

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



TESE

**Avaliação do potencial da cinza de folha de bambu como material cimentício
suplementar na produção de concretos e seus efeitos sob a ação de íons
cloreto**

Félix Krolow Sell Junior

Pelotas, 2024.

Félix Krolow Sell Junior

Avaliação do potencial da cinza de folha de bambu como material cimentício suplementar na produção de concretos e seus efeitos sob a ação de íons cloreto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

Pelotas, 2024.

Félix Krolow Sell Junior

Avaliação do potencial da cinza de folha de bambu como material cimentício suplementar na produção de concretos e seus efeitos sob a ação de íons cloreto

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 de Novembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. César Antonio Oropesa Avellaneda – UFPEL (Orientador)

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo.

Documento assinado digitalmente



FÁBIO COSTA MAGALHÃES

Data: 02/12/2024 16:10:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães – IFRS (Coorientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Documento assinado digitalmente



CHARLEI MARCELO PALIGA

Data: 26/11/2024 18:01:08-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Charlei Marcelo Paliga

Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Documento assinado digitalmente



FLÁVIA COSTA DE MATTOS

Data: 28/11/2024 13:40:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Flávia Costa de Mattos

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas.

Documento assinado digitalmente



MAURO DE VASCONCELLOS REAL

Data: 27/11/2024 11:26:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

S467a Sell Junior, Félix Krolow

Avaliação do potencial da cinza de folha de bambu como material cimentício suplementar na produção de concretos e seus efeitos sob a ação de íons cloreto [recurso eletrônico] / Félix Krolow Sell Junior ; César Antonio Oropesa Avellaneda, orientador ; Fábio Costa Magalhães, coorientador. — Pelotas, 2024.

118 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Cinza de folha de bambu. 2. Íons cloreto. 3. Materiais cimentícios suplementares. 4. Durabilidade. 5. Concreto. I. Avellaneda, César Antonio Oropesa, orient. II. Magalhães, Fábio Costa, coorient. III. Título.

CDD 620.11063

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

**Dedico este trabalho aos meus pais, familiares e
amigos.**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me abençoar todos os dias e me dar forças para encarar os desafios;

Aos meus pais, Félix Krolow Sell e Andreia Teixeira Sell, por todo apoio, ajuda e incentivo destinados a mim;

Aos meus amigos e familiares que sempre estiveram ao meu lado;

Ao meu Orientador César Antonio Oropesa Avellaneda, por toda sua dedicação, apoio, incentivo e auxílio na realização da pesquisa;

Ao meu coorientador Fábio Costa Magalhães, por me ajudar da melhor forma, sempre se dedicando e passando o seu conhecimento de maneira brilhante;

Ao amigo Gustavo Bosel Wally, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho;

Ao meu tio e laboratorista do IFRS Fernando Ritiéle Teixeira, por todo apoio, incentivo e auxiliar na realização de caracterização de materiais utilizados na pesquisa, produção dos concretos e execução dos ensaios;

Aos meus amigos Charles Tiago Silveira, Jardel Gehrmann, Cleber Pinzani e Natanael Voss, assim como meus pais, minha irmã Andressa e minha avó Josefa Teixeira pelo auxílio na coleta das folhas de bambu;

Ao professor Cezar Bastos, Diretor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande, pela disponibilização das instalações do Laboratório de Construção Civil e Geotecnica para a realização de ensaios.

Aos técnicos e laboratoristas do Laboratório de Construção Civil e Geotecnica da Escola de Engenharia, Engenheiros Júlio e Luciano, pelo auxílio na execução dos ensaios.

Ao professor Dr. Wladimir Hernandez Flores pelas contribuições valiosas.

Ao amigo Maikon Pires pela contribuição auxílio e contribuição valiosa na realização de análises laboratoriais.

A minha amiga e colega Daniele Ferreira Lopes pelas contribuições na realização de análises durante a pesquisa.

Ao Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC), do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Rio Grande, onde foi desenvolvido parte do programa experimental apresentado nesta pesquisa;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), por me proporcionar a oportunidade de fazer parte do programa de doutorado;

A Universidade Federal de Pelotas;

Obrigado!

RESUMO

Sell Junior, Félix Krolow. **Avaliação do potencial da cinza de folha de bambu como material cimentício suplementar na produção de concretos e seus efeitos sob a ação de íons cloreto.** Orientador: Cesar Antonio Oropesa Avellaneda. 2024. 118 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

O cimento é um material de construção amplamente utilizado em todo o mundo, contudo, sua produção acarreta significativos impactos ambientais, caracterizados pelo elevado consumo de energia, extração desenfreada de recursos naturais e emissão considerável de dióxido de carbono. Diante dessa realidade, pesquisadores têm se dedicado à análise de alternativas que possam substituir parcialmente o cimento na produção de concreto. Considerando a prática mundial de incorporar resíduos com propriedades pozolânicas na produção de concreto, a avaliação da atividade pozolânica de materiais cimentícios suplementares torna-se crucial para a busca de soluções mais sustentáveis. Nesse contexto, este estudo explora o potencial da cinza de folha de bambu (BLA), proveniente do descarte das folhas de bambu, como substituto parcial do cimento. A pesquisa focou na produção da BLA, variando as temperaturas de calcinação (500, 600, 700, 900 e 1000 °C). A cinza foi caracterizada por meio de análises químicas, físicas, térmicas e da atividade pozolânica, visando identificar a melhor condição para a produção. A BLA com as melhores propriedades foi então utilizada como substituto parcial ao cimento (5 %, 10 % e 15 %) na produção de concretos, que foram submetidos a análises de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e coeficiente de difusão de cloretos, conforme as metodologias da NT Build 492 e UNE 83987. A análise da composição química das BLAs demonstrou que, em todas as temperaturas de calcinação, trata-se de material pozolânico. No entanto, as temperaturas mais elevadas (900 e 1000 °C) evidenciaram uma estrutura cristalina, ao passo que as cinzas calcinadas a 500, 600 e 700 °C exibiram elevado amorfismo e índice de atividade pozolânica em conformidade com as exigências da NBR 12653, além de apresentarem alta reatividade pelo método de Chapelle Modificado. A BLA calcinada a 600 °C destacou-se como a mais eficiente, exibindo uma característica pozolânica reativa de estrutura amorfa e um elevado teor de sílica em sua composição. Ao substituir parcialmente o cimento por BLA no concreto, observou-se uma diminuição na absorção de água por capilaridade e no coeficiente de difusão de cloretos à medida que o teor de substituição aumentava. Além disso, houve um aumento na resistência à compressão. Com a substituição de 15%, registrou-se um aumento superior a 18% na resistência à compressão, além de reduções superiores a 35% na absorção de água por capilaridade e 71% no coeficiente de difusão de cloretos, indicando a viabilidade do uso desse resíduo agrícola como um material cimentício suplementar.

Palavras-chave: Cinza de folha de bambu, Materiais cimentícios suplementares, Concreto, Íons cloreto, Durabilidade.

ABSTRACT

Sell Junior, Félix Krolow. **Evaluation of the potential of bamboo leaf ash as a supplementary cementitious material in concrete production and its effects under the action of chloride ions.** Advisor: Cesar Antonio Oropesa Avellaneda. 2024. 118 p. Thesis project (Doctoral Degree in Science and Material Engineering) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

Cement is a widely used construction material worldwide. However, its production has significant environmental impacts, characterized by high energy consumption, unbridled extraction of natural resources, and considerable carbon dioxide emissions. Given this reality, researchers have been dedicated to analyzing alternatives that can partially replace cement in concrete production. Considering the worldwide practice of incorporating waste with pozzolanic properties in concrete production, the evaluation of the pozzolanic activity of supplementary cementitious materials becomes crucial for the search for more sustainable solutions. In this context, this study explores the potential of bamboo leaf ash (BLA), derived from the disposal of bamboo leaves, as a partial substitute for cement. The research focused on the production of BLA, varying the calcination temperatures (500, 600, 700, 900, and 1000 °C). The ash was characterized through chemical, physical, thermal, and pozzolanic activity analyses, aiming to identify the best condition for production. The BLA with the best properties was then used as a partial substitute for cement (5%, 10% and 15%) in the production of concrete, which was subjected to analyses of compressive strength, water absorption by capillarity and chloride diffusion coefficient, according to the methodologies of NT Build 492 and UNE 83987. The analysis of the chemical composition of the BLAs showed that, at all calcination temperatures, it is a pozzolanic material. However, the highest temperatures (900 and 1000 °C) showed a crystalline structure, while the ashes calcined at 500, 600 and 700 °C exhibited high amorphism and pozzolanic activity index in accordance with the requirements of NBR 12653, in addition to presenting high reactivity by the Modified Chapelle method. The BLA calcined at 600 °C stood out as the most efficient, exhibiting a reactive pozzolanic characteristic of amorphous structure and a high silica content in its composition. When partially replacing cement with BLA in concrete, a decrease in water absorption by capillarity and in the chloride diffusion coefficient was observed as the substitution content increased. In addition, there was an increase in compressive strength. With the substitution of 15%, an increase of more than 18% in compressive strength was recorded, in addition to reductions of more than 35% in water absorption by capillarity and 71% in the chloride diffusion coefficient, indicating the viability of using this agricultural residue as a supplementary cementitious material.

Key-words: Bamboo leaf ash, Supplementary cementitious materials, Concrete, Chloride ions, Durability.

Lista de figuras

Figura 1 – Representação esquemática da microestrutura do concreto.....	24
Figura 2 - Representação esquemática do modelo de vida útil proposto por Tuutti.	39
Figura 3 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.	41
Figura 4- Fluxograma do programa experimental.....	47
Figura 5 - Local de coleta das folhas de bambu da espécie <i>Bambusa Tuldoides</i>	48
Figura 6 – Forno mufla utilizado para calcinação das folhas de bambu.	49
Figura 7 – Realização do processo de moagem da BLA.....	50
Figura 8 – Representação da separação de áreas.....	52
Figura 9 - Distribuição granulométrica da areia fina, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).....	58
Figura 10 - Distribuição granulométrica da areia média, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).....	59
Figura 11 - Composição granulométrica brita, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).	61
Figura 12 – Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	65
Figura 13 – Detalhe de como foi realizado o corte dos corpos de prova para realização da NT Build 492.	66
Figura 14 – Disposição da instalação do ensaio da NT Build 492.....	67
Figura 15 – Realização ensaio NT Build 492.....	68
Figura 16 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos.	68
Figura 17 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para UNE 83987.	69
Figura 18 – Ilustração aparato utilizado no ensaio UNE 83987.....	70
Figura 19 – Realização ensaio UNE 83987.....	71
Figura 20 – Esquema determinação do <i>time lag</i> (τ), e período dos regimes estacionário e não estacionário.	72
Figura 21 – Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 500 °C.....	79
Figura 22 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 600 °C.....	79

Figura 23 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 700 °C.....	80
Figura 24 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 900 °C.....	80
Figura 25 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 1000 °C.....	81
Figura 26 – Análise difração de raios-X BLA calcinada a 500 °C.	82
Figura 27 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 600 °C.	83
Figura 28 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 700 °C.	83
Figura 29 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 900 °C.	84
Figura 30 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 1000 °C.	84
Figura 31 – Análise DSC para BLA calcinada a 500 °C.	88
Figura 32 - Análise DSC para BLA calcinada a 600 °C.	88
Figura 33 - Análise DSC para BLA calcinada a 700 °C.	89
Figura 34 – Resistência à compressão média.	93
Figura 35 – Ensaio Absorção de água por capilaridade.	95
Figura 36 - Alteração da absorção de água por capilaridade em relação concreto de referência ao final do ensaio.....	96
Figura 37 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm}) pelo método da NT Build 492.	97
Figura 38 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{ns}) obtido através do método de teste UNE 83987.....	100
Figura 39 – Correlação entre os coeficientes de migração em estado não estacionário obtidos através dos testes Multiregime (D_{ns}) e NT Build 492 (D_{nssm}).	101

Lista de tabelas

Tabela 1 – Requisito dos materiais pozolânicos.....	28
Tabela 2 – Característica química da cinza de folha de bambu.	32
Tabela 3 – Composição dos traços para realização ensaio de atividade pozolânica.	54
Tabela 4 – Consumo de materiais para traços de concreto (Kg/m ³).....	56
Tabela 5 – Caracterização física da areia fina.....	58
Tabela 6 - Características física areia média.....	59
Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.	60
Tabela 8 – Características aditivo superplastificante.....	62
Tabela 9 – Voltagem e duração do ensaio NT Build 492.....	67
Tabela 10 – Classificação coeficiente de difusão quanto a penetração de íons cloreto.	74
Tabela 11 – Ensaio de determinação da massa específica.....	75
Tabela 12 – Resultado fluorescência de raio X	76
Tabela 13 – Ensaio de Chapelle Modificado, teores de cal fixada, por atividade pozolânica.....	77
Tabela 14 – Determinação da porcentagem amorfa das diferentes temperaturas de calcinação.....	85
Tabela 15 – Resultado da análise de granulometria à laser	87
Tabela 16 – Ensaio de índice de atividade pozolânica com cal.....	89
Tabela 17 – Ensaio de Atividade pozolânica com cimento aos 28 dias.....	90
Tabela 18 – Resistência à compressão média.	92
Tabela 19 – Ensaio absorção de água por capilaridade média.	95
Tabela 20 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm}) obtido através do método de teste NT Build 492.	97
Tabela 21 - Coeficientes de difusão de cloretos (estado estacionário e não estacionário) obtidos através do método de ensaio UNE 83987 aos 28 dias.	99
Tabela 22 - Coeficientes de difusão de cloretos (estado estacionário e não estacionário) obtidos através do método de ensaio UNE 83987 aos 90 dias.	99

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	Delimitação da pesquisa	19
1.4	Estrutura do trabalho.....	20
2	Revisão bibliográfica	21
2.1	Utilização do bambu.....	21
2.2	Concreto de cimento Portland e sua estrutura porosa	22
2.3	Utilização de Resíduos Industriais em Matrizes de cimento Portland	25
2.3.1	Pozolanas	26
2.3.2	Cinza da folha de bambu	29
2.4	Conceitos de vida útil de estruturas de concreto armado.....	36
2.5	Indicadores de durabilidade	41
2.6	Técnicas de avaliação e da durabilidade do concreto.....	44
3	Programa experimental.....	46
3.1	Produção da cinza de folha de bambu	47
3.1.1	Coleta do material.....	47
3.1.2	Calcinação da folha de bambu	48
3.1.3	Moagem da cinza de folha de bambu	49
3.2	Caracterização da cinza de folha de bambu	50
3.2.1	Determinação da massa específica	50
3.2.2	Análise granulométrica	51
3.2.3	Análise química por fluorescência de raio X	51
3.2.4	Difração de raios-X	51
3.2.5	Análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG)	53
3.2.6	Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	53
3.2.7	Índice de atividade pozolânica com cal.....	53
3.2.8	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	54
3.2.9	Chapelle modificado	55
3.3	Dosagem dos concretos.....	55
3.4	Materiais.....	56

