,71	-2,56%		
	500-03	13,37	-0,02%		
	500-04	12,97	2,97%		
IAP:CCB600	600-01	16,02	2,69%	22,5	16,4625
	600-02	16,41	0,32%		
	600-03	16,71	-1,50%		
	600-04	16,71	-1,50%		
IAP:CCB700	700-01	15,23	-2,20%	22,0	14,9025
	700-02	14,60	2,03%		
	700-03	14,79	0,75%		
	700-04	14,99	-0,59%		

Os índices de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias podem ser visualizados na Figura 4.8. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), esse índice deve ser superior a 90% para que o material avaliado seja considerado pozolânico. A argamassa com CCB600 foi a única que superou esse valor, com um índice de 93,51%. A CCB500 apresentou 75,93% de índice e a CCB700, 84,65%.

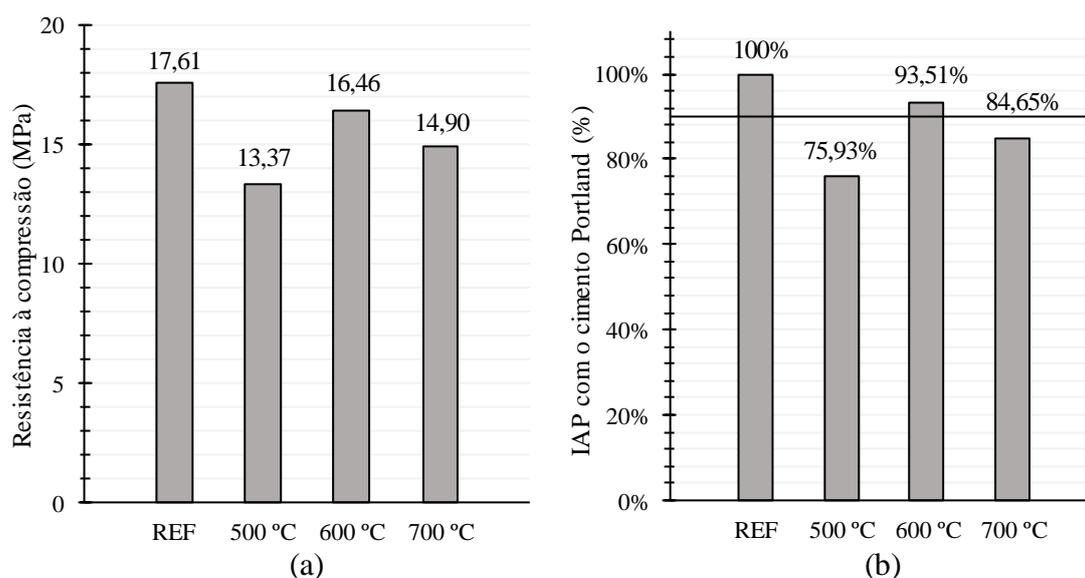


Figura 4.8 – (a) Resistência à compressão; (b) Índice de desempenho com o cimento Portland

A CCB600 caracteriza-se como material pozzolânico, segundo o requisito físico de índice de desempenho com cimento Portland, da norma supracitada. A CCB700 pode ter apresentado um resultado pior que o da CCB600 devido a sua mineralogia apresentar sílica na forma cristalina (quartzo) na análise por DRX, enquanto que na CCB600, a sílica pode ter se mantido na forma amorfa, reagindo com a portlandita e formando compostos resistentes, conforme a reação pozzolânica. A CCB500, por sua vez, apresentou picos mais intensos de minerais cristalinos, como a silvita, que é composta por cloro e potássio. Sabe-se que o óxido de potássio é considerado um álcali e seu teor, em cimentos, deve ser controlado.

Diante dos resultados obtidos na etapa de caracterização das CCB, optou-se por dar continuidade à pesquisa utilizando apenas a amostra de cinza do colmo do bambu calcinada a 600 °C (CCB600), pois a partir da análise por DRX foi verificada uma tendência da cristalização da sílica amorfa na forma de quartzo a partir dos 700 °C. Além de que, quando utilizadas em argamassa substituindo 25% do cimento Portland, a CCB600 garantiu 93,51% da resistência à compressão da argamassa de referência. Logo, uma maior investigação acerca do uso da CCB600 torna-se relevante.

4.2 Análise do cimento parcialmente substituído por CCB em pastas

4.2.1 Mineralogia das pastas hidratadas

Os difratogramas gerados a partir da análise por DRX das PCB0, PCB6, PCB10 e PCB14, assim como a identificação dos picos dos minerais estão dispostos nas Figuras 4.9,

4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente. A legenda da simbologia utilizada para os minerais identificados está disposta na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Legenda dos difratogramas