3.4.1	Cimento	57
3.4.2	Agregado miúdo	57
3.4.3	Agregado graúdo	60
3.4.4	Água	61
3.4.5	Cinza de folha de bambu	61
3.4.6	Aditivo superplastificante	61
3.5	Preparação dos corpos de prova	62
3.5.1	Produção dos concretos	62
3.5.2	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	63
3.6	Ensaios em corpos de prova de concreto	63
3.6.1	Resistência à compressão.....	63
3.6.2	Absorção de água por capilaridade	64
3.6.3	Coeficiente de migração de cloretos no concreto – NT Build 492	65
3.6.4	Ensaio acelerado de migração de cloretos no concreto – Método Multirregime - UNE 83987	69
3.6.5	Classificação dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão quanto a penetração de cloretos	74
4	Resultados e discussões	75
4.1	Caracterização da cinza de folha de bambu	75
4.1.1	Massa específica	75
4.1.2	Análise química por fluorescência de raio X.....	76
4.1.3	Chapelle Modificado	77
4.1.4	Análise térmica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG).....	78
4.1.5	Difração de raios-X	82
4.1.6	Análise granulométrica	86
4.1.7	Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	87
4.1.8	Índice de atividade pozolânica com cal.....	89
4.1.9	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.....	90
4.1.10	Determinação da melhor condição de produção da BLA.....	91
4.2	Avaliação dos concretos produzidos	92
4.2.1	Resistência à compressão.....	92
4.2.2	Absorção de água por capilaridade	94
4.2.3	Coeficiente de migração de cloretos no concreto – NT Build 492	96

4.2.4	Ensaio acelerado de migração de cloretos no concreto - multiregime - UNE 83987	98
4.2.5	Correlação entre os coeficientes de migração em estado não estacionário	101
5	Conclusões	102
5.1	Principais conclusões.....	102
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	105

1 Introdução

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no impulso econômico de diversos países, incluindo o Brasil, e a produção de cimento Portland destaca-se como um indicador crucial nesse cenário. Em 2022, o Brasil registrou a produção expressiva de 65,9 milhões de toneladas de cimento, contribuindo para a produção global desse material em larga escala. Contudo, esse panorama econômico favorável vem acompanhado de impactos ambientais significativos no processo de fabricação do cimento Portland. Tais impactos incluem a exploração excessiva de recursos naturais não renováveis, alto consumo energético durante a produção e consideráveis emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (METHA e MONTEIRO, 2014; BOLTE *et al.*, 2019; NGUYEN *et al.*, 2019; SASANIPOUR, 2019; WEI e CEN, 2019; SNIC, 2022).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a indústria cimenteira global é responsável por aproximadamente 7% das emissões de gases do efeito estufa (CO₂) em nível mundial. No Brasil, esse índice é mais modesto, cerca de 2,6%, atribuível a iniciativas sustentáveis implementadas pela indústria nas últimas décadas. Em 2018, dados da *Global Cement and Concrete Association* revelaram que a indústria de materiais cimentícios emitiu 637 kg de CO₂ por tonelada de cimento produzido.

Nesse contexto, pesquisadores têm se dedicado a estudos técnicos visando analisar alternativas que possam substituir parcialmente o cimento, mantendo a qualidade do concreto, e simultaneamente abordar preocupações relacionadas ao desenvolvimento sustentável e equilíbrio ambiental para as gerações presentes e futuras (DWIVEDI *et al.*, 2006; KNIGHT *et al.*, 2023; HAMADA *et al.*, 2023; HASSAN *et al.*, 2023; SNELLINGS *et al.*, 2023).

A indústria da construção civil tem o potencial de incorporar resíduos e subprodutos em diversas etapas, como o uso de cinzas e escórias na produção de cimentos, concretos e argamassas. A inclusão desses resíduos, com propriedades pozolânicas, no concreto é considerada uma alternativa eficaz para a destinação e estabilização desses materiais, proporcionando melhorias nas propriedades do concreto, como resistência à compressão, potencial de durabilidade e retração. Contudo, a transformação de resíduos em insumos para a indústria requer avaliações

quanto à viabilidade técnica, econômica e ambiental (PAYÁ *et al.*, 2013; CORDEIRO *et al.*, 2019).

Dentro desse contexto, surge a possibilidade promissora de utilizar cinza de folha de bambu (*bamboo leaf ash* - BLA) como substituto parcial ao cimento. Estudos anteriores (Dwivedi, 2006; Villar-Cocina *et al.*, 2011; Frías *et al.*, 2012; ASHA *et al.*, 2014; Silva, 2020) demonstraram que essa cinza possui atividade pozolânica, com mais de 50 % de sílica, característica amorfa e capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, formando materiais mais resistentes.

Apesar de alguns estudos relacionados à utilização da cinza de folhas de bambu (BLA) no concreto, há uma lacuna significativa na literatura em relação à sua utilização como substituto parcial ao cimento e seus efeitos na durabilidade de estruturas de concreto armado. Portanto, esta pesquisa busca aprimorar os estudos sobre a produção e utilização do BLA, abrangendo a investigação do tratamento térmico das folhas de bambu, o tempo de moagem necessário para obter a granulometria desejada, além da avaliação das propriedades químicas, físicas e mecânicas do material. Foi realizada também uma análise de sua influência como substituto parcial ao cimento, abordando aspectos como resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e coeficiente de difusão de cloretos no concreto.

1.1 Justificativa

Desde o início da década de 1970, a crescente preocupação com a deterioração e qualidade do meio ambiente tem se intensificado. Consequentemente, a economia mundial tem demandado das indústrias uma maior responsabilidade ambiental em relação à produção, transporte e gestão de resíduos de seus produtos. Diante desse contexto, as indústrias buscam utilizar matérias-primas e adotar processos industriais menos agressivos ao meio ambiente, visando a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e a reciclagem eficiente de resíduos, reintegrando-os no ciclo produtivo (JERÔNIMO, 2014).

A avaliação da atividade pozolânica de materiais com potencial para substituir, ainda que parcialmente, o cimento no concreto torna-se cada vez mais crucial devido à crescente necessidade de produtos mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se a cinza da folha de bambu, devido à sua fácil obtenção em território brasileiro e ao

fato de não ser prejudicial ao meio ambiente quando recebe um destino adequado (VILLAR-COCIÑA, 2011; DA SILVA, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Quando a folha de bambu é descartada no ambiente, pode causar um efeito alelopático caracterizado pela liberação de compostos fitotóxicos que inibem o estabelecimento ou crescimento de outras plantas vizinhas, um fenômeno conhecido como "doença do solo". Para evitar impactos ambientais negativos, muitas vezes essa folha é queimada antes do descarte, porém sem uma destinação adequada, o que pode resultar em poluição se não utilizada para outros fins (SCHULZ *et al.*, 2010; TORRES, 2015)

Para que essa cinza seja efetivamente utilizada no concreto, é fundamental que ela atue como material pozolânico e apresente uma finura compatível com a do cimento Portland, permitindo assim preencher os poros do concreto. Esta característica é crucial para a qualidade e desempenho do material final (VILLAR-COCIÑA, 2011; DA SILVA, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

Assim, a folha de bambu, quando queimada e moída, pode ser uma alternativa viável para substituir parcialmente o cimento no concreto, oferecendo benefícios adicionais a esse material. O estudo de Asha (2014) destaca que a utilização da cinza da folha de bambu (BLA) melhora significativamente a durabilidade de estruturas de concreto quando expostas ao ataque de ácidos e cloretos. Essa abordagem não apenas contribui para o aproveitamento de um subproduto frequentemente negligenciado, mas também ressalta os potenciais benefícios ambientais e de desempenho que a substituição parcial do cimento por BLA pode proporcionar ao setor da construção civil.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade da utilização da cinza de folha de bambu como material cimentício suplementar na produção de concretos, explorando as possíveis implicações em termos de potencial de durabilidade para estruturas de concreto armado.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Verificar a influência de diferentes temperaturas de calcinação nas propriedades da BLA;
- Verificar a influência de diferentes tempos de moagem no tamanho das partículas da BLA;
- Determinar composição química do BLA;
- Determinar a pozolanicidade da BLA produzida em diferentes temperaturas de calcinação por meio do índice de atividade pozolânica com cal (ABNT NBR, 5751, 2015) e com cimento (ABNT NBR 5752, 2014);
- Determinação da reatividade pozolânica da BLA produzida em diferentes temperaturas de calcinação por meio do ensaio de Chapelle modificado;
- Verificar a influência da variação de substituição parcial de cimento por BLA na resistência à compressão dos concretos;
- Verificar a influência da variação de substituição parcial de cimento por BLA na absorção de água por capilaridade dos concretos;
- Verificar a influência da variação dos teores de substituição parcial de cimento por BLA na determinação do coeficiente de difusão de cloretos dos concretos por meio da NT Build 492 (1999);
- Verificar a influência da variação dos teores de substituição parcial de cimento por BLA na determinação da migração acelerada de cloretos dos concretos por meio da UNE 83987 (2012);

1.3 Delimitação da pesquisa

Há diversos fatores que podem influenciar no desempenho do concreto, como o tipo de cimento, a relação água/aglomerante, o uso de aditivos, o tipo e formato dos agregados graúdos e miúdos, as condições de preparo, cura e ensaios, entre outros. Diante dessa complexidade, foi essencial estabelecer limites que orientam o programa experimental, destacando os seguintes itens:

- Será utilizada a folha de uma única espécie, sendo está *bambusa tuldaoides*;
- Serão utilizadas temperaturas de calcinação de 500, 600, 700, 900 e 1000 °C;

- Serão realizadas as moagens da cinza de folha de bambu em períodos de 1, 2, 3 e 4 h;
- Será utilizado apenas um tipo de cimento, sendo o cimento CP V-ARI;
- Será utilizada apenas a relação água/cimento de 0,45;
- Serão utilizadas substituições parciais de cimento por BLA no concreto em teores de 5, 10 e 15 %;

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além das referências. O primeiro capítulo abrange a introdução, justificativa, objetivos e delimitações da pesquisa.

No segundo capítulo, foi realizado um levantamento bibliográfico abrangente por meio de pesquisa exploratória, abordando conceitos fundamentais e apresentando resultados de estudos relevantes que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho.

O terceiro capítulo detalha o programa experimental, fornecendo uma descrição da metodologia empregada na pesquisa, bem como destacando o conjunto de materiais, técnicas e procedimentos adotados.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos para a caracterização da cinza de folha de bambu, juntamente com os resultados relacionados aos concretos produzidos com substituição parcial do cimento por BLA.

Finalizando, o quinto capítulo engloba as considerações finais, proporcionando uma avaliação abrangente dos resultados e *insights* obtidos ao longo da pesquisa.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Utilização do bambu

O bambu, conhecido por diversos nomes no Brasil, é uma gramínea que apresenta ampla distribuição geográfica, com cerca de 1.300 espécies em todo o mundo. O Brasil destaca-se como líder na ocorrência de bambu nas Américas, contando com aproximadamente 200 espécies, a maioria delas endêmica. Embora represente apenas 3% das florestas globais, o bambu possui grande potencial, mas ainda não atingiu plenamente sua aplicação no setor, conforme estudos da *International Network for Bamboo and Rattan* (INBAR) (SANTI, 2015; DRUMOND e WIEDMAN, 2017).

Ao longo dos milênios, o bambu tem desempenhado um papel significativo no cotidiano oriental, sendo utilizado para diversas finalidades, como alimento, estruturas de casas, paredes, telhas, portas e janelas, mobiliário, utensílios de cozinha, objetos de decoração, cercas, pontes, irrigação, drenos, embarcações, contenção de encostas, entre outras. Sítios arqueológicos no Equador mostram que o bambu é usado há cerca de 5 mil anos na América do Sul, primeiramente pelos indígenas. No Equador, Colômbia e Costa Rica, países com avançada pesquisa e aplicação do bambu, essa planta é empregada em construção de pontes, paradas de ônibus, praças de pedágio e também em programas governamentais de habitações de interesse social adaptadas às mudanças climáticas. Construções coloniais centenárias que utilizam bambu comprovam a sua durabilidade ao longo dos anos (DRUMOND e WIEDMAN, 2017).

Apesar do clima favorável e das vastas áreas degradadas no Brasil, aptas para o cultivo comercial de diferentes variedades de bambu, a sua utilização ainda se concentra em setores específicos. Em estados como Maranhão, Paraíba, Pernambuco, São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Bahia e Paraná, o bambu é cultivado para produção de biomassa, celulose, papel, painéis e fitocosméticos (SANTI, 2015; DRUMOND e WIEDMAN, 2017; GONÇALVES, 2018).

O bambu também se destaca como fonte de energia, podendo gerar álcool etanol e carvão de excelente qualidade. Sua rápida taxa de crescimento e a capacidade de absorver carbono tornam uma opção sustentável. O papel de bambu,

por sua vez, possui qualidade comparável ao papel de madeira, com uma produção significativa no Brasil, especialmente no Maranhão. Sendo que o Brasil é o único país das Américas a ter uma indústria de papel utilizando bambu, sendo estimada uma produção de aproximadamente de 150 mil toneladas de celulose de bambu por ano (RIBAS, 2015; SANTI, 2015).

A promulgação da Lei n.º 12.484/2011, que estabelece a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu (PNMBC), foi um marco no Brasil, impulsionando o cultivo dessa planta. Desta forma, o bambu tem emergido como uma alternativa notável para substituir a madeira, um recurso natural cada vez mais escasso. O interesse global por essa planta perene e renovável tem crescido devido ao seu rápido crescimento, alta produtividade por área, baixo custo e eficácia na remoção de dióxido de carbono. O aumento da utilização desse material abre portas para explorar as potenciais aplicações dos resíduos gerados durante seu processo produtivo em novos materiais (ADESANYA e RAHEEM, 2009; ASHA *et al.*, 2014; RIBAS, 2015; SANTI, 2015; SILVA *et al.*, 2021).

2.2 Concreto de cimento Portland e sua estrutura porosa

O cimento Portland alcançou uma produção global superior a 4,30 bilhões de toneladas em 2022, de acordo com dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), com o Brasil figurando como o sexto maior produtor, totalizando 65,9 milhões de toneladas. Este material, caracterizado como um pó fino com propriedades aglomerantes que endurece na presença de água, é um aglomerante hidráulico obtido por meio da moagem do clinquer. Sendo o clinquer composto por calcário e argila, finamente moídos em proporções adequadas até alcançarem uma consistência de pó extremamente fino, com partículas geralmente menores que 75 µm de diâmetro. Esse pó é então submetido à calcinação a uma temperatura próxima a 1400°C, resultando no clinquer. Após o processo de calcinação, uma quantidade específica de sulfato de cálcio é adicionada à mistura e novamente moída, originando o cimento Portland comercial (ABCP, 2002; ASTM C219 – 14^a; NEVILLE, 2013; AÏTCIN, 2016; MEHTA e MONTEIRO, 2017).