Mineral	Simbologia
Portlandita	*
Tobermorita	■
Calcita	□
Etringita	◇
Belita	●

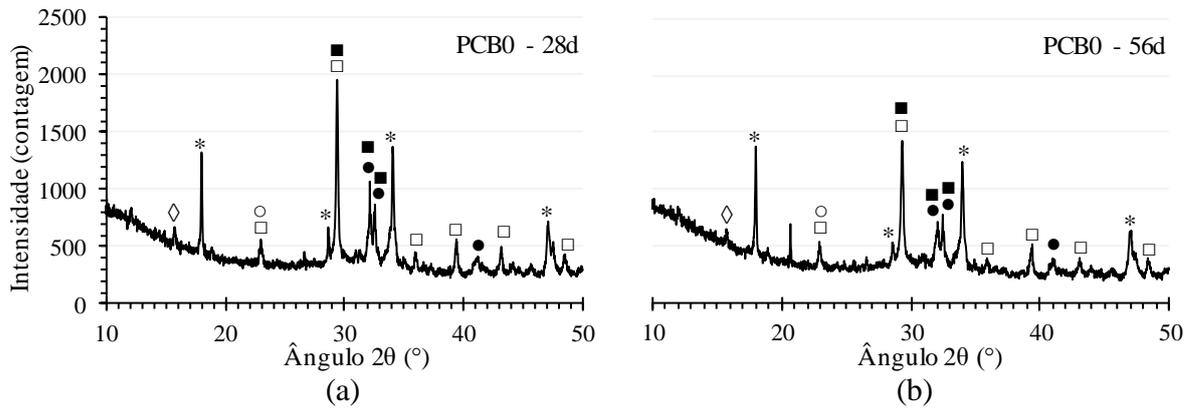


Figura 4.9 – Difratogramas da PCB0 (a) 28 dias; (b) 56 dias

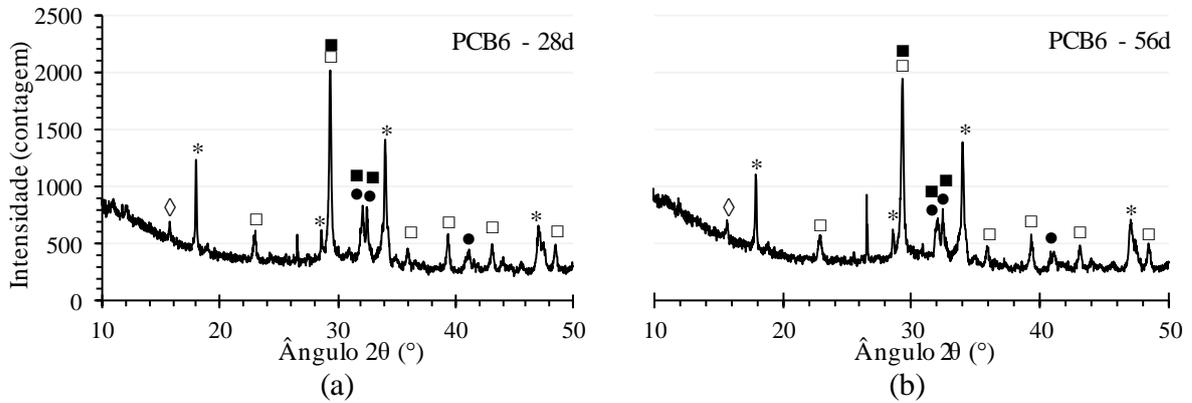


Figura 4.10 – Difratogramas da PCB6 (a) 28 dias; (b) 56 dias

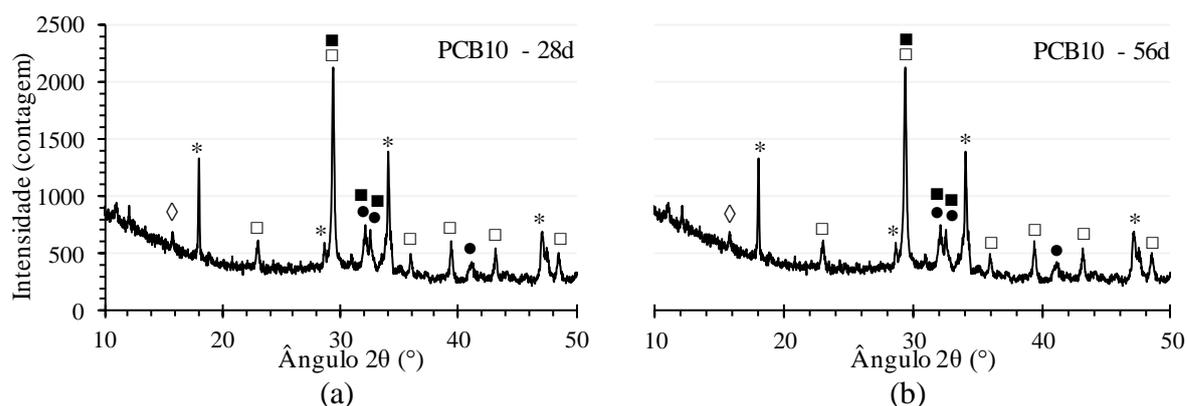


Figura 4.11 – Difratogramas da PCB10 (a) 28 dias; (b) 56 dias

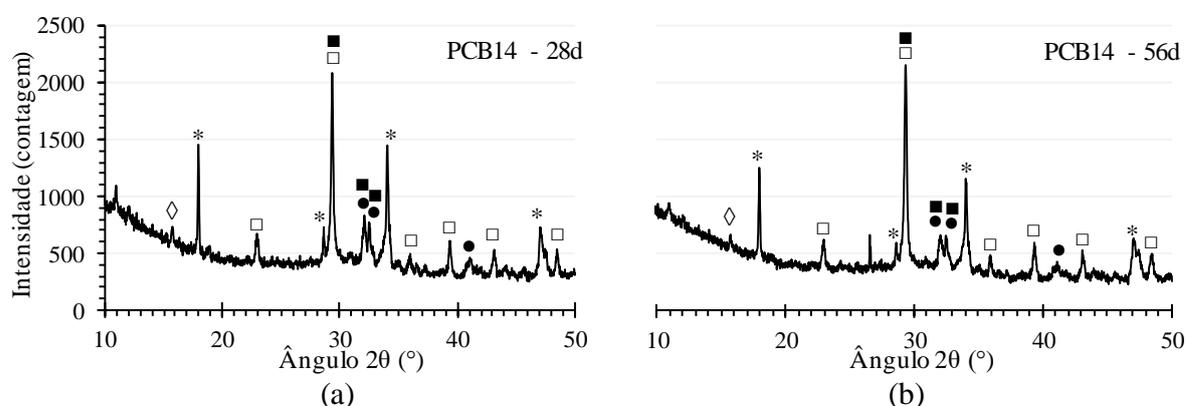


Figura 4.12 – Difratogramas da PCB14 (a) 28 dias; (b) 56 dias

A belita presente nas amostras diz respeito a parte do cimento que ainda não reagiu, mesmo aos 56 dias, já que a reação do C_2S é mais lenta, dentre as dos silicatos. A etringita foi identificada em todas as pastas, sem diferença de intensidade entre elas. Em todas as pastas foram visualizados, ainda, picos bastante intensos, que apresentaram traços de calcita e tobermorita. A presença de calcita pode indicar uma possível carbonatação das amostras, que pode ter ocorrido durante a pulverização e manuseio destas. Já a tobermorita, é um mineral com forma cristalina semelhante à do C-S-H, indicando a formação de silicato de cálcio nas amostras, com o aumento da idade.

A portlandita é formada durante a hidratação dos silicatos presentes no cimento Portland e além de pouco contribuir para a resistência da pasta, pode ser facilmente lixiviada pela água, aumentando a porosidade da mistura e a tornando vulnerável ao ataque de agentes nocivos. Ou seja, diminuindo sua durabilidade. Na Figura 4.13, a qual ilustra em detalhe os picos sobrepostos da portlandita em $18,1^\circ 2\theta$, é visualizado que aos 28 dias, todas as amostras apresentaram picos com, praticamente, a mesma intensidade. Aos 56 dias, entretanto, as amostras PCB6, PCB10 e PCB14 apresentaram diminuição na intensidade desse pico,

enquanto que o da amostra PCB0 sofreu um leve acréscimo. A amostra PCB10 apresentou menor intensidade de pico, na ordem de 1000, enquanto que a intensidade do pico da PCB0 ficou próximo de 1350. Sabe-se que esse fenômeno é comum na incorporação de pozolanas ao cimento, que consomem o hidróxido de cálcio na presença de água e formam materiais mais resistentes.

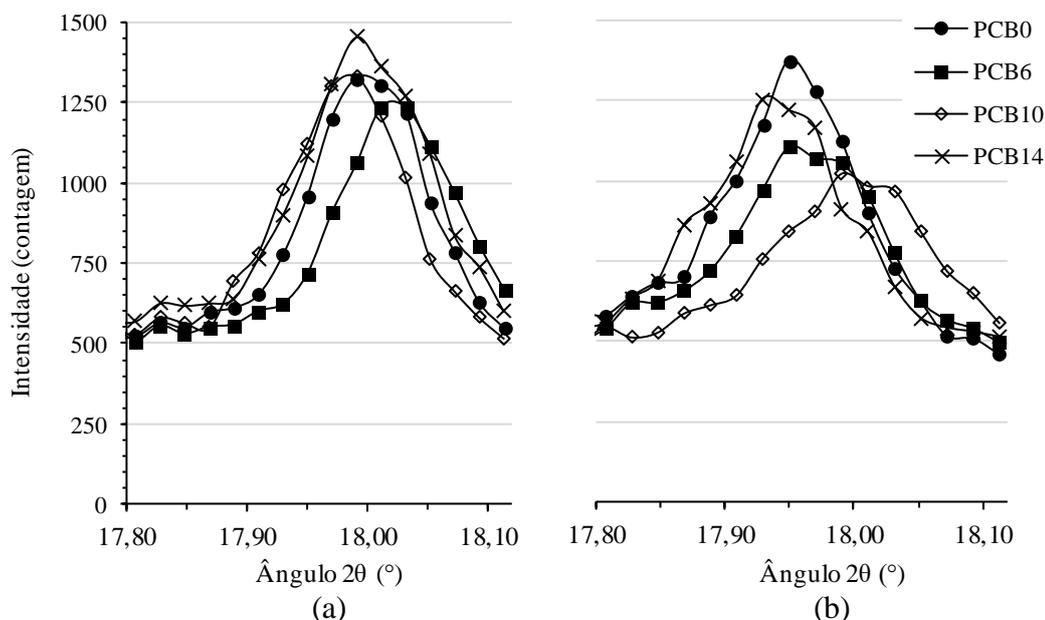


Figura 4.13 – Detalhe do pico da portlandita em $18,1^{\circ}2\theta$ (a) 28 dias; (b) 56 dias.

A partir da mineralogia das pastas aos 28 e 56 dias, verificou-se que a utilização da CCB600 em substituição parcial do cimento Portland diminuiu a intensidade do pico de portlandita, comportamento típico de materiais considerados pozolânicos, os quais a partir da reação pozolânica tendem a reagir com o hidróxido de cálcio, produzido durante a hidratação dos silicatos do cimento, e produzir compostos resistentes, tais quais o C-S-H. A PCB10, com 10% de CCB600, apresentou menor intensidade desse pico, dentre todas as amostras. A pasta de referência, PCB0, por sua vez, apresentou a maior intensidade.

4.2.2 Termogravimetria das pastas hidratadas

Os gráficos obtidos a partir da análise termogravimétrica, contendo as curvas TG e DTG das amostras PCB0, PCB6, PCB10 e PCB14, com 56 dias de idade, podem ser visualizados nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, respectivamente.

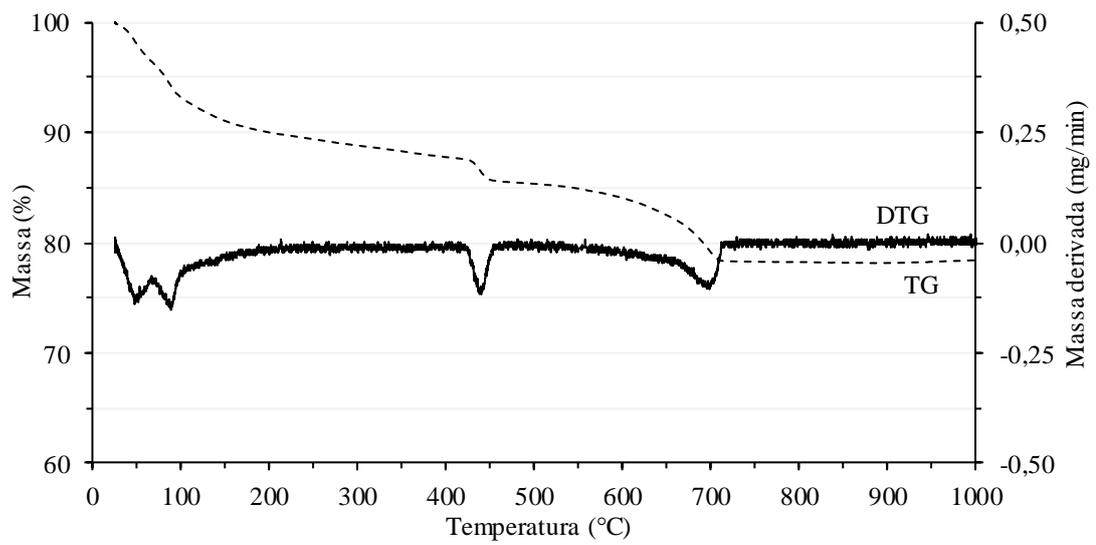


Figura 4.14 – TG/DTG da PCB0 (56 dias)