Para produzir uma tonelada de clinquer, durante o processo de calcinação, são necessários entre 100 kg e 350 kg de carvão, dependendo do processo, podendo ser utilizados gás ou outros combustíveis. A reação que demanda mais energia é a

descarbonatação do carbonato de cálcio, liberando dióxido de carbono. Essa reação ocorre em temperaturas entre 700 °C e 1000 °C em uma mistura típica contendo 80% de calcário. A energia consumida na descarbonatação é aproximadamente de 400 kcal por quilograma de clínquer, correspondendo à metade de toda a energia utilizada na produção do clínquer (MOIR, 2003; NEVILLE, 2013).

Embora o cimento Portland seja essencialmente composto por diversos compostos de cálcio, sua composição química é expressa em termos dos óxidos dos elementos presentes. O silicato tricálcico (C_3S) desempenha um papel crucial na resistência do cimento Portland, especialmente nas fases iniciais de cura até o final do primeiro mês. Em idades mais avançadas, o silicato bicálcico (C_2S) ganha maior importância, contribuindo significativamente para o desenvolvimento da resistência ao longo de um ano ou mais. O alumínio tricálcico (C_3A) também influencia a resistência, desempenhando um papel significativo na geração de calor durante a hidratação, especialmente no início do período de cura, em forma cristalina, é responsável pela rápida pega do cimento (BAUER, 2008; NEVILLE, 2013).

Quando o cimento é misturado com areia, pedra britada e água em proporções adequadas, forma-se o concreto. A maior parte desse material é composta por agregados miúdos e graúdos. A interação química entre o cimento e a água promove a ligação das partículas agregadas, resultando na formação de uma massa sólida. Ajustando adequadamente as proporções dos materiais constituintes, é possível obter concretos com uma ampla variedade de propriedades. O uso de cimentos especiais, agregados diferenciados, adições (como plastificantes, agentes incorporadores de ar, sílica ativa e cinzas volantes) e métodos de cura específicos ampliam ainda mais as possibilidades de propriedades do concreto. Este material possui um consumo anual estimado em cerca de 30 bilhões de toneladas, evidenciando a sua importância global. Diante desse consumo expressivo, torna-se claro que os esforços de pesquisa para aprimorar a sustentabilidade do concreto desempenham um papel crucial no controle do impacto ambiental (DARWIN *et al.*, 2016; MEHTA e MONTEIRO, 2017; MONTEIRO *et al.*, 2017; VERIAN *et al.*, 2018).

Embora o concreto seja comumente percebido como um material simples, sua estrutura é altamente complexa, o que dificulta a compreensão dos mecanismos envolvidos em sua formação. O concreto exibe uma distribuição heterogênea de diversos componentes sólidos, além de vazios de várias formas e tamanhos, que

podem estar completamente ou parcialmente preenchidos com solução alcalina (COIMBRA *et al.*, 2006).

Na Figura 1, é apresentado um esquema da estrutura do concreto, destacando os possíveis caminhos formados em seu interior durante o processo de hidratação da pasta de cimento. Os caminhos internos são classificados em três categorias: Caminho Condutivo Contínuo (CCP), representado por micro-poros continuamente conectados, que podem consistir em uma série de cavidades capilares conectadas por meio da rede de poros; Caminho Condutivo Descontínuo (DPC), caracterizado por micro-poros interrompidos no concreto, cuja continuidade é bloqueada pelas camadas da pasta de cimento; Isolante de Caminhos Condutivos (ICP), que é a própria pasta de cimento atuando como um "isolante" para a porosidade do concreto.

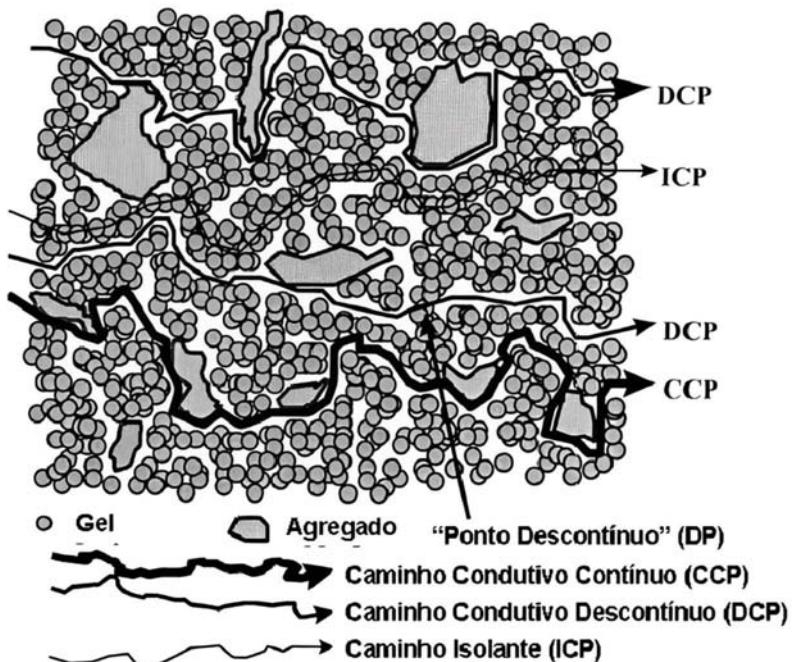


Figura 1 – Representação esquemática da microestrutura do concreto.
Fonte: SONG (2000).

Os vazios e caminhos na estrutura do concreto surgem devido ao uso excessivo de água na mistura, além do necessário para a hidratação do cimento. O excesso de água, ao evaporar, resulta na formação de vazios devido à diminuição dos volumes absolutos e à inevitável incorporação de ar à massa do concreto (RIBEIRO, 2010).

A penetração de substâncias agressivas no concreto é regida pela estrutura dos poros da pasta de cimento, ou seja, sua estrutura porosa, que envolve a

distribuição e tamanho dos poros. O concreto é um material com porosidade aberta, permitindo o transporte através do sistema de poros. A quantidade relativa de poros capilares e o grau de interconexão desempenham um papel crucial no transporte de substâncias através do concreto (RIBEIRO *et al.*, 2011; HASHOLT e JENSEN, 2015).

A rede de poros do concreto cria uma conexão com o exterior, possibilitando a entrada de gás, água e substâncias agressivas dissolvidas. A degradação do concreto e a corrosão das armaduras dependem dessa estrutura porosa, que governa os mecanismos de deterioração (RIBEIRO *et al.*, 2011).

2.3 Utilização de Resíduos Industriais em Matrizes de cimento Portland

Nas indústrias de cimento, esforços contínuos são direcionados à redução dos custos de produção do cimento Portland, diminuição do consumo de matérias-primas, preservação ambiental e melhoria da qualidade do cimento. Uma abordagem consiste em utilizar materiais de baixo custo para substituir parcialmente o clínquer no cimento Portland (DWIVEDI *et al.*, 2006).

Nesse contexto, a utilização de resíduos com propriedades pozolânicas na produção de concreto tornou-se uma prática global. A avaliação da atividade pozolânica desses materiais de substituição do cimento tem ganhado importância crescente devido à demanda por produtos de cimentação mais sustentáveis. Os materiais de baixo custo empregados são frequentemente subprodutos industriais e agrícolas. A combinação de cimento Portland com esses subprodutos é conhecida como "cimentos misturados" ou "cimentos compostos". Por definição, esses cimentos são ligantes hidráulicos nos quais uma parte do cimento Portland é substituída por outros materiais hidráulicos ou não hidráulicos. Apesar das substituições, seu comportamento geral é bastante semelhante ao do cimento Portland, uma vez que endurecem ao entrar em contato com água e formam os mesmos produtos de hidratação. Entre os ingredientes comuns para a mistura com clínquer de cimento Portland estão o componente hidráulico latente (escória de alto-forno) ou um componente pozolânico, como cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica condensada, argila queimada, ou ainda, um componente de enchimento, como material carbonático e outros materiais residuais. Essas práticas são adotadas pelos benefícios econômicos, energéticos e ambientais que proporcionam (DWIVEDI *et al.*,

2006; RAMEZANIANPOUR *et al.*, 2009; FRÍAS *et al.*, 2012; ASHA *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2023).

As pozolanas naturais, por si só, geralmente possuem pouco ou nenhum valor de cimentação. No entanto, quando finamente moídas na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente para formar fases hidratadas com propriedades de cimentação. Atualmente, alguns subprodutos e resíduos industriais estão sendo amplamente pesquisados devido ao alto teor de sílica e/ou alumina, com potencial uso como aditivos em cimentos Portland comerciais. É bem estabelecido que as fases hidratadas formadas durante a reação pozolânica comumente melhoram o desempenho do concreto (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011).

Durante a hidratação do cimento Portland, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é produzido como um dos produtos da hidratação, sendo responsável por diversos processos de deterioração do concreto. No entanto, quando certos materiais pozolânicos contendo sílica amorfa são adicionados durante a hidratação do cimento Portland, eles reagem com a cal, gerando uma quantidade adicional de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), o principal componente de cimentação. Dessa forma, o material pozolânico reduz a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e aumenta a quantidade de C-S-H. Se um material pozolânico de boa qualidade em quantidades adequadas for adicionado durante a hidratação do cimento Portland, a qualidade da cimentação é aprimorada, representando um caminho promissor para a obtenção de um concreto mais durável e de melhor desempenho. A busca por materiais complementares alternativos é uma tendência crescente, impulsionada pela escassez de recursos naturais e pela crise econômica. Há uma busca contínua pela fabricação de cimentos compostos ecoeficientes que possuam propriedades hidráulicas/pozolânicas. Isso se torna particularmente relevante em países em desenvolvimento, onde a falta de energia e matérias-primas de qualidade é uma realidade. Nesse contexto, a cinza obtida da folha de bambu, sendo amorfa por natureza e possuindo propriedades pozolânicas, surge como uma descoberta significativa (DWIVEDI *et al.*, 2006; FRÍAS *et al.*, 2012; MONTEIRO *et al.*, 2017).

2.3.1 Pozolanas

Os materiais pozolânicos são caracterizados como substâncias silicosas ou sílico-aluminosas amorfas, que inicialmente possuem propriedades aglomerantes

limitadas. No entanto, quando esses materiais são finamente divididos e estão em contato com água, reagem com o hidróxido de cálcio, resultando na formação de compostos com propriedades hidráulicas.

O principal produto da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado, podendo também ocorrer a formação de aluminatos de cálcio hidratado. O processo de precipitação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado) ocorre pela dissolução da pozolana em meio alcalino, combinando-se com os íons Ca^{2+} presentes na solução. Esse fenômeno é fundamental para o aumento das propriedades hidráulicas do material e contribui para a melhoria das características do concreto (JOHN *et al.*, 2003).

É amplamente reconhecido que as fases hidratadas formadas durante a reação pozolânica frequentemente melhoram o desempenho do concreto. A avaliação da atividade pozolânica de materiais de substituição do cimento torna-se cada vez mais crucial devido à busca por produtos de cimentação mais sustentáveis.

As pozolanas são classificadas, quanto à origem, em dois grupos: naturais e artificiais. As pozolanas naturais são aquelas encontradas na natureza, incluindo materiais de origem vulcânica e terras diatomáceas, embora essas não sejam exploradas comercialmente no Brasil. Por outro lado, as pozolanas artificiais são aquelas que passaram por algum tratamento térmico, como argilas e determinadas rochas que contêm sílica, ou são provenientes de subprodutos de atividades industriais e agroindustriais. Exemplos dessas últimas incluem a cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e bauxita (NITA, 2006).

No Brasil, os materiais pozolânicos são categorizados em três classes, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015). A Classe N abrange as pozolanas naturais e artificiais, a Classe C refere-se às cinzas volantes produzidas pela queima do carvão mineral em usinas termoelétricas, e a Classe E engloba as outras pozolanas que não se encaixam nas classes anteriores. Os requisitos químicos e físicos para cada classe, conforme estabelecido pela mesma norma, são apresentados na Tabela 1.

A atividade pozolânica refere-se às reações que ocorrem entre os constituintes ativos dos materiais pozolânicos, a água e a cal. Os principais constituintes ativos dos materiais pozolânicos são a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) quando na forma amorfa. De maneira geral, a reação pozolânica ocorre quando as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento, formando produtos resistentes, como 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). A reação pozolânica pode ser resumida pela Equação 1, na qual a pozolana residual atua principalmente como filer (CORDEIRO, 2006; TASHIMA, 2006; CORDEIRO, 2009; MEHTA e MONTEIRO, 2017).

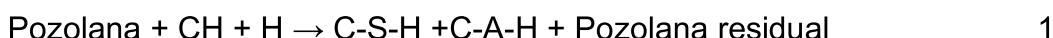


Tabela 1 – Requisito dos materiais pozolânicos.

Requisitos Químicos	Classe do material pozolânico		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$	$\leq 1,5\%$
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	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: NBR 12653 (2014).

De maneira geral, para que as pozolanas, na presença de água, possam reagir com o hidróxido de cálcio e formar materiais resistentes semelhantes aos formados na hidratação do cimento Portland, é necessário que possuam um alto teor de SiO_2 ou $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, sejam finas e predominantemente amorfas.

A incorporação de pozolanas ao concreto pode proporcionar diversos benefícios, destacando-se três aspectos principais. Primeiramente, a reação se torna mais lenta, resultando em uma baixa liberação de calor de hidratação, o que reduz os problemas de fissuração devido à retração. Em segundo lugar, a liberação de hidróxido de cálcio durante a hidratação do cimento Portland, que tem contribuição limitada para a resistência, é consumida pela reação pozolânica, evitando problemas de durabilidade. Por fim, a distribuição do tamanho dos poros nos cimentos pozolânicos hidratados é afetada positivamente. Os produtos da reação pozolânica preenchem eficientemente os espaços capilares da pasta hidratada, aumentando a resistência e reduzindo a permeabilidade do sistema (CORDEIRO, 2009; MEHTA e MONTEIRO, 2017).

Além dos benefícios relacionados às reações químicas pozolânicas, as pozolanas também têm um efeito físico nas misturas com cimento Portland. A densidade da mistura aumenta devido ao efeito microfíller, onde as minúsculas partículas do material pozolânico preenchem vazios, sendo geralmente mais fino que o cimento. Isso resulta no 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, há ainda a densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado (DAL MOLIN, 2011).

2.3.2 Cinza da folha de bambu

O bambu é considerado um recurso natural e material de construção de crescimento rápido e alto rendimento, potencialmente valioso para a humanidade. A produção anual global de bambu é estimada em cerca de 20 milhões de toneladas, com aproximadamente 10 milhões de toneladas provenientes da Índia, China e Japão. No entanto, o uso do bambu resulta na geração de resíduos não utilizados, incluindo fibras e folhas de bambu. Em alguns países, o processamento significativo de bambu leva à produção de grandes volumes de resíduos sólidos, muitas vezes descartados através da queima em aterros a céu aberto, causando impactos ambientais negativos (DWIVEDI *et al.*, 2006; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; ASHA *et al.*, 2014).

O Brasil se destaca como o principal produtor de bambu na América Latina, especialmente na região da Amazônia, onde a área de cultivo abrange cerca de 180.000 km². A produção brasileira de papel consome aproximadamente 500.000 toneladas anuais de bambu cultivado, gerando 190.000 toneladas por ano de resíduos agrícolas. Estima-se que o Brasil produza cerca de 250 milhões de bambus anualmente, gerando um grande volume de folhas e resíduos descartáveis, que apresentam propriedades adequadas para novas aplicações (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; FRÍAS *et al.*, 2012).

Na literatura, a investigação sobre as propriedades pozolânicas dos resíduos de bambu é limitada. Poucos estudos abordaram os resíduos das folhas de bambu como materiais pozolânicos. Dwivedi *et al.* (2006) e Singh *et al.* (2007) examinaram a hidratação da cinza das folhas de bambu em combinação com cimento Portland. Esses estudos concluíram que a cinza das folhas de bambu é um material pozolânico eficaz (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011).

Diante desse contexto, torna-se imperativa a investigação das propriedades pozolânicas da cinza proveniente das folhas do bambu, com o intuito de explorar sua aplicação no concreto armado, visando aprimorar as propriedades desse material. No entanto, a caracterização das pozolanas apresenta uma considerável complexidade devido à avaliação de suas características físico-químicas e mineralógicas, que carece de padronização. Portanto, é crucial realizar estudos de caracterização específicos ao empregar um precursor particular. Diversas metodologias estão disponíveis para avaliar o potencial pozolânico de materiais, e no Brasil, a NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que a avaliação deve ser conduzida por meio de dois métodos indiretos de quantificação do poder reativo: Índice de Atividade Pozolânica com cal hidratada e com cimento Portland. Além disso, os materiais devem atender a requisitos químicos e físicos específicos (SILVA, 2020).

A cinza da folha de bambu (BLA) é considerada um material amorfó e pozolânico, capaz de reagir com o hidróxido de cálcio e formar silicato de cálcio hidratado. A atividade pozolânica dessa cinza aumenta com o passar do tempo e com o aumento da temperatura (DWIVEDI *et al.*, 2006).

Para que os resíduos agrícolas, como as cinzas da folha de bambu, sejam utilizados como adições minerais pozolânicas, é necessário que passem por um processo de ativação. Esse processo de ativação refere-se à calcinação dos materiais para produção das cinzas e tem um impacto direto nas propriedades pozolânicas das cinzas e, consequentemente, no desempenho dos cimentos compostos por elas (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018).

Estudos anteriores realizados por Dwivedi *et al.* (2006), Singh *et al.* (2007), Villar-Cociña *et al.* (2010) e Umoh e Odesola (2015) produziram cinzas a partir da folha de bambu através de calcinação em mufla elétrica a uma temperatura constante de 600°C, com um tempo de retenção de 2 horas. Todos esses estudos obtiveram cinzas com potencial pozolânico, embora a escolha específica do tratamento térmico não tenha sido discutida detalhadamente.

O estudo dos autores Frías *et al.* (2012) enfatiza que a folha de bambu ativada a 600°C com 1,20 h de retenção é uma pozolana adequada para a fabricação de futuros cimentos comerciais. No entanto, o desempenho positivo da BLA como pozolana está vinculado a vários fatores, incluindo a origem específica das folhas de bambu, a composição química, as condições de calcinação e a natureza amorfá da cinza.

A composição química da cinza de folha de bambu revela a predominância de sílica (SiO_2), seguida por CaO , K_2O , Al_2O_3 e SO_3 . Óxidos como Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 e MnO estão presentes em teores abaixo de 1%, e outros óxidos, como Na_2O e ZnO , estão presentes em porcentagens abaixo de 0,1%. Em termos percentuais, a sílica constitui cerca de 80 % da composição química da cinza de bambu, enquanto os demais óxidos estão presentes em concentrações mais baixas (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011).

A Tabela 2 apresenta as composições químicas de cinzas de folha de bambu, determinadas por análises de fluorescência de raios-x, conforme relatado por diversos autores (DWIVEDI *et al.*, 2006; SINGH *et al.*, 2007; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2011; FRÍAS *et al.*, 2012; UMOH e ODESOLA, 2015; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018).

A análise da Tabela 2 revela que, apesar de ser um material natural com variações na composição química devido a fatores como local de origem, idade, características do solo, condições climáticas, entre outros, o bambu, quando transformado em cinza, geralmente apresenta o SiO_2 como o principal óxido em sua composição.

Villar-Cociña *et al.* (2020) compararam a cinza das folhas de bambu (BLA) com sílica ativa (SF). Os resultados mostraram que o principal óxido presente em ambas as cinzas é o SiO_2 , com percentuais de 80,4 % para BLA e 87,4 % para SF. Outros óxidos estavam presentes em quantidades menores. Ambos os materiais continham sílica em quantidades adequadas para qualificá-los como materiais pozolânicos. A análise de difração de raios-X indicou que o padrão da BLA e SF mostrava uma banda larga em torno de $2\theta = 15^\circ$ a 30° , correspondendo à natureza altamente amorfa de ambos os materiais. A caracterização qualitativa da atividade pozolânica usando o método da condutividade elétrica sugeriu que SF tinha uma atividade ligeiramente superior. No entanto, os valores do parâmetro cinético indicaram que a BLA calcinada a 600°C apresentava uma reatividade muito maior ($4,78 \times 10^{-1} \text{ h}^{-1}$) em comparação com SF ($5,11 \times 10^{-1} \text{ h}^{-1}$). Essa reatividade da BLA foi comparável à da SF, considerada uma das melhores pozolanas do mundo. Os resultados sugerem que as cinzas das folhas de bambu calcinadas a 600°C têm propriedades pozolânicas muito boas, comparáveis às da sílica ativa, indicando sua adequação para uso na fabricação de cimentos misturados. A possibilidade de usar esse resíduo agrícola com características pozolânicas no lugar da sílica ativa é vista como um objetivo importante do ponto de vista econômico, tecnológico e ambiental.

Tabela 2 – Característica química da cinza de folha de bambu.

Autores	T (°C)	t (h)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Composição química cinza de folha de bambu (%)	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
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	-	-
Villa-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
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	-
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
Villa-Cociña <i>et al.</i> (2018)	500	2	71,77	0,10	0,92	3,93	3,07	-	0,37	-	1,65	-
Villa-Cociña <i>et al.</i> (2018)	600	2	73,90	0,13	0,11	4,51	3,53	-	0,43	-	2,01	-
Villa-Cociña <i>et al.</i> (2018)	700	2	74,70	0,15	0,21	4,48	3,23	-	0,56	-	1,87	-

Legenda: T- Temperatura de calcinação, t- tempo de calcinação

Fonte: Autor.

O estudo de Ernesto *et al.* (2007) fornece uma análise detalhada sobre a caracterização e o comportamento pozolânico da cinza das folhas de bambu (BLA), obtida pela calcinação das folhas. Os testes de composição química, morfologia e padrão de DRX (difração de raios-X) realizados nas cinzas de folhas de bambu levaram à conclusão de que esse tipo de cinza é predominantemente formado por sílica de natureza totalmente amorfa, exibindo alta atividade pozolânica.

Dwivedi *et al.* (2006) relataram a reação entre o hidróxido de cálcio (CaOH)₂ e a cinza da folha de bambu por quatro horas de reação, usando a técnica de calorimetria exploratória diferencial, enquanto Singh *et al.* (2007) estudaram a hidratação da cinza das folhas de bambu em cimento Portland misturado. As cinzas das folhas de bambu foram obtidas em forno elétrico de laboratório a 600 °C de temperatura de calcinação por 2 horas de retenção. Depois de calcinadas, as cinzas foram moídas e peneiradas abaixo de 90 µm, finura semelhante à do cimento Portland. A cinza apresentou coloração acinzentada. Esses estudos concluíram que a cinza da folha de bambu é um material pozolânico eficaz. Quando realizada substituição parcial

do cimento por 20 % de cinza da folha de bambu, os valores de resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de hidratação foram considerados bastante comparáveis aos do cimento Portland.

Frías *et al.* (2012) analisaram a resistência à compressão de argamassas com 0 %, 10 % e 20 % de substituição parcial do 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 apenas com cimento 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. Aos sete 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.

No estudo conduzido por Dhinakaran e Gangava (2016), a viabilidade da incorporação de BLA como um potencial aditivo mineral para o cimento foi confirmada por meio de análises de sua composição química e natureza amorfa. A substituição ótima de cimento por BLA, identificada nas idades de 7 e 28 dias em concretos de um determinado grau, foi estabelecida em 15 %, acarretando reduções correspondentes na resistência à compressão de 12 % aos 7 dias e 10 % aos 28 dias. Esta diminuição de 10 % na resistência é considerada aceitável. A presença de 15 % de BLA na mistura de concreto resultou não apenas em uma redução na absorção de água por capilaridade, mas também em uma diminuição na porosidade em 1,6 %. Isso indica que a inclusão de BLA contribui para melhorar a durabilidade do concreto ao preencher os vazios na matriz cimentícia. Assim, os concretos contendo 15 % de BLA apresentam melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade, evidenciando-se como uma opção promissora para aplicações práticas na construção civil.

Umoh e Odesola (2015) observaram que a cinza proveniente das folhas de bambu, utilizada no estudo, apresentava um teor combinado de sílica, alumina e óxidos férricos de 78,30 %, atendendo satisfatoriamente aos requisitos de pozolana

adequada para a produção de argamassa e concreto. Adicionalmente, constataram que a BLA, por ser mais leve que o cimento e ocupar um volume maior para a mesma massa de cimento, demanda água adicional na mistura à medida que a quantidade de BLA aumenta, para alcançar uma pasta com consistência padrão. No decorrer do estudo, verificou-se que a resistência à compressão da argamassa de cimento com adição de BLA apresentou aumento conforme aumentava o tempo de cura em todas as composições avaliadas. Destaca-se que a argamassa contendo 10 % de BLA demonstrou desempenho superior em relação à mistura de referência. Esses resultados sugerem que a incorporação de BLA pode ser uma estratégia eficaz para melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, proporcionando um potencial promissor para aplicações práticas na construção civil.

Onikeku *et al.* (2019) realizaram uma análise detalhada do conteúdo químico do BLA, constatando que este é composto por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em uma proporção de 73,38 %. Esse valor supera o requisito mínimo de 50 %, indicando que o BLA possui uma composição adequada para ser utilizado como material pozolânico. Além disso, foram avaliadas a resistência à compressão e a absorção de água por capilaridade. Quanto à resistência à compressão, a inclusão de BLA proporcionou melhorias nessa propriedade com substituição de até 10 %. Contudo, concretos com substituição parcial de cimento por BLA em 15 % e 20 % mostraram uma redução na resistência à compressão de 5,61 % e 11,51 %, respectivamente, aos 90 dias de idade. Notavelmente, o concreto com 10 % de substituição de cimento por BLA apresentou o melhor desempenho, com um ganho de 13,57 % nessa propriedade. Quanto à absorção de água por capilaridade, a utilização de BLA em diferentes percentagens de substituição parcial ao cimento resultou em reduções em todas as misturas. Destaca-se que a substituição de 10 % obteve o melhor desempenho, registrando uma redução significativa de 42,95 % nessa propriedade. Esses resultados indicam que a incorporação de BLA pode não apenas melhorar a resistência à compressão, mas também contribuir para a redução da absorção de água, tornando-o um aditivo promissor para aprimorar as propriedades do concreto.

Moraes *et al.* (2019) conduziram um estudo abordando a utilização da cinza de folha de bambu, obtida por meio de um processo de autocombustão em um forno sem temperatura controlada. A cinza foi submetida a análises químicas e físicas abrangentes, incluindo ensaios de FRX, determinação do teor de sílica amorfa, DRX, granulometria a laser, FESEM, FTIR e TGA. A análise revelou que o BLA apresenta

um teor elevado de sílica, atingindo 74,23 %, sendo 92,33 % desse óxido composto por sílica amorfa. Além disso, foi observada uma perda ao fogo de 11,34 %, atribuída à presença de matéria orgânica. O ensaio de DRX confirmou a natureza amorfa do BLA, evidenciada pelo desvio na linha base entre $2\theta = 5^\circ$ e $2\theta = 35^\circ$, além de indicar a presença de quartzo. O tempo de moagem ótimo da cinza foi determinado como 50 minutos. O estudo também avaliou o impacto da cinza em argamassas nos estados fresco e endurecido, com ensaios de resistência à compressão. Observou-se que todas as argamassas com substituição parcial apresentaram resistência à compressão semelhante à argamassa de controle em todas as idades de cura. Destaca-se que a argamassa contendo 30 % de BLA apresentou um aumento de resistência de 56 % aos 90 dias de cura. Na análise de porosimetria por intrusão de mercúrio, pastas com substituições de 20 % e 30 % de BLA exibiram maior tortuosidade ou menos poros conectados do que a pasta de controle.

Dhinakaran e Chandana (2016) conduziram uma análise da viabilidade da cinza de folha de bambu como um substituto parcial do cimento, investigando seu impacto na resistência à compressão e na absorção de água por capilaridade em concretos. A substituição do cimento por BLA variou de 10 % a 30 %, com um aumento uniforme de 5 %. As folhas de bambu foram calcinadas a 500 °C por quatro horas para induzir atividade pozolânica. A composição química do BLA, obtida por meio de análise de fluorescência de raio X, evidenciou claramente sua adequação como um potencial adição mineral para o cimento, devido à sua composição química e natureza amorfa. Os resultados indicaram que a substituição ótima de BLA por cimento Portland, avaliada aos 7 e 28 dias, foi de 15 %. Essa substituição resultou em uma redução na resistência à compressão de 12 % aos 7 dias e 10 % aos 28 dias. Contudo, os autores consideram essa diminuição de 10 % como bastante aceitável. Além disso, os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade para o concreto com BLA foram inferiores aos do concreto controle. A presença de 15 % de BLA na mistura melhorou a durabilidade do concreto ao preencher os vazios na matriz cimentícia, resultando em uma redução da porosidade de 1,6 %. Esses achados reforçam a conclusão de que a inclusão de 15 % de BLA pode ser uma estratégia eficaz para aprimorar tanto a resistência quanto a durabilidade do concreto.