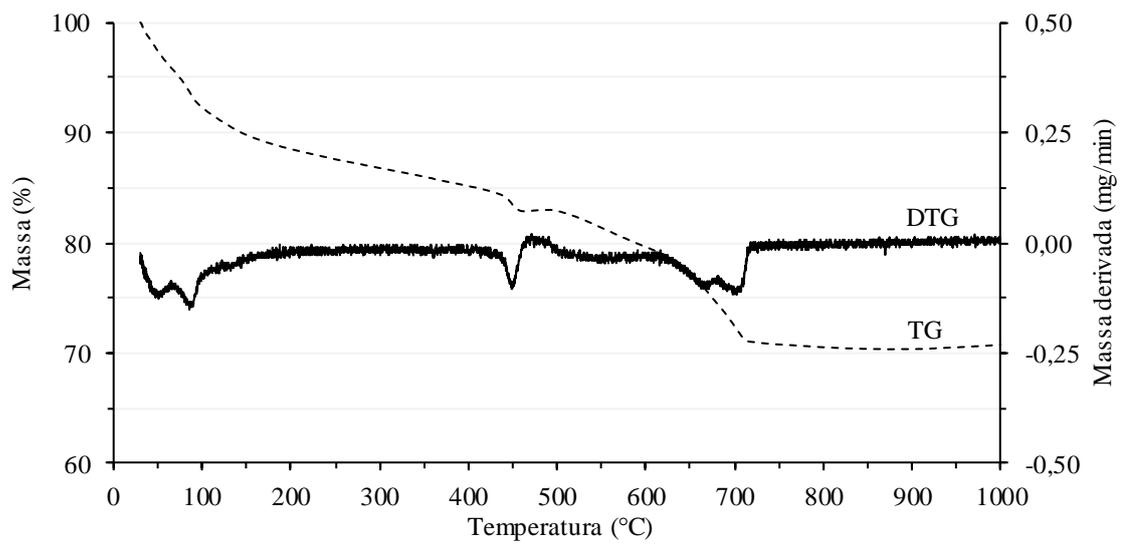


Figura 4.15 – TG/DTG da PCB6 (56 dias)

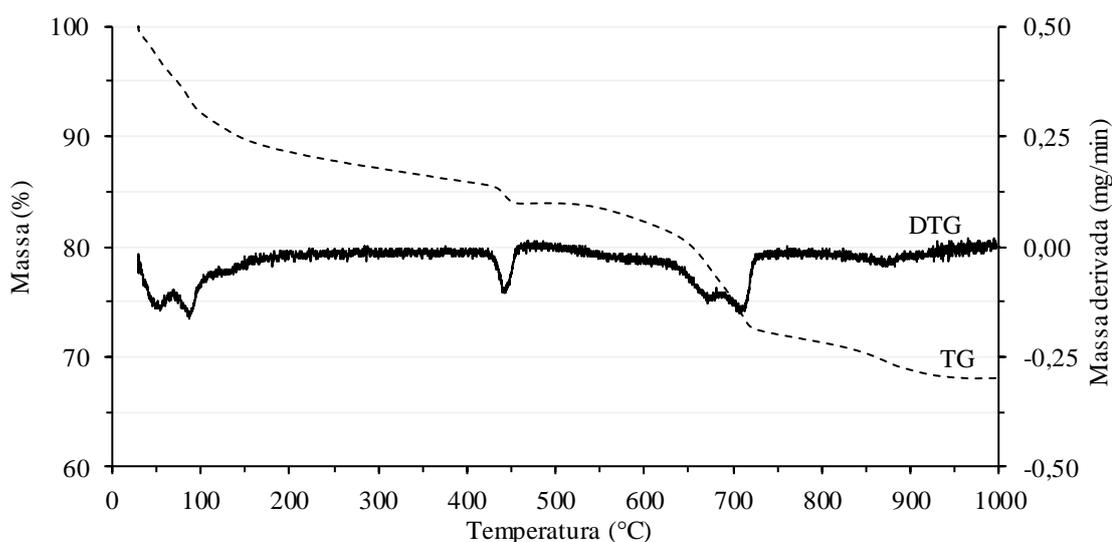


Figura 4.16 – TG/DTG da PCB10 (56 dias)

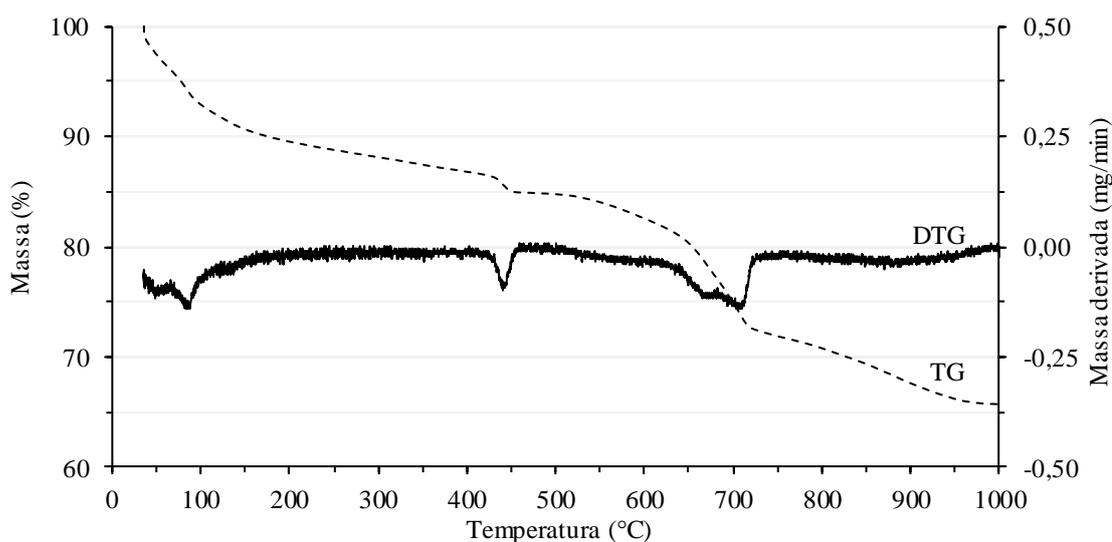


Figura 4.17 – TG/DTG da PCB14 (56 dias)

Percebe-se na faixa I de temperatura, em todas as amostras, dois picos de perda de massa na DTG, referentes à perda de massa por água evaporável e por liberação da água interlamelar das fases hidratadas (etringita, C-S-H e/ou C-A-H.). Já na faixa II, há a presença de um pico bem definido em todas as DTG, referente à desidratação do hidróxido de cálcio. Na faixa III das amostras PCB0 e PCB6, observa-se a constância de massa tendo início por volta de 750°C, enquanto que nas pastas PCB10 e PCB14 pequenas quantidades de massas são perdidas entre 750°C e 950°C. Para que essas variações fossem quantificadas, determinou-se a perda de massa, em percentual, de cada faixa de temperatura (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Perda de massa das pastas por faixa de temperatura

Amostra	Faixa I	Faixa II	Faixa III
PCB0	10,49%	4,36%	6,90%
PCB6	12,67%	4,33%	12,53%
PCB10	14,17%	1,74%	15,75%
PCB14	13,12%	1,77%	19,04%

Com a adição das CCB600 nas pastas ocorreu um aumento na perda de massa na faixa I, indicando uma maior quantidade de água evaporável e ligada aos compostos hidratados. Observa-se, entretanto, que a PCB14 apresentou menor perda de massa nessa faixa (13,12%) que a PCB10 (14,17%). Na faixa II de temperatura, o efeito foi inverso, a adição das cinzas provocou uma menor perda de massa referente à decomposição do hidróxido de cálcio. A PCB6, no entanto, sofreu uma perda de massa na faixa II praticamente igual à da PCB0 (4,33% e 4,36%, respectivamente). A PCB10 e PCB14 mostraram perdas bastante próximas entre si (1,74% e 1,77%, respectivamente) e inferior à das outras duas amostras. Já na faixa III, quanto maior a quantidade de CCB600, maior a perda de massa em detrimento da decomposição das fases carbonáticas.

Fica evidenciado, a partir da perda de massa na faixa III de temperatura, que todas as pastas avaliadas contêm fases carbonáticas. Entretanto, a quantidade de perda de massa na faixa III aumenta com a elevação do teor de CCB600. A pasta ACB6 já apresenta praticamente o dobro da perda de massa, nessa faixa de temperatura, em relação a ACB0. As amostras podem ter sofrido carbonatação durante o processo de pulverização.

Por fim, calculou-se a quantidade de hidróxido de cálcio presente nas pastas a partir da perda de massa na Faixa II de temperatura (Tabela 4.6). A diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas foi bastante expressiva nas amostras com 10% e 14% de CCB em relação à amostra de referência. Já a amostra com 6% apresentou praticamente a mesma quantidade de hidróxido de cálcio que a PCB0.

Tabela 4.6 – Quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas

PCB0	PCB6	PCB10	PCB14
17,92%	17,80%	7,15%	7,25%

Ao estudar a influência da substituição parcial do cimento Portland por cinzas do colmo do bambu, Rodier *et al.* (2017) verificaram, por análise termogravimétrica, que aos 28 dias, a pasta de referência continha 21,64% de hidróxido de cálcio, enquanto que a pasta com 10% de CCB possuía 16,57%, uma diferença menor que a encontrada nesse trabalho, aos 56 dias. Os autores caracterizaram as CCB estudadas como material pozolânico.

Diante dos resultados encontrados a partir da análise termogravimétrica, percebe-se que as CCB600 se comportam como um material pozolânico, já que quando utilizadas em substituição parcial do cimento Portland, em pastas, nos teores de 10% e 14% ocorreu a diminuição do teor de hidróxido de cálcio nas misturas, aos 56 dias. Esse resultado confirma o que foi visto na análise mineralógica das pastas, a qual demonstrou uma diminuição de intensidade do pico da portlandita nas pastas que continham CCB600 em relação à pasta de referência, também aos 56 dias. Logo, as CCB600 reagiram com o hidróxido de cálcio, durante a hidratação do cimento e formaram compostos resistentes, a partir da reação pozolânica.

4.3 Argamassas com substituição parcial do cimento por CCB

4.3.1 Análise no estado fresco – Consistência

Em todas as argamassas produzidas foi mantido a mesma relação água/cimento, para tal não foi necessário o uso de aditivo superplastificante, pois a partir da determinação do índice de consistência normal, realizado segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996) todas as argamassas produzidas apresentaram praticamente a mesma consistência (Tabela 4.7). Segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014), o índice de consistência das argamassas com substituição pode variar em até ± 10 mm em relação ao índice da argamassa de referência. Na Figura 4.18 está ilustrado o aspecto das argamassas após o ensaio.

Tabela 4.7 – Índice de consistência das argamassas

Argamassa	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Consistência (mm)
ACB0	225	228	227
ACB6	223	224	224
ACB10	226	228	227
ACB14	227	228	228

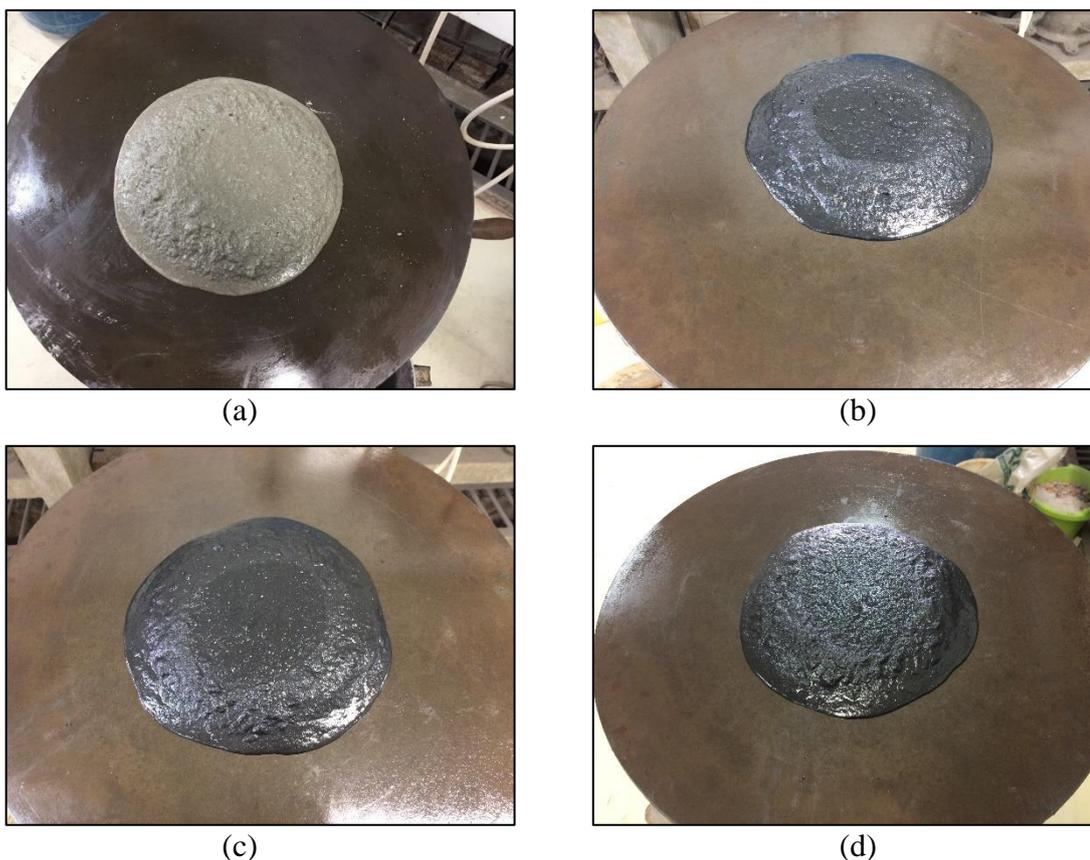


Figura 4.18 – Determinação do índice de consistência (a) ACB0; (b) ACB6; (c) ACB10; (d) ACB14

4.3.2 Análise mecânica – Determinação da resistência à compressão

O resultado do ensaio de resistência à compressão a que as argamassas ACB0, ACB6, ACB10 e ACB14 foram submetidas, aos 3, 7 e 28 dias de idade está resumido na Figura 4.19 e a aparência das argamassas após o ensaio aos 28 dias pode ser visualizada na Figura 4.20. Percebe-se, de modo geral, que ocorreu o aumento da resistência à compressão nas idades mais avançadas e que a substituição parcial do cimento Portland por cinzas do colmo do bambu calcinadas à 600°C resultou em um acréscimo na resistência à compressão das argamassas, resultado da reação pozolânica que deve ter ocorrido com o acréscimo das CCB600, consumindo o hidróxido de cálcio e produzindo compostos mais resistentes, como o C-S-H.

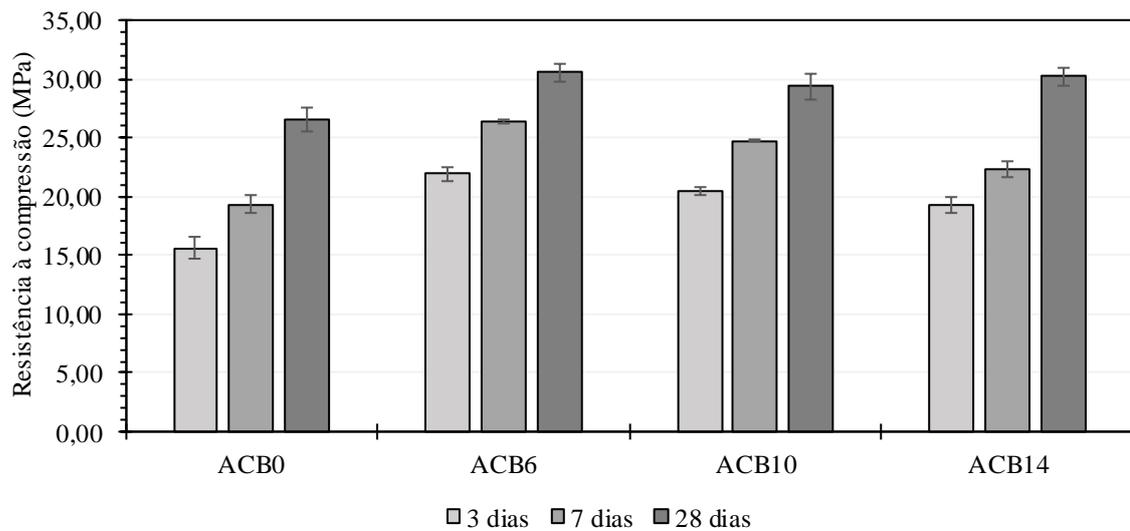


Figura 4.19 – Resultado do ensaio de resistência à compressão em argamassas



Figura 4.20 – Aparência das argamassas após ensaio de resistência à compressão (28 dias)

A partir da análise estatística, foi verificada a ocorrência de diferença significativa entre todas as argamassas avaliadas aos 3 dias (Figura 4.21), sendo que a ACB6 apresentou o maior resultado, 21,96 MPa, e a ACB0, sem adição de CCB600, o menor, 15,59 MPa. Ou seja, ocorreu um acréscimo de, aproximadamente, 41% na resistência à compressão da argamassa com 6% de CCB em relação à argamassa de referência. Entretanto, ao aumentar o teor de substituição, o acréscimo na resistência aos 3 dias diminuiu. A ACB10 teve um acréscimo de 31,49% e a ACB14, de 23,80%, ambas em relação à ACB0.