A pesquisa conduzida por Kolawole e Olusola (2015) teve como objetivo explorar as propriedades de resistência à compressão do concreto de cimento, utilizando cinza de folha de bambu (BLA), a fim de avaliar a viabilidade dessa cinza

como material pozolânico para o concreto. O processo envolveu a secagem ao sol das folhas de bambu coletadas, seguida pela calcinação em um forno a 800 °C, moagem e peneiramento com uma malha de 212 µm. Amostras de concreto foram então produzidas, com substituição parcial do cimento por BLA nos teores de 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % e 25 %. Os resultados obtidos na pesquisa revelaram que, à medida que o conteúdo de BLA aumenta, é necessária uma maior relação água/aglomerante para alcançar a trabalhabilidade necessária. Além disso, quanto maior o percentual de substituição do cimento por BLA, menor é a resistência à compressão do concreto resultante. A porcentagem ótima de substituição foi identificada como 10 %, enquanto o efeito pozolânico do BLA atinge seu máximo nos estágios finais de hidratação, ou seja, aos 28 e 56 dias. Como resultado, o concreto de cimento misturado com 10 % de BLA mostrou-se adequado para aplicações na construção, especialmente quando é necessária uma resistência avançada em idades mais tardias.

Asha *et al.* (2014) conduziram uma investigação experimental sobre a substituição parcial de cimento por cinza de folha de bambu (BLA), observando uma redução na resistência à compressão do concreto à medida que aumenta a porcentagem de cinzas de folhas de bambu. Embora o BLA contenha SiO₂, essencial para a reação pozolânica, a diminuição da resistência à compressão aos 28 dias foi atribuída à hidratação incompleta. O estudo incluiu o ensaio de penetração acelerada de cloreto, conforme descrito pela ASTM C1202 (2017), revelando uma redução na carga passante de cloreto em concretos com BLA. Comparado ao concreto de referência, a carga passante nos concretos com 5 %, 10 % e 15 % de BLA foi 1,9 vezes, 2,7 vezes e 2,2 vezes menor, respectivamente. Em termos de durabilidade, a resistência aos íons cloreto melhorou significativamente com a substituição de 10 % do cimento por cinza de folha de bambu. Consequentemente, o concreto com cinza de folha de bambu pode ser considerado um material viável para uso em projetos de engenharia civil, especialmente quando a alta resistência não é o requisito principal, mas a durabilidade é uma preocupação crucial.

2.4 Conceitos de vida útil de estruturas de concreto armado

O conceito de vida útil de projeto, conforme definido pela NBR 6118 (ABNT, 2023), refere-se ao período durante o qual as características de uma estrutura de

concreto são mantidas, desde que sejam atendidos os requisitos de uso, manutenção, e que sejam realizados os reparos necessários decorrentes de danos accidentais. A duração efetiva da vida útil de uma estrutura de concreto armado é intrinsecamente ligada à sua capacidade de resistir aos principais mecanismos de deterioração ao longo de um período considerado aceitável e previsível, como destacado por Alexander e Beushausen (2019).

Mesmo quando as estruturas são bem projetadas e construídas, apresentando um comportamento geralmente aceitável ao longo de sua vida útil, é importante reconhecer que a deterioração gradual é inevitável. O fenômeno de deterioração precoce e inaceitável em muitas estruturas modernas levanta preocupações sobre o desempenho duradouro e satisfatório das mesmas. Essa observação destaca a necessidade de práticas de projeto, construção e manutenção que visem prolongar a vida útil das estruturas de concreto, garantindo seu desempenho ao longo do tempo e minimizando os efeitos da deterioração (ALEXANDER e BEUSHAUSEN, 2019).

A consequente redução da vida útil das estruturas não apenas acarreta perdas socioeconômicas, mas também resulta em um aumento significativo do impacto ambiental, devido à necessidade crescente de matérias-primas e às emissões adicionais de CO₂ por ano de vida. Adicionalmente, a realização de reparos e manutenções frequentes amplia o consumo de matérias-primas e outros recursos, contribuindo para um aumento total nas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida da estrutura (PILLAI, 2019).

Nesse contexto, as projeções de vida útil desempenham um papel crucial tanto para estruturas existentes quanto para aquelas planejadas. A vida útil de projeto pode ser definida como o intervalo de tempo desde a construção até o momento em que a concentração de cloretos e ou dióxido de carbono atinge a profundidade das armaduras e se torna suficientemente elevada para iniciar o processo de corrosão (LIANG *et al.*, 1999).

Porém, atualmente, as especificações de durabilidade geralmente se baseiam na imposição de várias restrições às proporções de mistura do concreto, como tipo e teor de cimento, relação água/aglomerante, conteúdo de ar aprisionado e espessura da camada de cobrimento das armaduras. Essa abordagem, no entanto, não leva completamente em conta o desempenho real dos materiais de concreto, incluindo diferentes tipos de cimento e componentes minerais adicionados diretamente ao cimento ou ao concreto. Diante do desenvolvimento sustentável da sociedade e da

indústria da construção, juntamente com o reconhecimento da importância das considerações de vida útil no projeto estrutural, há uma tendência crescente em adotar cálculos e projetos de vida útil baseados no desempenho, em vez de abordagens prescritivas. A utilização de modelos de durabilidade mais avançados possibilita o projeto de estruturas mais seguras, com uma vida útil prevista e um consumo reduzido de materiais. Nos últimos anos, vários modelos de projeto de vida útil foram propostos por comitês nacionais, regionais ou internacionais relevantes. Esses modelos abordam principalmente questões de durabilidade relacionadas à corrosão das armaduras induzida por cloretos e à carbonatação. Essa mudança de paradigma destaca a importância de considerar o desempenho real dos materiais e a aplicação de modelos avançados no planejamento de estruturas duráveis e sustentáveis (TANG *et al.*, 2015; PILLAI, 2019).

Na prática, prever a vida útil real de serviço de estruturas de concreto, sejam elas novas ou existentes, é um desafio global, dado que essas estruturas não apenas suportam cargas, mas também estão expostas a diversas condições ambientais. Logo, é mais realista estudar o mecanismo de deterioração de uma estrutura de concreto considerando os efeitos combinados de carregamento mecânico e uma variedade de fatores ambientais. Os principais desafios no desenvolvimento de modelos matemáticos para prever a vida útil residem no fato de que muitos parâmetros, como características do material, ambiente climático e método de construção, podem afetar a vida útil. Atualmente, é difícil especificar com precisão muitos desses parâmetros para serem utilizados em modelos matemáticos (LIANG *et al.*, 1999; TANG *et al.*, 2015).

A previsão da vida útil das estruturas de concreto geralmente envolve a medição dos teores de íons cloreto em profundidades conhecidas do elemento analisado ao longo do tempo. Utilizando a solução proposta por Crank (1975) na segunda lei de Fick, uma das expressões matemáticas mais utilizadas para prever a velocidade de penetração de cloretos, é possível traçar o perfil de penetração de cloretos e determinar o coeficiente de difusão de cloretos (FANTON, 2017). Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa do potencial impacto da corrosão nas armaduras e, consequentemente, uma estimativa mais fundamentada da vida útil das estruturas de concreto.

O modelo de vida útil mais amplamente aceito na comunidade científica é o modelo simplificado proposto por Tuutti (1982), conforme representado na Figura 2.

Segundo esse modelo conceitual, a vida útil de uma estrutura de concreto armado, do ponto de vista da corrosão das armaduras, é dividida em dois períodos: o período de iniciação da corrosão e o período de propagação. O período de iniciação é definido como o intervalo desde a exposição até que os íons cloreto e ou dióxido de carbono tenham penetrado na cobertura de concreto, atingindo um teor elevado o suficiente para iniciar o processo de corrosão nas armaduras. Durante essa fase, os danos apresentados pela estrutura são geralmente imperceptíveis (TAFFESE e SISTONEN, 2017; RIBEIRO e CASCUDO, 2018; PILLAI, 2019).

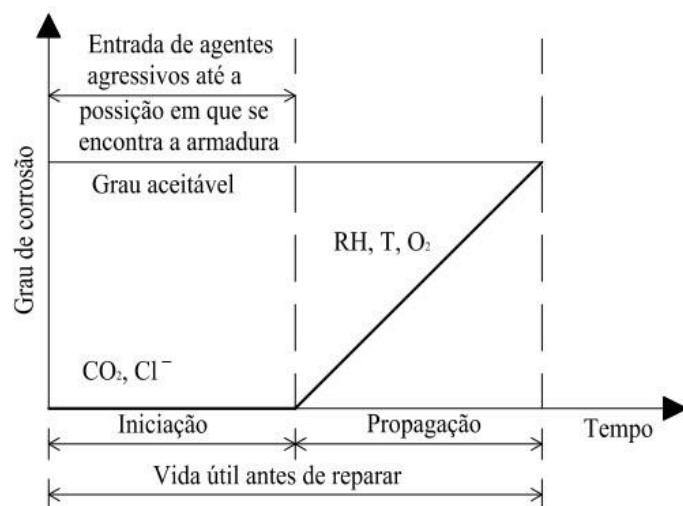


Figura 2 - Representação esquemática do modelo de vida útil proposto por Tuutti.
Fonte: Adaptado de Tuutti (1982).

Durante o período de propagação, a corrosão avança, resultando na formação de óxidos devido à corrosão das armaduras, o que induz dilatação, levando à fissuração no concreto. Isso resulta na redução da seção das armaduras e pode levar à ruptura parcial da estrutura ou exigir reparo/substituição do elemento estrutural. Devido à presença de múltiplas fissuras estruturais, corrosão de armaduras, variações nas condições climáticas ambientais e microclima na interface aço/concreto, as estimativas dos períodos de propagação podem ser enganosas. Portanto, é comum adotar uma estimativa relativamente curta e conservadora para o período de propagação da corrosão (TAFFESE e SISTONEN, 2017; RIBEIRO e CASCUDO, 2018; PILLAI, 2019).

Desta forma, em ambientes marítimos, é comum que a duração do período de iniciação seja um fator crítico que condiciona a vida útil das estruturas, dada a elevada velocidade de corrosão geralmente observada. Vários modelos de vida útil foram

desenvolvidos com base em um limite do conteúdo de cloretos, o qual representa o ponto crítico para o início do fenômeno de corrosão do aço, servindo como um indicador do limite da vida útil de serviço das estruturas. A duração da fase de iniciação é influenciada pela concentração de cloretos na superfície, coeficiente de difusão de cloretos, fator de envelhecimento, espessura de cobrimento das armaduras e o teor limite de cloretos. Assim, a análise da vida útil das estruturas possibilita a adoção de projetos baseados em critérios de durabilidade, permitindo a elaboração de planos de manutenção e reparo com uma base mais sólida. Isso contribui para uma gestão mais eficaz dos ativos de infraestrutura, garantindo a sustentabilidade e durabilidade das estruturas ao longo do tempo (COSTA E APPLETON, 2007; OSSORIO e LORENZO, 2014; TAFFESE e SISTONEN, 2017; RIBEIRO e CASCUDO, 2018; PILLAI, 2019).

A partir dos modelos de Tuutti (1982) e Van der Toorn (1992), Helene (1993) propôs uma conceituação da vida útil que melhor representa o comportamento de estruturas de concreto armado ao longo do tempo, considerando as condições típicas de serviço e as manifestações patológicas mais frequentes, como ilustrado na Figura 3.

Nesta configuração de vida útil, que expressa a curva global de desempenho de uma estrutura, os tipos de vida útil são apresentados para uma situação mais genérica, visando representar, de forma abrangente, os principais estágios de degradação nas estruturas de concreto ao longo de seu período de serviço. Assim, de acordo com a Figura 3, a vida útil global de uma estrutura pode ser subdividida nas seguintes partes, conforme estabelecido por Helene (1997):

a) Vida útil de projeto: Nesta etapa, também conhecida como período de iniciação, os agentes agressivos, tais como cloretos, CO₂ e sulfatos, ainda estão penetrando através da rede de poros do cobrimento, sem causar danos efetivos à estrutura.

b) Vida útil de serviço ou de utilização: Os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar, como fissuras do concreto por ataque químico ou manchas consequentes da corrosão das armaduras. Essa vida útil é difícil de determinar, pois varia em função de cada caso

c) Vida útil total: corresponde ao período de tempo que vai até à ruptura e ao colapso parcial ou total da estrutura. Nesse momento, a estrutura está condenada ou os custos de reparos são demasiadamente elevados.

d) Vida útil residual: envolve parte das vidas úteis de serviço e total, após a vida útil de projeto, correspondendo ao período de tempo no qual a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções, contado após uma inspeção e ou interdição.

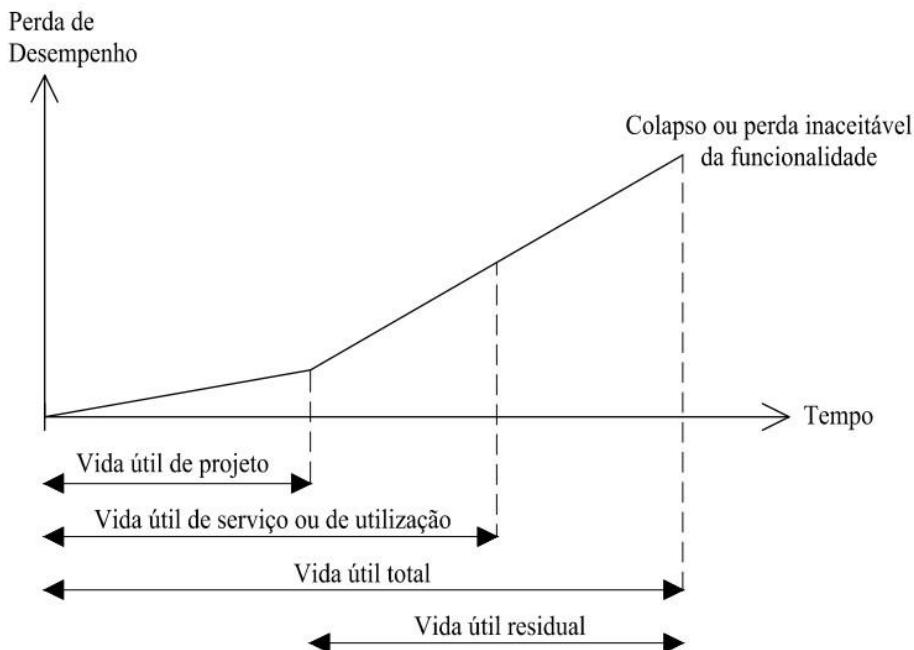


Figura 3 - Conceituação de vida útil das estruturas de concreto tomando-se por referência o fenômeno da corrosão das armaduras.

Fonte: Adaptado de Helene (1993).