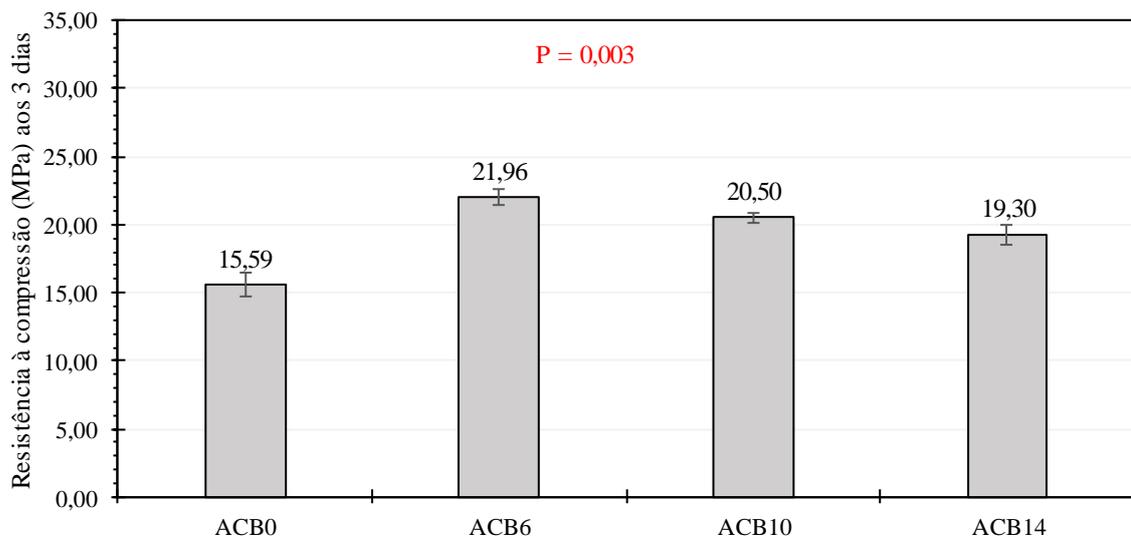


Figura 4.21 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 3 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste Kruskal-wallis)

Aos 7 dias, o comportamento da resistência à compressão das argamassas permaneceu semelhante ao de 3 dias, aumentando de forma proporcional devido à idade em cada argamassa (Figura 4.22), todas as argamassas apresentaram diferença significativa entre si. O acréscimo na resistência à compressão da PCB6 em relação à PCB0 ficou em torno de 36%. A ACB10 teve um acréscimo de 27,98% e a ACB14, de 15,18%, em relação à ACB0.

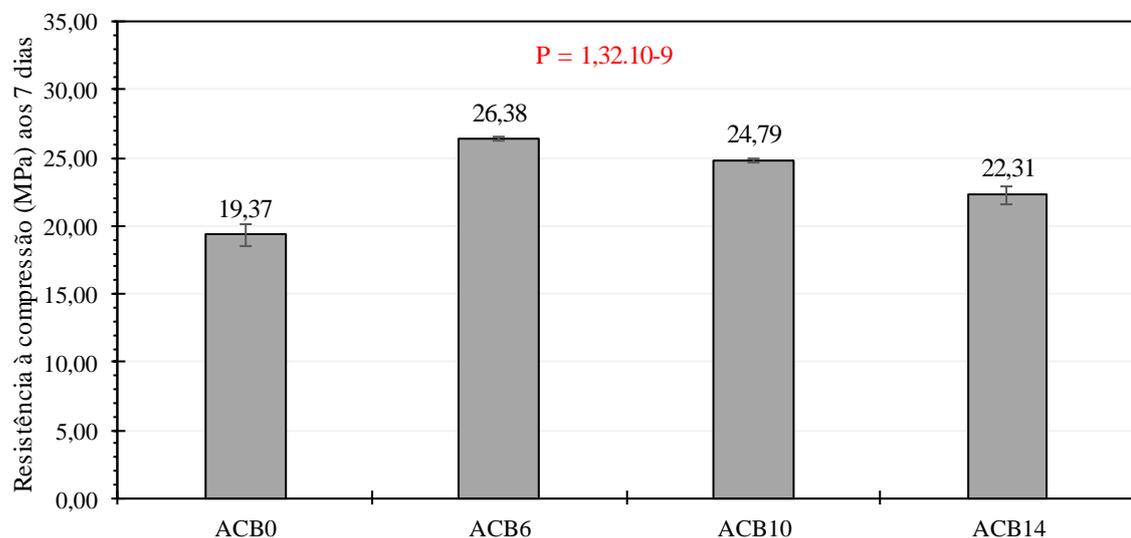


Figura 4.22 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 7 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

Aos 28 dias, todas as argamassas com CCB600 (ACB6, ACB10 e ACB14) apresentaram entre 10 e 15% de acréscimo em relação à resistência à compressão da argamassa de referência (ACB0) (Figura 4.23). Ao submeter apenas as argamassas com

CCB600 à análise estatística, evidenciou-se que, aos 28 dias, a resistência à compressão das ACB6, ACB10 e ACB14 é igual (Figura 4.24).

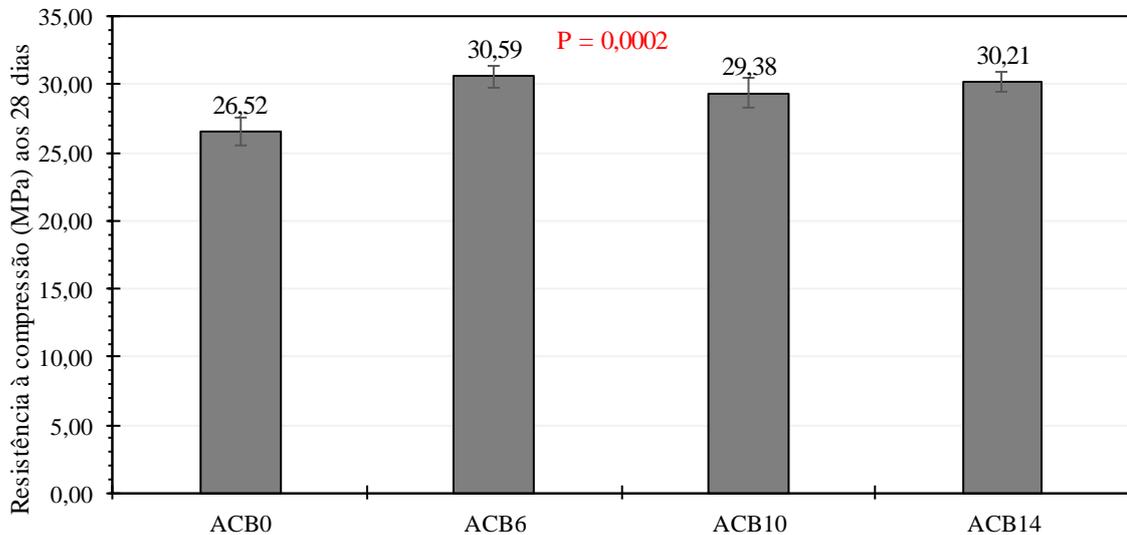


Figura 4.23 – Resultado da resistência à compressão das argamassas aos 28 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

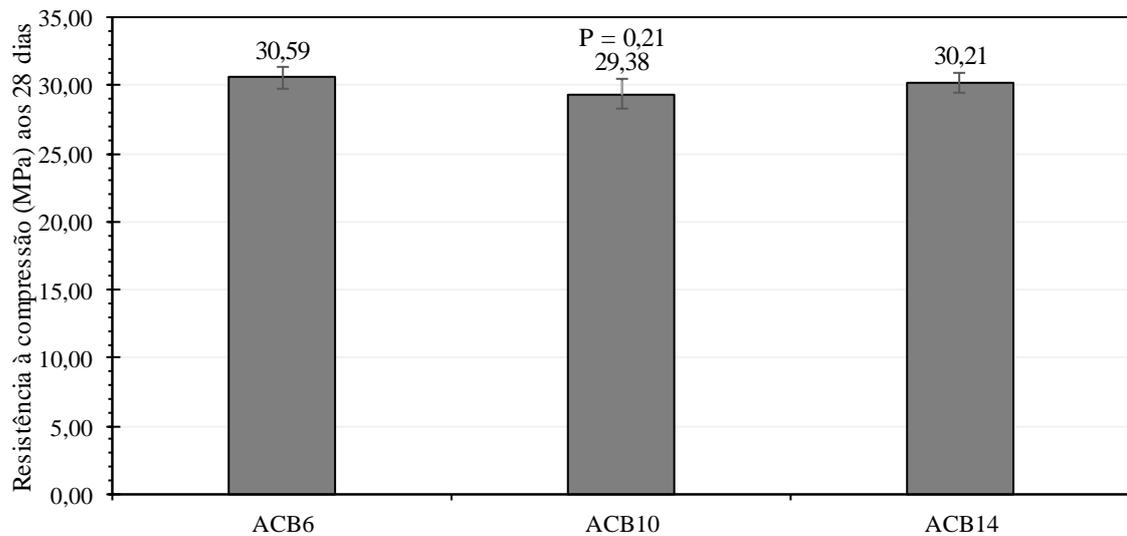


Figura 4.24 – Resultado da resistência à compressão das argamassas com CCB600 aos 28 dias (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

Rodier *et al.* (2017) compararam a resistência à compressão, aos 7 e aos 28 dias, de uma argamassa contendo 10% de CCB em substituição ao cimento em relação a uma argamassa de referência. Aos 7 dias, a argamassa com CCB alcançou, aproximadamente, 85% da resistência da argamassa de referência; aos 28 dias, cerca de 80%. Os autores determinam que as CCB avaliadas por eles podem ser utilizadas como substitutas parciais do cimento Portland, ao se basearem na ASTM C618, a qual determina que essa relação deve ser de no mínimo 75% para que um material seja considerado pozolânico.

Ao avaliar um cimento composto de 20% de cinzas da folha do bambu, Dwivedi *et al.* (2006) perceberam que nas primeiras idades o cimento composto apresentou resistência à compressão bem abaixo do cimento comum. Entretanto, aos 28 dias, as resistências dos dois cimentos se equipararam. Os autores explicam que tal fato pode ter ocorrido devido a formação de C-S-H pela reação pozolânica.

Frías *et al.* (2012) avaliaram a resistência à compressão de argamassas contendo 10% e 20% de cinzas da folha do bambu em substituição ao cimento Portland. Aos 7 dias, as argamassas com cinzas apresentaram um pequeno decréscimo na resistência em comparação a uma argamassa de referência, na ordem de 1,2% e 6,7% para 10% e 20% de substituição, respectivamente. Aos 28 e 90 dias, entretanto, a resistência à compressão das argamassas com cinzas assemelhou-se a da argamassa de referência.

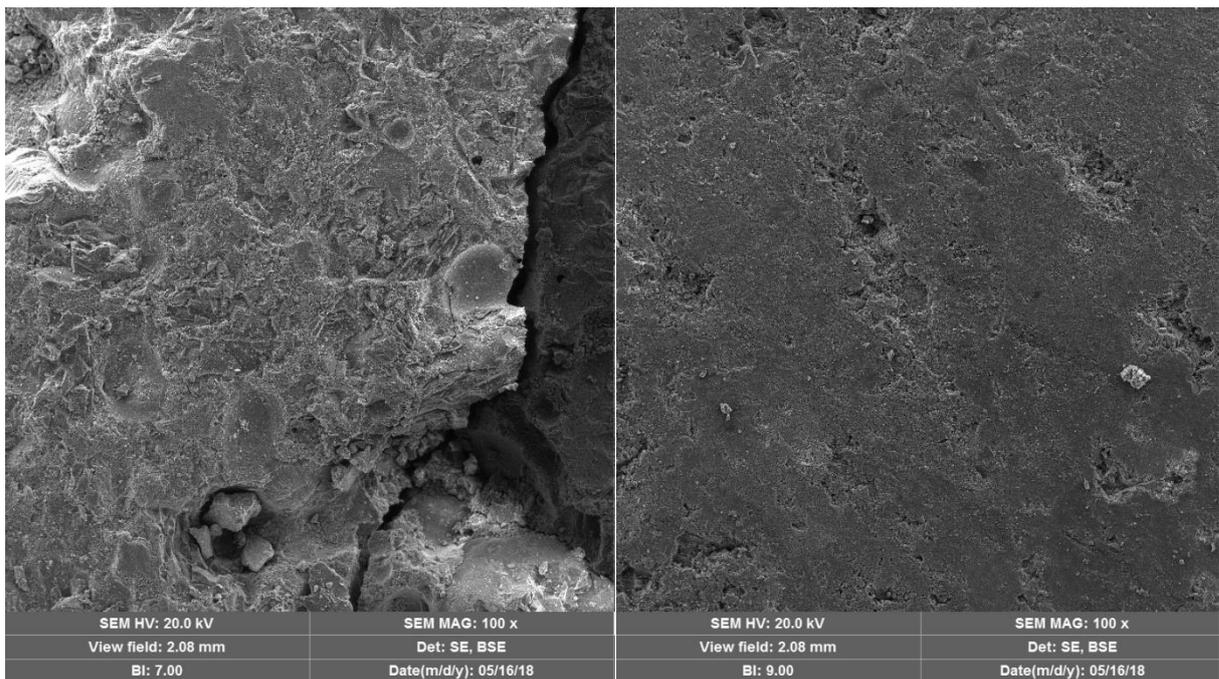
Umoh e Odesola (2015) submeteram argamassas com 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de cinzas da folha do bambu misturadas ao cimento ao ensaio de resistência à compressão. Aos 28 dias de hidratação, as argamassas alcançaram 100%, 128%, 113%, 95%, 47% e 46% da resistência da argamassa sem cinzas. Já aos 90 dias, esses valores foram de 100%, 132%, 118%, 94%, 61% e 49%. As CCB600 avaliadas nesse trabalho apresentaram comportamento semelhante ao encontrado pelos autores: um acréscimo na resistência em teores de substituição de até 10%.

De modo geral, percebe-se que todos os autores que avaliaram a influência da incorporação de cinzas do bambu, provenientes do colmo ou das folhas, como substituição parcial do cimento Portland na resistência à compressão de argamassas, encontraram resultados favoráveis. A literatura explica que as cinzas do bambu, caracterizadas como material pozolânico, produzem efeito químico nas misturas com cimento Portland, ao reagirem com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, na presença de água e produzirem compostos hidratados mais resistentes. As análises mineralógicas e termogravimétricas realizadas nessa pesquisa evidenciaram uma diminuição na concentração de hidróxido de cálcio. Além disso, o acréscimo na resistência à compressão das argamassas com CCB600 também pode ser atribuído ao efeito físico de preenchimento dos vazios, densificando a estrutura a partir do efeito *filler* por parte não reativa das CCB600.

4.3.3 Microestrutura das argamassas

Foram geradas imagens a partir de feixes de elétrons secundários com magnitude de 100x das argamassas, a fim de comparar a aparência microestrutural de suas superfícies. Na

Figura 4.25a visualiza-se a superfície da ACB0 e na Figura 4.25b, da ACB14. A partir das imagens geradas, percebe-se que com o acréscimo de CCB600 na argamassa, sua superfície apresentou aspecto bem mais denso e menos poroso do que a argamassa de referência. Evidenciado a ocorrência da densificação da matriz, uma das características da utilização de adições minerais pozolânicas. Tal densificação ocorre por dois fatores: a partir da reação pozolânica, com a produção de compostos resistentes e do efeito microfíler, com o preenchimento dos vazios da matriz por parte da pozolana que ficou inerte.



(a) (b)
 Figura 4.25 – Superfície aumentada 100x (a) ACB0 (b) ACB14

A Figura 4.26 corresponde à microestrutura da ACB0 e na Tabela 4.8 estão dispostos os elementos majoritários nos pontos identificados na imagem, conforme análise por EDS. No ponto A, foi identificado grande concentração de sílica e no ponto B, onde visualiza-se um cristal hexagonal, hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento Portland.

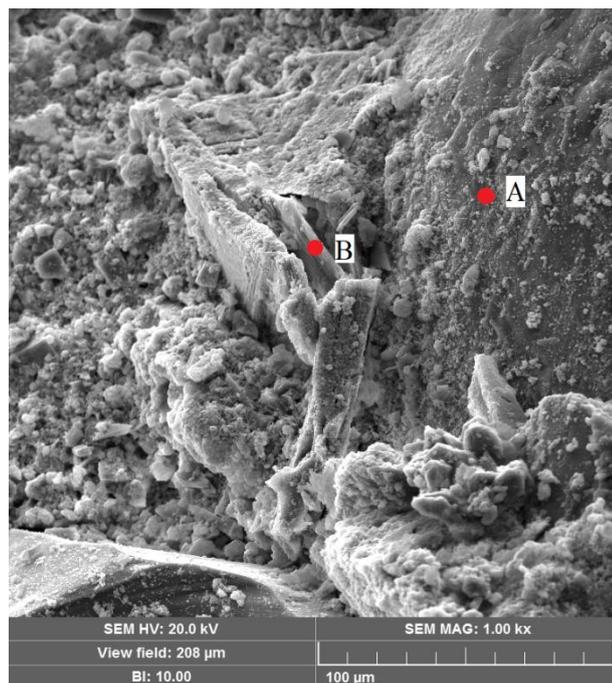


Figura 4.26 – Microestrutura da ACB0

Tabela 4.8 – Resultado do EDS da ACB0

Elemento	Concentração Aparente (%)	
	Ponto A	Ponto B
C	2,39	2,17
O	34,95	18,62
Si	24,51	0,68
Ca	5,74	32,82

A microestrutura da ACB6 pode ser visualizada na Figura 4.27. Visualiza-se cristais pontiagudos (Ponto B) e outros, mais densos (Ponto A). A partir da análise por EDS nesses pontos (Tabela 4.9), percebe-se que o cristal identificado no Ponto A é composto, praticamente, por silício e oxigênio, logo, pode ser identificado como sílica. Já o Ponto B, pode ser identificado como C-S-H, a partir da concentração de elementos identificadas.