2.5 Indicadores de durabilidade

A durabilidade do concreto armado pode ser definida como a sua capacidade de resistir à ação do intemperismo, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, mantendo sua forma, qualidade e facilidade de manutenção originais quando exposto ao ambiente de serviço pretendido ao longo de sua vida útil. Problemas de durabilidade geralmente começam a surgir à medida que os materiais se deterioram precocemente. Embora a deterioração dos materiais em si não represente um problema de segurança imediato, ela progressivamente leva a danos estruturais, representando um potencial perigo para as estruturas (Tang *et al.*, 2015; ALEXANDER E BEUSHAUSEN, 2019).

A durabilidade do concreto é influenciada por diversos fatores, incluindo suas propriedades físicas e químicas, o ambiente de serviço e a vida útil projetada. Todos os processos de degradação que afetam o concreto, exceto danos mecânicos,

envolvem o transporte de íons e/ou fluidos através de sua microestrutura porosa. Portanto, a durabilidade do concreto está intrinsecamente relacionada à sua capacidade de resistir à penetração de água e outras substâncias agressivas, como cloreto, dióxido de carbono, oxigênio e sulfatos. A degradação de uma estrutura de concreto, na maioria dos casos, resulta da combinação de múltiplos fatores ambientais e carregamentos. A durabilidade, portanto, refere-se ao desempenho do material ou à sua deterioração ao longo da vida útil da estrutura em um ambiente específico, não sendo uma propriedade intrínseca do material. Um concreto que apresenta desempenho satisfatório em um ambiente moderado pode se deteriorar prematuramente em outro ambiente considerado mais severo, principalmente devido às diferenças nos mecanismos de falha associados às diversas condições de exposição (HO, 2003; TANG *et al.*, 2015; WU, *et al.*, 2017; ALEXANDER e BEUSHAUSEN, 2019).

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado têm sido um dos principais desafios enfrentados pela indústria da construção nas últimas décadas. A corrosão das armaduras é a maior ameaça à durabilidade do concreto armado, causando fissuras, manchas e lascamento na cobertura de concreto, principalmente devido à penetração de íons cloreto provenientes do ambiente marinho. Esses danos comprometem a segurança, estabilidade e estética da estrutura, representando também um risco econômico para proprietários e gestores. Além disso, a manutenção dessas estruturas exige a utilização contínua de recursos naturais valiosos, tornando-as insustentáveis. Especialmente no caso da infraestrutura pública, que demanda investimento público significativo, é crucial direcionar uma atenção cada vez maior para a gestão adequada dessas estruturas e o desenvolvimento de soluções de engenharia que inspirem confiança na futura provisão de infraestrutura (ZHUO *et al.*, 2010; TAFFESE E SISTONEN, 2017; ALEXANDER E BEUSHAUSEN, 2019).

A falta de durabilidade tornou-se uma grande preocupação na construção nos últimos 20 a 30 anos, com custos significativos associados à manutenção e reparo de estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão. Na Europa Ocidental, os gastos anuais com reparos induzidos pela corrosão chegam a 5 bilhões de euros. Em alguns países desenvolvidos, não é incomum alocar uma parte substancial dos recursos, como 30 a 50 % do orçamento total de infraestrutura, para a reparação e manutenção de estruturas existentes. Surpreendentemente, para danos e controle relacionados à corrosão, alguns países desenvolvidos gastam quase 3,5 % do seu

produto nacional bruto. A corrosão contínua das armaduras é a forma mais prevalente de deterioração em estruturas de concreto armado reparadas, respondendo por 37 % dos modos de falha. Isso resulta em reparos caros e demorados. Como resultado, muitos desenvolvedores governamentais e privados estão considerando os custos do ciclo de vida em vez do custo inicial de construção. Neste contexto, a previsão de durabilidade e vida útil no projeto de estruturas de concreto armado tem ganhado importância crescente nos últimos anos (MACKECHNIE e ALEXANDER, 2001; HO, 2003; TAFFESE e SISTONEN, 2017; BEUSHAUSEN *et al.*, 2019).

As abordagens tradicionais de projeto de durabilidade são baseadas em valores limites prescritos para parâmetros de mistura selecionados, como a razão água/aglomerante, teor de cimento e resistência à compressão. Em contraste, as abordagens de desempenho se baseiam na medição das propriedades dos materiais que podem estar vinculadas aos mecanismos de deterioração sob as condições de exposição predominantes. A medição das propriedades reais do concreto utilizado na estrutura construída permite levar em consideração as influências combinadas da composição do material, procedimentos de construção e influências ambientais. Dessa forma, proporciona uma base racional para a previsão de durabilidade e projeto de vida útil. As abordagens de desempenho podem ser aplicadas em diferentes estágios e para diversos propósitos, incluindo projeto, especificação, pré-qualificação e avaliação da conformidade da estrutura conforme construída. A maioria dos métodos de ensaio para avaliação da resistência da estrutura à corrosão das armaduras baseia-se na espessura e qualidade do concreto de cobrimento (BEUSHAUSEN *et al.*, 2019).

Neste sentido, o conceito de indicadores ou índices para controle da durabilidade visa descrever e controlar uma série de problemas de deterioração, abrangendo parâmetros físicos, químicos e eletroquímicos. Geralmente, esses indicadores são descritos com base em propriedades de transporte ou mecanismos de deterioração, proporcionando uma caracterização do concreto em termos de sua durabilidade potencial (ALEXANDER, 2018).

Um motivador significativo para a adoção de abordagens baseadas no desempenho é o contínuo desenvolvimento e uso de novos e inovadores tipos de concreto e materiais constituintes. As exigências prescritivas muitas vezes não refletem as características de durabilidade dos concretos modernos, dificultando a inovação, bem como o projeto e a construção econômicos e ecológicos. Além disso,

diante da deterioração muitas vezes prematura da infraestrutura de concreto construída nas últimas décadas, os proprietários de estruturas estão cada vez mais hesitantes em aceitar soluções de construção sem garantias, buscando evidências técnicas de que suas estruturas podem atender aos requisitos de vida útil. Nesse sentido, uma das vantagens das especificações de projeto baseadas no desempenho é que a qualidade da estrutura, conforme construída, pode ser avaliada, permitindo ações corretivas em caso de não conformidade, ou seja, se a estrutura, conforme construída, não atender aos valores limites especificados para características de durabilidade (BEUSHAUSEN *et al.*, 2019).

2.6 Técnicas de avaliação e da durabilidade do concreto

A avaliação da taxa de entrada de cloretos tornou-se uma propriedade crucial para avaliar o desempenho de longo prazo de estruturas de concreto armado, devido à corrosão induzida por cloretos ser um dos principais problemas nesses tipos de estruturas. Desde a década de 1970, várias organizações e profissionais têm trabalhado no desenvolvimento e implementação de testes rápidos, baratos e confiáveis para medir a capacidade do concreto de resistir à penetração de íons cloreto.

A realização de ensaios de durabilidade no concreto é uma ferramenta importante na estimativa da durabilidade de estruturas de concreto armado. Em ambientes marinhos e costeiros, os ensaios de durabilidade são frequentemente baseados na difusão de cloretos em concreto armado, pois o mecanismo de difusão é dominante em relação à penetração de cloretos nas estruturas. Diferentes métodos de ensaio são utilizados em várias partes do mundo para estimar os coeficientes de difusão de cloreto. Esses métodos são fundamentais para compreender e avaliar o transporte de íons agressivos no concreto, influenciando significativamente sua durabilidade (ALEXANDER, 2018).

Neste sentido, os testes de migração são amplamente utilizados como métodos acelerados para avaliar a difusividade do cloreto no concreto. Tanto o teste de migração em estado estacionário quanto o teste de migração em estado não estacionário, além de testes de condutividade elétrica, são empregados para avaliar a difusividade do cloreto no concreto (TONG e GJØRV, 2001).

O teste de migração rápida de cloretos, desenvolvido por Tang e padronizado como método NT Build 492 (1999), é um desses métodos acelerados. Nesse teste, os cloretos penetram no concreto em altas taxas devido ao campo elétrico aplicado. Uma amostra é colocada por até 96 horas em um gradiente de concentração de cloreto sob um potencial elétrico, e uma técnica colorimétrica (spray de nitrato de prata) é usada para determinar a profundidade de penetração de cloretos após a remoção das soluções. O coeficiente de difusão de cloretos é a saída do teste. Este método é considerado por alguns pesquisadores como o mais adequado entre os testes de cloretos acelerados, devido à sua simplicidade, curta duração e base teórica clara (ISMAIL *et al.*, 2013; ELFMARKOVA *et al.*, 2015).

O teste de migração rápida de cloretos (NT Build 492, 1999) é amplamente utilizado para avaliar a difusividade de íons cloreto no concreto. O coeficiente de migração em estado não estacionário (D_{hssm}) obtido a partir desse ensaio é utilizado na previsão da vida útil de estruturas de concreto armado (LIU e PRESUEL-MORENO, 2013).

O teste Multirregime, desenvolvido por Andrade (1993) e posteriormente padronizado na Espanha, é baseado na migração de íons de um eletrólito para um polo oposto, devido à aplicação de uma voltagem de 12 V. Na realização do teste, a amostra de concreto é colocada entre uma solução contendo íons cloreto e água destilada. A diferença de potencial aplicada atrai os íons do eletrólito negativo para o positivo (anólito), migrando e atravessando o corpo de prova de concreto. O aumento da concentração de cloreto no anólito é medido pela condutividade elétrica. No início do teste, a concentração de cloretos é insignificante (determinada como *time lag*) e usada para estabelecer o coeficiente de difusão de cloreto em estado não estacionário (D_{ns}). Posteriormente, o fluxo de íons cloreto torna-se constante, correspondendo ao coeficiente de difusão de cloreto em estado estacionário (D_s). O teste é concluído quando ambos os coeficientes são determinados (GUIGINE *et al.*, 2020).

3 Programa experimental

O programa experimental deste trabalho foi dividido em três etapas, conforme representado na Figura 4. A primeira etapa concentrou-se principalmente na produção da cinza de folha de bambu. Inicialmente, procedeu-se a coleta das folhas de bambu, seguida pela submissão dessas folhas ao processo de calcinação. Posteriormente, a cinza resultante da calcinação foi submetida a um processo de moagem em moinho de bolas, visando refinar as partículas do material.

Na segunda etapa, realizou-se a caracterização da cinza de folha de bambu produzida na fase anterior do estudo. Nessa etapa, foram determinadas as propriedades da cinza por meio de análises de granulometria a laser, análise térmica, fluorescência de raio X, difratometria de raios-X, índice de atividade pozolânica com cal, índice de desempenho com cimento Portland e reatividade da cinza através do ensaio de Chapelle Modificado. Ao término desta etapa, foi definida a forma de produção ideal da cinza, especificando a temperatura e o tempo de moagem que apresentaram melhor desempenho nas análises realizadas. A cinza que apresentou o melhor desempenho foi adotada para utilização na terceira etapa do trabalho.

A terceira e última etapa da pesquisa envolveu a incorporação da cinza de folha de bambu na preparação de corpos de prova de concreto. Nessa fase, realizou-se a dosagem dos concretos, seguida pela moldagem e cura dos corpos de prova até a data dos ensaios. Posteriormente, foram conduzidos ensaios para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e indicadores de durabilidade dos concretos produzidos.

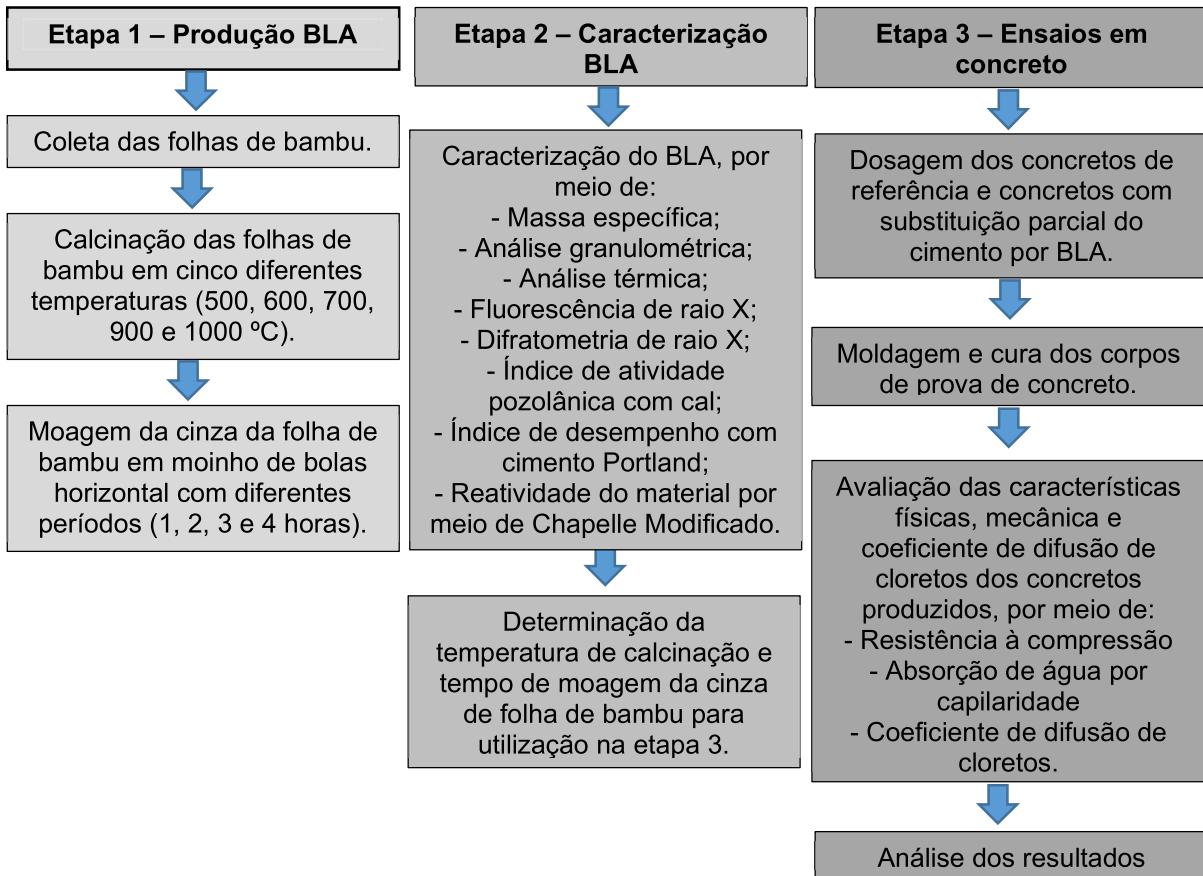


Figura 4- Fluxograma do programa experimental.
Fonte: Autor.

3.1 Produção da cinza de folha de bambu

Esta seção tem como objetivo demonstrar o processo de preparação da cinza de folha de bambu, desde a coleta das folhas de bambu até a obtenção da cinza a ser utilizada nos concretos como substituição parcial ao cimento Portland.

3.1.1 Coleta do material

As folhas utilizadas para a realização da pesquisa pertencem à espécie *Bambusa Tuldoides*. Esta espécie é originária da Ásia e tem excelente adaptação às condições climáticas da região subtropical do Brasil, sendo uma variedade amplamente cultivada no Rio Grande do Sul. A coleta das folhas foi realizada de forma manual no interior do município de Canguçu – RS (31°24'06,6"S, 52°39'11,9"W), no local ilustrado na Figura 5.

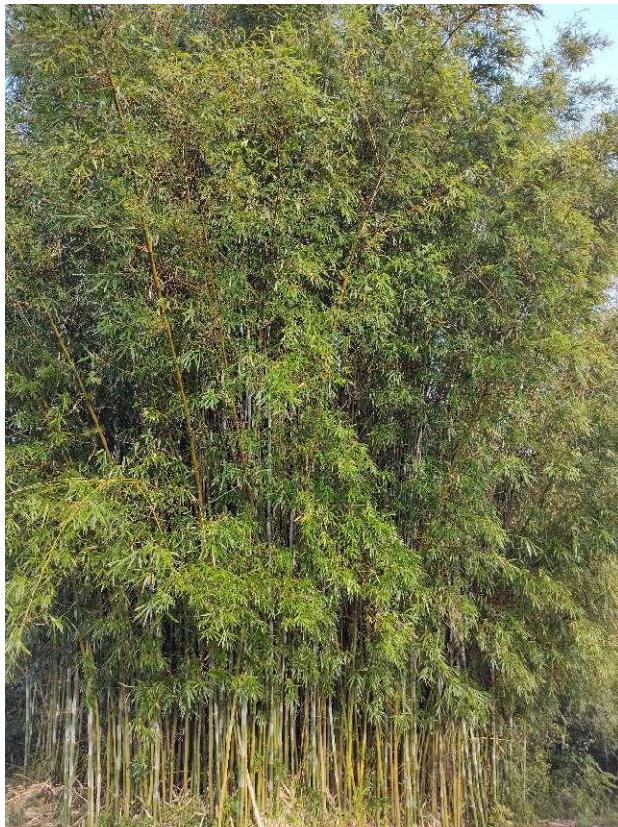


Figura 5 - Local de coleta das folhas de bambu da espécie *Bambusa Tuldaoides*.
Fonte: Autor.

Após a coleta das folhas, estas foram armazenadas em caixas e expostas ao sol para secagem. Essa etapa de secagem foi fundamental para prevenir danos às folhas e permitir o armazenamento subsequente em sacos, aguardando o momento da realização da calcinação.

3.1.2 Calcinação da folha de bambu

O processo de calcinação das folhas de bambu foi conduzido em um forno mufla Linn Elektro Therm, com taxa de aquecimento de 2,5°C/min, no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do Rio Grande, conforme ilustrado na Figura 6. Foram empregadas temperaturas de 500, 600, 700, 900 e 1000 °C. O tempo de permanência foi fixado em 2 horas, contado a partir do momento em que a estufa atingiu a temperatura de calcinação designada. A escolha dessas temperaturas de calcinação foi baseada nos estudos realizados por Dwivedi *et al.* (2006), Singh *et al.* (2007), Villa-Cociña *et al.* (2011), Frías *et al.* (2012) e Villa-Cociña *et al.* (2018),

visando avaliar a influência da temperatura no desenvolvimento das propriedades do BLA, conforme analisado na etapa 2 da pesquisa.



Figura 6 – Forno mufla utilizado para calcinação das folhas de bambu.

Fonte: Autor.

Inicialmente, foi produzida uma quantidade de aproximadamente 1 kg de BLA em cada temperatura de calcinação para a execução da etapa 2 da pesquisa. Após a caracterização do material nessa etapa, foram analisados os resultados e definida a temperatura que proporcionou as melhores propriedades. Esse material foi selecionado para a etapa 3. Posteriormente à conclusão da etapa 2, realizou-se a calcinação do BLA na temperatura que apresentou melhor desempenho, visando sua utilização na fase final da pesquisa. Nesta etapa final, somente a BLA produzida com a temperatura que demonstrou melhor desempenho foi empregada como substituto parcial do cimento no concreto.

O rendimento de BLA em relação às folhas secas foi determinado através da pesagem do material antes e após o processo de calcinação. Verificou-se que as folhas de bambu secas apresentam um rendimento médio de 19,60 %.

3.1.3 Moagem da cinza de folha de bambu

Após o processo de calcinação, a BLA passou por moagem em um moinho de bolas horizontal no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal do

Rio Grande, conforme representado na Figura 7. A moagem teve como objetivo reduzir o diâmetro da BLA e aumentar sua área superficial. Durante o processo, foi utilizada uma proporção de 5 kg de bolas para 1 kg de BLA. Sendo conduzida em intervalos de 1, 2, 3 e 4 horas, com o intuito de avaliar a influência do tempo de moagem no diâmetro da BLA. A escolha da proporção de peso das bolas e o tempo de moagem baseou-se em um estudo conduzido por Moraes (2019).



Figura 7 – Realização do processo de moagem da BLA.
Fonte: Autor.

3.2 Caracterização da cinza de folha de bambu

Esta seção oferece uma descrição detalhada das análises realizadas para caracterizar a cinza proveniente da folha de bambu. O objetivo principal é obter informações essenciais que contribuirão para a determinação da forma mais adequada de produção desse material.

3.2.1 Determinação da massa específica

A análise para determinar a massa específica das cinzas, resultantes da calcinação em diversas temperaturas, foi conduzida no Laboratório de Estruturas e

Materiais de Construção Civil (LEMCC) do IFRS, aderindo às diretrizes estabelecidas pela NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.2 Análise granulométrica

Para determinar o tempo de moagem ideal, a cinza de folha de bambu foi submetida a um processo de moagem por 4 horas. Sendo coletada uma amostra para cada temperatura de calcinação nos intervalos de 1, 2, 3 e 4 horas para permitir a análise da distribuição granulométrica e do diâmetro médio por meio da granulometria a laser.

O ensaio de granulometria a laser foi conduzido no Laboratório de Engenharia Química da UNIPAMPA, utilizando um analisador de partículas por difração a laser (Particle Size Analyser) CILAS 1190L. Este ensaio foi realizado em soluções líquidas, abrangendo uma faixa granulométrica que varia de 0,04 μm a 2500,00 μm em 100 classes. Os resultados são apresentados em curvas de porcentagem acumulada de partículas (%) em relação ao diâmetro das partículas em micrômetros (μm) e em tabelas que indicam os diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} .

3.2.3 Análise química por fluorescência de raio X

A análise de fluorescência de raio X foi conduzida no Laboratório de Geoquímica da UFRGS, utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios-X WDS equipado com um tubo de raio-X de Rh, modelo RIX 2000 da marca Rigaku. Essa análise permitiu a identificação dos elementos químicos presentes na amostra, bem como a determinação da proporção em que cada elemento estava presente. Esse processo possibilitou a avaliação da pozolanicidade da BLA em relação aos critérios estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

3.2.4 Difração de raios-X

A avaliação da microestrutura do material foi conduzida por meio da técnica de difração de raios-X. Essa análise proporciona a determinação do nível de cristalinidade da amostra, permitindo a identificação das fases do material quanto ao seu arranjo atômico, classificando-as como amorfas ou cristalinas. As análises foram

executadas no Laboratório de Raios-X (LRX) da UNIPAMPA, utilizando a geometria de Bragg-Brentano do Difratômetro Rigaku ULTIMA IV, configurado com radiação CuK α ($\lambda = 0,154$ nm), tensão de 40 kV, corrente de 20 mA, velocidade de 0,05°/s e faixa de varredura de 5 a 70 (2θ). As fases foram identificadas utilizando o software X-pert HighScore Plus, versão 2.2d de 2008, em conjunto com os padrões difratométricos da base de dados Inorganic Crystal Structure Database – ICSD.

O nível de cristalinidade da amostra foi determinado seguindo o método proposto por Rambo e Ferreira (2015). Esse método emprega a separação simples de áreas, que consiste na subtração da área do halo referente à contribuição não cristalina da área total do difratograma em um intervalo de difração específico. A estimativa de cristalinidade é obtida pela integração dos picos cristalinos e da banda amorfia. Após a separação das áreas, o percentual de cristalinidade é calculado por meio da Equação 2. A Figura 8 ilustra o processo de separação de áreas (STERN, 1968, *apud* CAROLINO, 2017).

$$cr(\%) = \frac{Ac}{Ac + Aa} \times 100 \quad 2$$

Onde:

cr é o percentual de cristalinidade, expresso em porcentagem (%);

Ac e Aa são as áreas cristalina e não cristalinas, respectivamente.

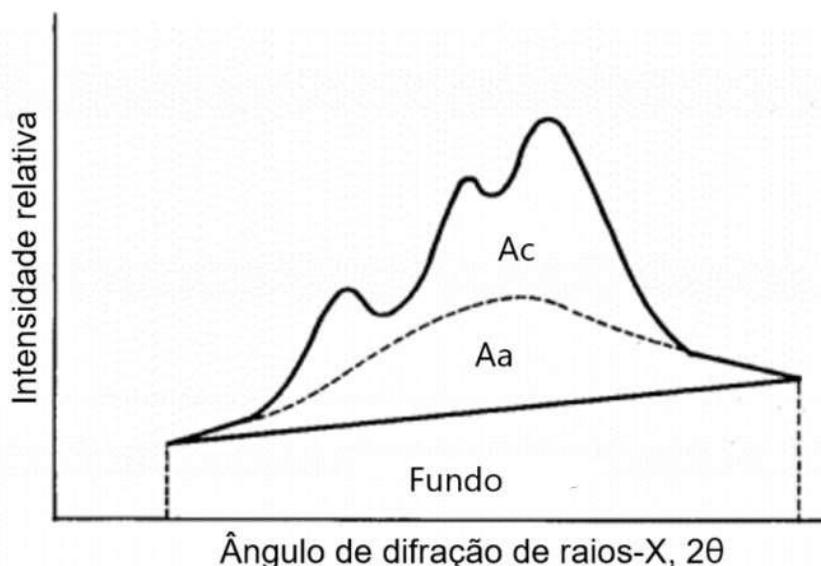


Figura 8 – Representação da separação de áreas.

Fonte: Stern (1968), *apud* Carolino (2017).

3.2.5 Análise termogravimétrica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG)

A variação de massa das amostras de BLA calcinadas em diferentes temperaturas foi determinada por meio da análise termogravimétrica (TG) no Centro Integrado de Análises (CIA) da Universidade Federal do Rio Grande, utilizando o analisador térmico TGA-50 da marca Shimadzu. O ensaio foi conduzido com uma faixa de temperatura de 25 a 1000°C e uma taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera inerte de nitrogênio. A análise de TG é uma técnica em que a massa de uma amostra é medida em função da temperatura, enquanto a amostra é submetida a um programa controlado de aquecimento. A partir da curva de variação de massa das amostras de BLA, foi realizada a derivada da curva termogravimétrica (DTG) por meio de um arranjo matemático, com o objetivo de identificar os picos de variação de massa durante a análise de temperatura.

3.2.6 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi conduzida no Centro Integrado de Análises (CIA) da Universidade Federal do Rio Grande, utilizando o Calorímetro de Varredura Diferencial DSC-60 da marca Shimadzu. O ensaio abrangeu uma faixa de temperatura de 25 a 600°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em uma atmosfera inerte de nitrogênio, mantendo um cociente de vazão de 50 ml/min. A DSC é uma técnica térmica na qual as diferenças no fluxo de calor entre a substância e a referência são medidas em função da temperatura da amostra, ambas submetidas a um programa controlado de temperatura.

3.2.7 Índice de atividade pozolânica com cal

A determinação do índice de atividade pozolânica com cal seguiu as diretrizes estabelecidas pela NBR 5751 (ABNT, 2015). A composição da argamassa incluiu uma parte de hidróxido de cálcio (104 g), nove partes em massa de areia normal (234 g) e uma quantidade correspondente de BLA, equivalente ao dobro do volume de hidróxido de cálcio, além da quantidade de água necessária para atingir a consistência da argamassa em 225 ± 5 mm, conforme especificado na NBR 7215 (ABNT, 2019), por meio do ensaio da mesa de espalhamento.

O processo de mistura e moldagem dos corpos de prova seguiu as diretrizes da NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram moldados três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura para cada temperatura de calcinação. Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura nos próprios moldes, vedados, durante 24 ± 2 h a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Posteriormente, foram mantidos em condições de cura a $55 \pm 2^\circ\text{C}$ por 144 ± 2 h, sendo recuperados para a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ até $4 \pm 0,5$ h antes do ensaio de ruptura à compressão.

3.2.8 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

Este ensaio foi conduzido de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014), que estabelece o método de ensaio para determinação da atividade pozolânica por meio do índice de atividade com o cimento. Durante a realização do ensaio, uma argamassa de referência foi preparada com cimento CP II-F-32 (Argamassa A), conforme as especificações normativas. Adicionalmente, foram preparadas outras argamassas com substituição de 25% do cimento por BLA (Argamassa B), considerando as cinzas calcinadas em diferentes temperaturas. Os traços das argamassas utilizadas seguiram as orientações da NBR 5752 (ABNT, 2014) e estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição dos traços para realização ensaio de atividade pozolânica.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	$624 \pm 0,4$	$468 \pm 0,4$
Cinza de folha de bambu (BLA)	-	$156 \pm 0,2$
Areia normal	1872,0	1872,0
Água	$300 \pm 0,2$	$300 \pm 0,2$

Fonte: Autor.

Para a realização do ensaio, foram moldados seis corpos de prova de argamassa cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, para cada temperatura de calcinação avaliada. O processo de mistura, moldagem e cura das argamassas foi conduzido em conformidade com as orientações estabelecidas pela NBR 7215 (ABNT, 2019). A ruptura das amostras ocorreu aos 28 dias de idade, seguindo as diretrizes da mesma norma.

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi calculado conforme a Equação 3.

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

$I_{cimento}$ é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com substituição de 25% do cimento Portland por BLA, expresso em megapascals (MPa);

f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento Portland, expresso em megapascals (MPa);

3.2.9 Chapelle modificado

O ensaio Chapelle modificado, conhecido como método direto de quantificação do potencial reativo de materiais pozolânicos, visa determinar a capacidade da adição pozolânica em fixar cal para a formação de compostos hidratados.

A avaliação da capacidade da adição mineral em fixar cal, através da ação pozolânica para a formação de compostos hidratados em um ensaio acelerado, é conduzida conforme o método prescrito na NBR 15895 (ABNT, 2018). O ensaio consiste em manter uma mistura de 1,0 grama de adição mineral e 2,0 gramas de óxido de cálcio (CaO) em 250 ml de água sob agitação, por um período de 16 ± 2 horas, a uma temperatura de $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$, utilizando um recipiente Erlenmeyer polimérico. O resultado, obtido por titulação, é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de adição mineral (HOPPE FILHO *et al.*, 2017a).