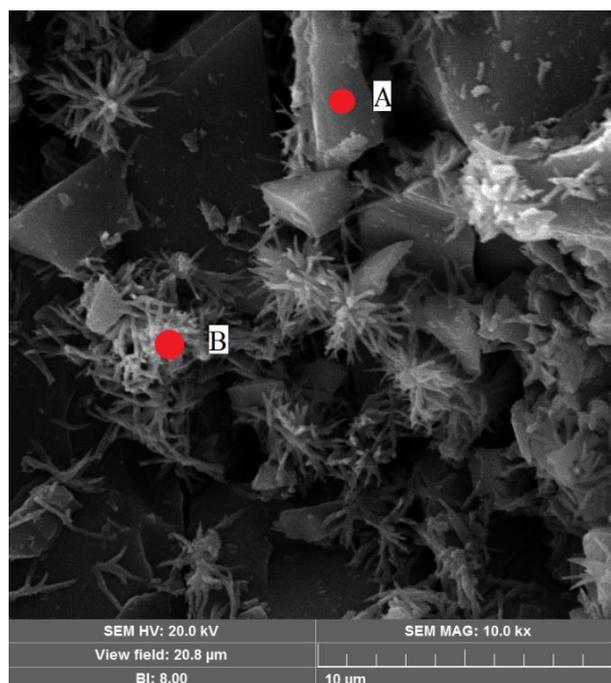


Figura 4.27 – Microestrutura da ACB6

Tabela 4.9 – Resultado do EDS da ACB6

Elemento	Concentração Aparente (%)	
	Ponto A	Ponto B
C	1,01	3,62
O	28,99	20,4
Si	30,03	13,51
K	-	0,13
Ca	0,63	9,49

Ao analisar a microestrutura da ACB10 (Figura 4.28) e realizar a análise por EDS nos pontos A e B (Tabela 4.10) percebe-se uma grande diferença na composição química destes pontos. O ponto A, que tem aparência de um aglomerado de grãos apresenta traços de diversos elementos que não aparecem no EDS do ponto B, tais quais o ferro, o alumínio e o magnésio. Ao verificar a concentração aparente de cada elemento, o ponto B tem como principais elementos constituintes o silício e o oxigênio. Acredita-se que haja uma concentração de partículas de CCB600 no ponto A, enquanto que o ponto B seja proveniente do agregado miúdo utilizado na argamassa.

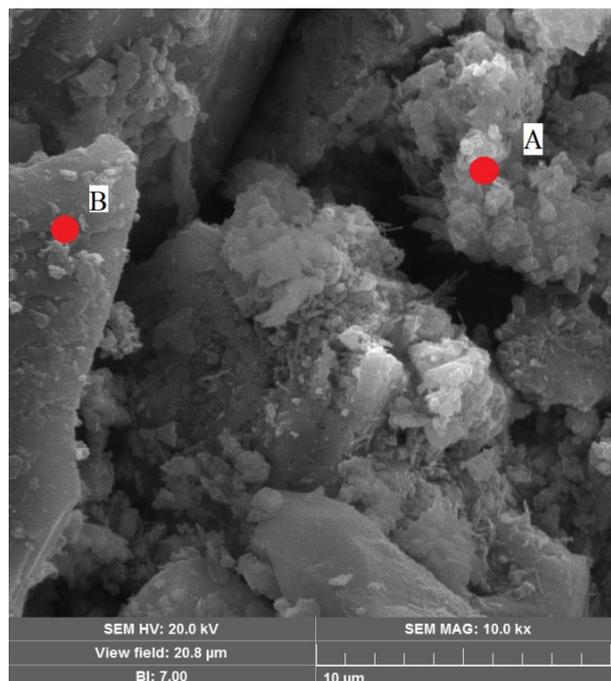


Figura 4.28 – Microestrutura da ACB10

Tabela 4.10 – Resultado do EDS da ACB10

Elemento	Concentração Aparente (%)	
	Ponto A	Ponto B
C	1,34	0,47
O	5,61	11,97
Mg	0,05	-
Al	0,10	-
Si	2,05	16,42
Fe	0,25	-
K	0,11	-
Ca	3,53	0,22

Por fim, a microestrutura da ACB14 pode ser visualizada na Figura 4.29, onde é possível visualizar uma estrutura com formato de agulha. Foi realizada a análise por EDS nos pontos identificados e, segundo a Tabela 4.11, o ponto A é constituído, principalmente, por cálcio e oxigênio, enquanto que o ponto B, por cálcio, oxigênio e carbono.

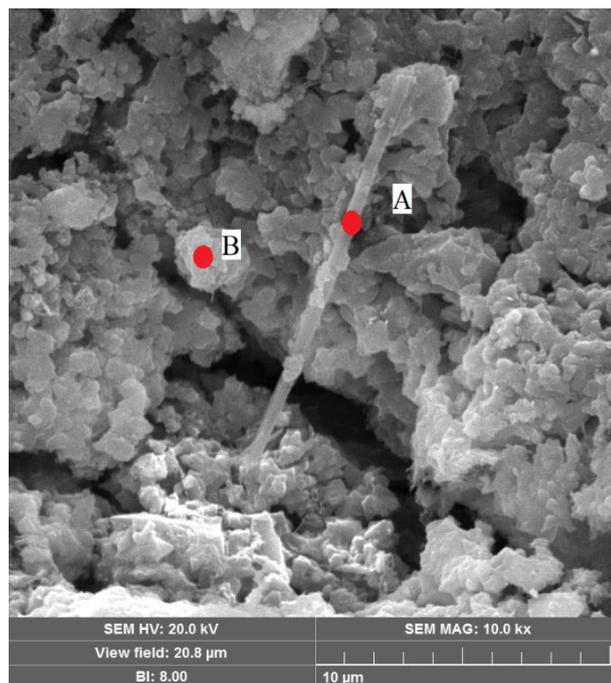


Figura 4.29 – Microestrutura da ACB14

Tabela 4.11 – Resultado do EDS da ACB14

Elemento	Concentração Aparente (%)	
	Ponto A	Ponto B
C	2,36	8,52
O	8,23	9,14
Mg	0,06	0,07
Al	0,32	0,27
Si	1,25	1,36
S	0,3	0,11
Fe	0,16	0,13
K	0,28	0,35
Ca	11,10	9,36

A partir da análise microestrutural das argamassas, após a ruptura no ensaio de resistência à compressão, foi possível visualizar a aparência da superfície das amostras e constatou-se que as amostras com 14% de substituição apresentaram superfície mais uniforme, conforme visualizado nas imagens com magnitude de 100x, que a amostra de referência. A partir das imagens de maior magnitude de todas as argamassas aliadas à identificação dos elementos majoritários por análise de EDS pontual, o hidróxido de cálcio foi visualizado apenas na amostra ACB0, de referência. Segundo a análise mineralógica e termogravimétrica, em pastas, as amostras de referência apresentam maior quantidade de hidróxido de cálcio, do que àquelas com CCB600. Tal fato é explicado pela ocorrência da reação pozolânica, com a presença das cinzas na hidratação do cimento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

- A cinza do colmo do bambu calcinada a 600 °C pode ser utilizada como adição mineral do tipo pozolânica, substituindo o cimento Portland em teores de 6% a 14%;
- Na calcinação a partir de 700 °C, a sílica amorfa presente nas cinzas do colmo do bambu tende a cristalizar-se na forma de quartzo;
- A CCB600 apresentou índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias de 93,51%, superior ao limite mínimo da NBR 12653 (ABNT, 2014), que é de 90%. Os índices da CCB500 e CCB700 foram de respectivamente 75,93% e 84,65%;
- Foi determinado que a temperatura de 600 °C é a mais adequada para a produção de cinzas do colmo de bambu com propriedades pozolânicas;
- As pastas contendo 10% de substituição do cimento pelas CCB600 apresentaram menores quantidades de hidróxido de cálcio aos 56 dias, dentre todas as avaliadas, tanto na análise mineralógica, quanto na termogravimétrica.
- A incorporação das CCB600 em teores entre 6% e 14% de substituição do cimento não produziu efeitos na consistência de argamassas;
- Na resistência à compressão de argamassas, teores de 6% a 14% de substituição do cimento por CCB600 produziram um acréscimo de resistência, em relação à argamassa de referência, de 10 a 15% aos 28 dias;
- As CCB600 densificaram a matriz da argamassa, deixando-a menos porosa, conforme a microestrutura visualizada.

5.2 Sugestões

Diante dos benefícios ambientais, econômicos e técnicos da utilização de cinzas de bambu que foram abordados nessa pesquisa, são listadas a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras que visem a continuidade no estudo desse material:

- Estudo comparativo entre cinzas provenientes do colmo e de folhas do bambu, em substituição parcial ao cimento Portland;

- Realização de ensaios em argamassa com teores de 6, 10 e 14% de substituição do cimento por CCB para análise de outras propriedades no estado endurecido, tais quais: resistência à tração, módulo de elasticidade, profundidade de carbonatação, absorção de água capilar, absorção de água total, índice de vazios, porosidade por intrusão de mercúrio, absorção de cloretos e reação álcali-agregado;
- Estudo do potencial de utilização das CCB em concretos, como adição mineral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AITCIN, P. **Concreto de alto desempenho.** Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo: PINI, 2000.

ALTOÉ, S. P. S.; MARTINS, C. H. **A influência da temperatura de queima na pozolanicidade da cinza de bagaço de cana-de-açúcar.** Revista de Engenharia e Tecnologia, v.7, n. 3, 2015.

ARAGÃO, G. H. **Estudo comparativo das características das malhas fabricadas com fibras de viscose e de viscose de bambu.** 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** São Paulo: 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa específica e massa específica aparente: NBR NM 52.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios: NBR NM 45.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - Especificação: NBR 7211.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1996.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto - Especificação: NBR 11578.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica: NBR 16605**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland comum: NBR 5732**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aglomerantes de origem mineral - Terminologia: NBR 11172**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5733**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alto-forno: NBR 5735**. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland pozolânico: NBR 5736**. Rio de Janeiro, 1991.

ASTM International. **Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement: C219-14^a**. West Conshohocken: 2014.

BALDUINO JUNIOR, A. L.; BALDUINO, T. Y.; FRIEDERICHS, G.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. **Energetic potential of bamboo culms for industrial and domestic use in Southern Brazil**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 46, n. 11, p. 1963-1968, 2016.

BETIOLI, A. M.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, G. **Relação entre o comportamento reológico e os fenômenos físico-químicos no início da hidratação do cimento Portland com adição de filler**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 12., 2008, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: 2008.

BONILLA, S.H.; GUARNETTI, R.L.; ALMEIDA, C.M.V.B.; GIANNETTI, B.F. **Sustainability assessment of a giant bamboo plantation in Brazil: exploring the influence of labour, time and space**. *Journal of Cleaner Production*, v.18, p. 83-91, 2010.

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: na introduction**. 8. ed. United States of America: Wiley, 2010.

COSTA, T. M. S.; MARTINELLI, J. R.; MATOS, J. R. **Análise Térmica aplicada a estudos de ecoeficiência do bambu para processos de carbonização**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 16., 2004, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: 2004.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza da casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORDEIRO, L. N. P.; MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C. **Análise do potencial pozolânico de casca de arroz (CCA) através da técnica de refinamento de Rietveld**. Revista Matéria, artigo 11543, p. 150-158, 2014.

CUENCA, J.; RODRIGUEZ, J.; MARTIN-MORALES, M.; SANCHEZ-ROLDAN, Z.; ZAMORANO, M. **Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete**. Construction and Building Materials, v. 40, p. 702-709, 2013.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas**. 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1992.

DE PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

DE PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SARAZ, J. A. O. **Sugarcane bagasse ash as a partial-potland-cement-replacement material**. Dyna, v. 77, n. 163, p 47-54, 2010.

DWIVEDI, V. N.; SINGH, N. P.; DAS, S. S.; SINGH, N. B. **A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash.** International Journal of Physical Sciences, v. 1, n. 3, p. 106-111, 2006.

EEOB. Department of Ecology, Evolution and Organismal Biology. **Distribuição geográfica dos bambus lenhosos no mundo.** Disponível em: <<http://www.eeob.iastate.edu/research/bamboo/maps/world-total-woody.gif>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

EL-JAZAIRI B., ILLSTON J. M. **A simultaneous semiisothermal method of thermogravimetry and derivative thermogravimetry, and its application to cement pastes.** Cement Concrete Research, v. 7, p. 247–257, 1977.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. **Agregados para a construção civil.** In: ISAIA, G. C. (Org.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: Ibracon, 2007.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. **Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação.** In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Org.). Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. Rio de Janeiro: ICH, 2017. p. 10-27.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **World bamboo resources – A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005.** Rome: FAO, 2007.

FRÍAS, M.; SAVASTANO, H.; VILLAR, E.; ROJAS, M. I. S.; SANTOS, S. **Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes.** Cement and Concrete Composites, v. 34, p. 1019-1023, 2012.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GHAVAMI, K. **Bamboo as reinforcement in structural concrete elements.** Cement and Concrete Composites, v. 27, p. 637-649, 2005.

GRAÇA, Vera Lúcia. **Bambu: Técnicas para o cultivo e suas aplicações.** 2. ed. São Paulo: Ícone, 1988.

GRIMSHAW, R. W. **The chemistry and physics of clays**. 4. ed. Londres: Ernest Benn Limited, 1971.

GUARNETTI, R. L. **Cogeração de eletricidade utilizando bambu no Brasil: aspectos técnicos, econômicos e ambientais**. 2013. Tese (Doutorado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GUILHERME, D. O.; RIBEIRO, N. P.; CEREDA, M. P. **Cultivo, manejo e colheita do bambu**. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. Rio de Janeiro: ICH, 2017. p. 28-41.

HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. Londres: ELSEVIER, 2008.

HIGUCHI, T. **Bamboo in Japan**. Japão: Kioto University, 1981.

JAMARILLO, S. V. **La guadua en los proyectos de inversion**. In: Congreso Mundial de Bambú/Gadua. Pereira, Colômbia, 1992. *Anais...* Pereira: 1992.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Org.). *Tecnologias e materiais alternativos de construção*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. p. 145-190.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; DOS SANTOS, J. C. M. **Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement**. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 460-465, 2014.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration**. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, p. 1939-1947, 2003.

LEWIS, R.; SEAR, L.; WAINWRIGHT, P.; RYLE, R. **Cementitious additions**. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S. (Ed.). *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*. Oxford: Elsevier, 2003.

LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. Technical Report v. 18. International Network for Bamboo and Rattan - INBAR. Beijing: BRILL, 1998.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias**: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju. 2008. Dissertação

(Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta Scientiarum. Technology, v. 32, n. 4, p. 383-389, 2010.

LONDOÑO, X. **Distribuição, morfologia, taxonomia, anatomia, silvicultura y usos de los bambues de lo Nuevo Mundo**. In: Congreso Colombiano de Botânica, 3., 2004, Popayan. *Anais...* Popayan: 2004.

LÓPEZ, O. H. **The gift of the gods**. Colômbia: D'VINNI, 2003.

MURAKAMI, C. H. **O bambu: matéria-prima do futuro**. Boletim Florestal, v.1, n. 6, p. 5, 2007.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**, Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MANHÃES, A. P. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil: abordagem preliminar**. 2008. Monografia (Curso de Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3. ed. Berkeley: McGraw-Hill, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. Brasília: 2017.

MO, K. H.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; YAP, S. P. **Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review**. Journal of Cleaner Production, v. 117, p. 122-138, 2016.

MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; SANQUETTA, M. N. I. **Bambu, uma alternativa para o sequestro de carbono**. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. Rio de Janeiro: ICH, 2017. p. 28-41.

MOIR, G. **Cements**. In: NEWMAN, J.; CHOO, B. S. (Ed.). *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*. Oxford: Elsevier, 2003.

MORAES, J. C. B. **Utilização das cinzas de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

MORAES, R. C. **Efeitos físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MORALES, E. V.; VILLAR-COCIÑA, E.; FRÍAS, M.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR, H. **Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation**. *Cemente & Concrete Composites*, v.31, p. 22-28, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, L. F. A. **Conhecendo bambus e suas potencialidades para uso na construção civil**. 2013. Monografia (Pós-graduação em engenharia civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; MELLADO, A.; ORDOÑEZ, L. M. **Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method**. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 2, p. 227-231, 2001.

PEREIRA, A. M.; DA SILVA, C. A. R.; QUEIROZ, D. C. A.; DE MORAES, M. J. B.; MELGES, J. L. P.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz**. *Revista Matéria*, artigo 11591, p. 227-238, 2015.

PEREIRA, M. A. R. **Bambu: características e aplicações**. Bauru: UNESP, 2001.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Editora Globo, 1998.

PINHEIRO, D. G. L. **Avaliação da atividade pozolânica em cinzas de casca de arroz (CCA) com diferentes teores de sílica amorfa**. 2016. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMBO, M. K. D.; RAMBO, M. C. D.; RODRIGUES, K. J. C.; ALEXANDRE, G. P. **Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais.** *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 862-868, 2015.

RODIER, L.; BILBA, K.; ONÉSIPPE, C.; ARSÈNE, M. A. **Study of pozzolanic activity of bamboo stem ashes for use as partial replacement of cement.** *Materials and Structures*, v. 50, n. 1, 2017.

SINGH, N. B.; DAS, S. S.; SINGH, N. P.; DWIVEDI, V. N. **Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement.** *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, v. 14, p. 69-76, 2007.

SORENG, R. J.; PETERSON, P. M.; ROMASCHENKO, K.; DAVIDSE, G.; ZULOAGA, F. O.; JUDZIEWICZ, E. J.; FILGUEIRAS, T. S.; DAVIS, J. I.; MORRONE, O. **A worldwide phylogenetic classification of the Poaceae (Gramineae).** *Journal of Systematics and Evolution*, v.53, p.117-137, 2015.

SUN, Z.; TANG, Y.; MORIMURA, S.; KIDA, K. **Reduction in environmental impact of sulfuric acid hidrolisis of bamboo for production of fuel etanol.** *Bioresource Technology*, v. 128, p. 87-93, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TASHIMA, M. M. **Cinza da Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento das matrizes de cimento Portland.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

TEIXEIRA, A. A. **Painéis de bambu para habitação econômica: Avaliação do desempenho de painéis revestidos com argamassa.** 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília.

TOMAZELLO FILHO, M.; AZZINI, A. **Estrutura anatômica, dimensões das fibras e densidade básica de colmos de *Bambusa Vulgaris* Schrad.** IPEF, n. 36, p. 45-50, 1987.

UBIDIA, J. M. **Traditional and current uses of bamboo in Latin America with emphasis on Colombia and Ecuador.** Quito: Escuela Politécnica Litoral, 2001.

UMOH, A. A.; ODESOLA, I. **Characteristics of Bamboo Leaf Ash Blended Cement Paste and Mor.** Civil Engineering Dimension, v. 17, n. 1, p. 22-28, 2015.

VILLAR-COCIÑA, E.; MORALES, E. V.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR, H.; FRÍAS, M. **Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the Kinect parameters.** Cement and Concrete Composites, v. 33, p. 68-73, 2010.

VILLAR-COCIÑA, E.; SAVASTANO, H.; RODIER, L.; LEFRAN, M.; FRÍAS, M. **Pozzolanic characterization of cuban bamboo leaf ash: calcining temperature and kinetic parameters.** Waste biomass valor, v. 9, p. 691-699, 2018.