O ensaio foi conduzido no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS.

3.3 Dosagem dos concretos

A dosagem do concreto empregado na pesquisa utilizou o método do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993). A escolha desse método deve-se à sua

ampla difusão no Brasil, bem como à facilidade de adaptação aos materiais disponíveis em diversas regiões, além de possibilitar ajustes para a incorporação de adições no traço.

Através do procedimento experimental, foi estabelecido o teor de argamassa seca ideal em 52% ($\alpha = 0,52$) e a quantidade de água necessária para atingir um abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm, conforme estipulado pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

A partir do ajuste da dosagem do traço de referência, foi possível definir um traço unitário de 1:1,6:2,4 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo), com uma relação água/cimento de 0,45 e um consumo de cimento de 440 kg/m^3 .

No estudo, realizou-se a dosagem de um traço de concreto denominado "traço de referência". A partir desse traço, procedeu-se à substituição do cimento por BLA em porcentagens de 5, 10 e 15 %, conforme especificado na Tabela 4. Nessa tabela, são apresentados os traços por metro cúbico utilizados para a produção dos corpos de prova empregados nos ensaios realizados. A escolha de usar BLA em níveis de até 15% foi feita porque esses são os níveis típicos usados ao substituir cimento Portland por adições pozolânicas, já que essa proporção tende a proporcionar as melhorias mais significativas nas propriedades do concreto (OLONADE, *et al.*, 2017)

Tabela 4 – Consumo de materiais para traços de concreto (Kg/m³).

Traço	Cimento (kg)	BLA (kg)	Areia Fina (kg)	Areia média (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo Superplasticante (%)
Referência	440,00	0,00	141,00	536,00	1056,00	0,15
BLA 5	418,00	22,00	141,00	536,00	1056,00	0,21
BLA 10	396,00	44,00	141,00	536,00	1056,00	0,45
BLA 15	374,00	66,00	141,00	536,00	1056,00	0,59

Fonte: Autor.

A porcentagem de aditivo superplasticante apresentada na Tabela 4 refere-se à quantidade necessária para alcançar um abatimento do tronco de cone de 100 ± 20 mm.

3.4 Materiais

Nesta seção, serão descritos os materiais empregados na produção dos corpos de prova de concreto utilizados na pesquisa.

3.4.1 Cimento

Foi empregado cimento Portland do tipo CPV-ARI, escolhido por apresentar o maior teor de clínquer em sua composição dentre os disponíveis no mercado regional. Este tipo de cimento é considerado mais "puro" em termos de adições minerais, o que facilita a compreensão e análise do desempenho da BLA.

3.4.2 Agregado miúdo

Foram empregadas duas granulometrias de areia natural quartzosa, sendo areia fina e média, provenientes da cidade de Pelotas/RS e classificadas na zona utilizável de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022). Todo o material foi submetido à secagem em estufa elétrica até atingir a constância de massa. Antes de serem utilizadas, as areias passaram por um processo de peneiramento para a remoção de torrões de argila, pedras ou quaisquer outros materiais que pudessem estar entre os grãos de areia.

Os resultados da caracterização física das areias fina e média estão apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente, enquanto as curvas granulométricas podem ser observadas nas Figuras 9 e 10. Nessas figuras, é possível verificar que ambos os tipos de agregados miúdos estão dentro da zona considerada adequada para utilização.

Tabela 5 – Caracterização física da areia fina.

Peneiras(mm)	Ensaio 1		Ensaio 2		Método de ensaio
	% Retido	% Retido acumulado	% Retido	% Retido acumulado	
4,8	0,1	0,1	0,1	0,1	NBR 17054 (ABNT, 2022)
2,4	0,5	0,6	0,6	0,7	
1,2	2,0	2,6	1,9	2,6	
0,6	12,7	15,3	12,7	15,1	
0,3	40,7	56	40,7	55,8	
0,15	33,2	89,2	33,3	89,1	
< 0,15	10,8	100	10,9	100	
Total	100	-	100	-	
Módulo de finura	1,64				NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão máxima característica (mm)	2,40				NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa específica (g/cm ³)	2,67				NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,39				NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Autor.

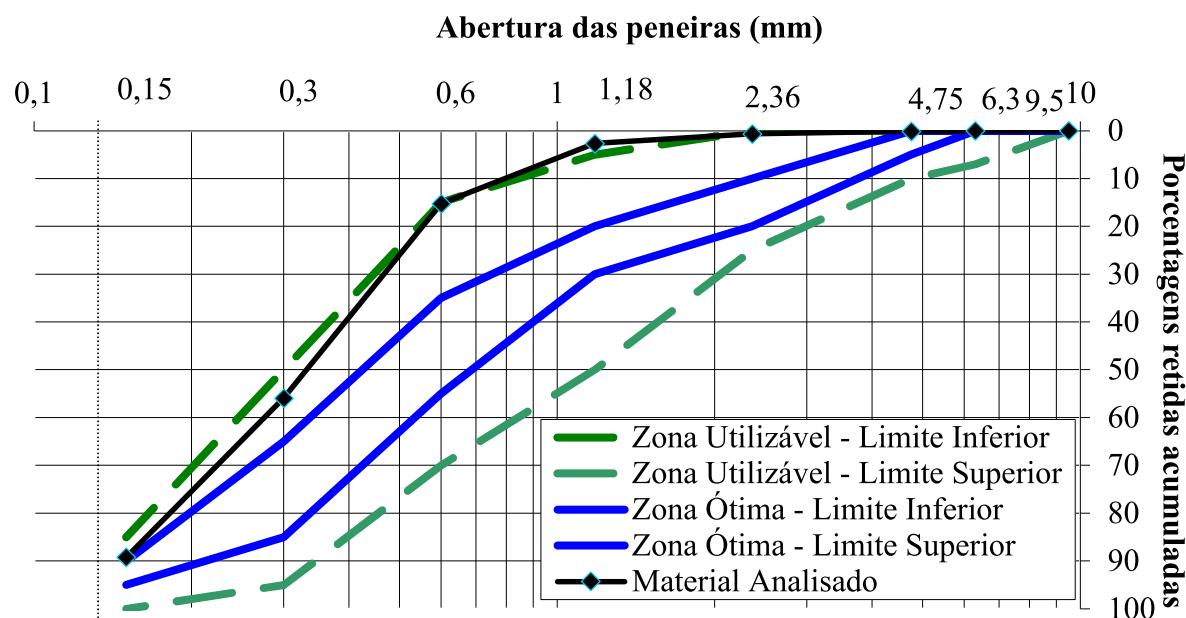
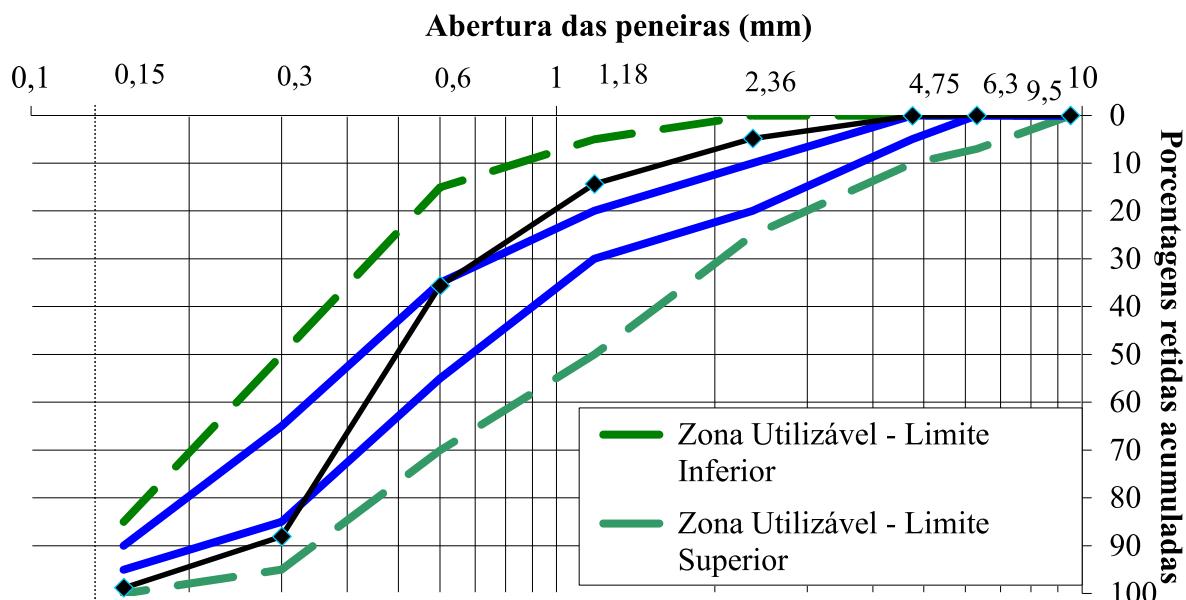
Figura 9 - Distribuição granulométrica da areia fina, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).
Fonte: Autor.

Tabela 6 - Características físicas areia média.

Composição granulométrica do agregado miúdo (areia média)					
Peneiras(mm)	Ensaio 1		Ensaio 2		Método de ensaio
	% Retido	% Retido acumulado	% Retido	% Retido acumulado	
4,8	0	0	0,2	0,2	
2,4	5,2	5,2	4,2	4,4	
1,2	9,9	15,1	9,2	13,6	
0,6	22,1	37,2	20,4	34	
0,3	51,7	88,9	53,2	87,2	
0,15	10,1	99,0	11,4	98,6	
< 0,15	1,0	99,4	1,4	100	
Total	100	-	100	-	
Módulo de finura	2,42				NBR 17054 (ABNT, 2022)
Dimensão máxima característica (mm)	2,40				NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa específica (g/cm ³)	2,65				NBR 16916 (ABNT, 2021)
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,53				NBR 16972 (ABNT, 2021)

Fonte: Autor.

Figura 10 - Distribuição granulométrica da areia média, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).
Fonte: Autor.

3.4.3 Agregado graúdo

Como agregado graúdo, foi utilizado brita de origem granítica, enquadrado dentro da zona utilizável conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022), sendo classificada como brita 1 conforme a NBR 7225 (ABNT, 1998). Este agregado é proveniente do município de Pelotas/RS. A secagem do agregado ocorreu em estufa elétrica até atingir a constância de massa.

Os resultados da caracterização física do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 7, e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 11. Ao analisar esses dados, observa-se que o material não se encontra dentro da faixa ideal para ser classificado como brita 1. No entanto, é importante destacar que o material possui uma boa classificação para ser utilizado na produção dos concretos empregados neste estudo.

Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.

Composição granulométrica do agregado graúdo			Método de ensaio	
Peneiras (mm)	Brita 1			
	% Retido	% Retido acumulado		
19	0	0	NBR 17054 (ABNT, 2022)	
12,5	24,3	24,3		
9,5	50,9	75,2		
6,3	24,2	99,4		
4,8	0	99,4		
<4,8	0	99,4		
Total	0,6	100		
Módulo de finura	6,71		NBR 17054 (ABNT, 2022)	
Dimensão máxima característica (mm)	12,5		NBR 17054 (ABNT, 2022)	
Massa específica (g/cm ³)	1,46		NBR 16917 (ABNT, 2021)	
Massa unitária solta (g/cm ³)	2,65		NBR 16972 (ABNT, 2021)	

Fonte: Autor.

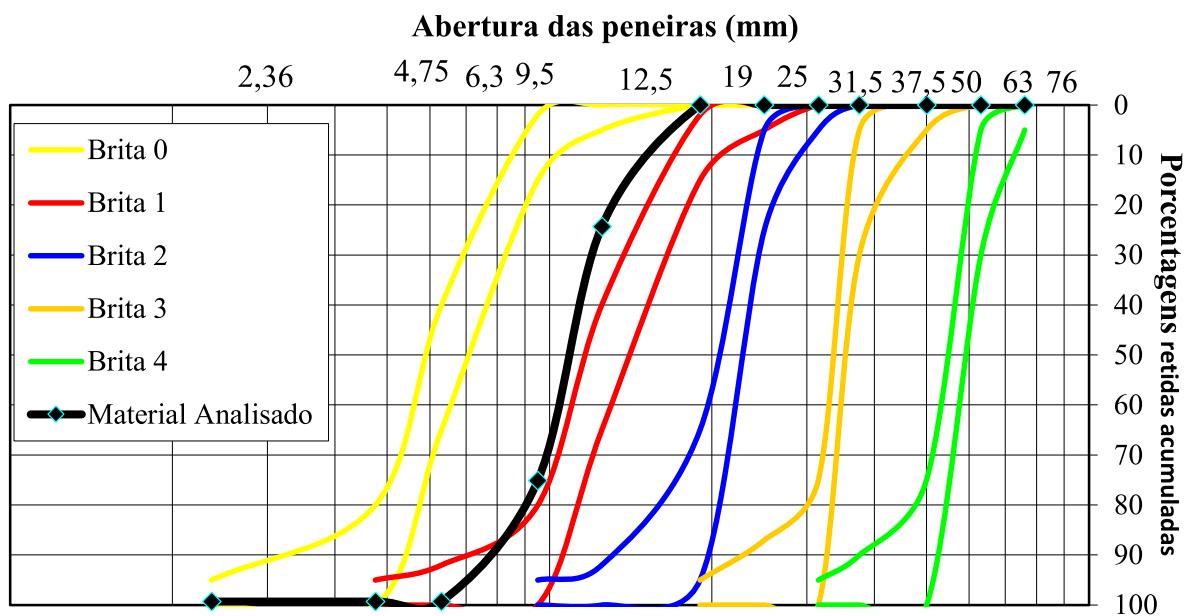


Figura 11 - Composição granulométrica brita, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022).
Fonte: Autor.

3.4.4 Água

Para a produção dos concretos utilizados na pesquisa, empregou-se água potável proveniente da rede municipal de abastecimento.

3.4.5 Cinza de folha de bambu

Para a produção dos corpos de prova de concreto, utilizou-se a cinza de folha de bambu, escolhendo a temperatura de calcinação e o tempo de moagem que proporcionaram o melhor desempenho em suas propriedades, conforme descrito na seção 3.2.

3.4.6 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi do tipo Tec-Flow, fornecido pela empresa GCP, conhecido por seu alto poder de redução de água e pela ausência de cloretos. As características detalhadas do aditivo superplastificante estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características aditivo superplastificante

Descrição do produto	Aspecto /cor	Dosagem recomendada (%) aditivo superplastificante)	Massa específica (g/cm ³) - NBR 10908
Aditivo de elevada tecnologia, desenvolvido para a obtenção de concretos de alto desempenho, auto-adensáveis, para pré-moldados e para artefatos de cimento. Proporciona manutenção da trabalhabilidade por elevados períodos e obtenção de elevadas resistências iniciais e finais. Possibilita atingir excelente custo benefício, devido sua funcionalidade em baixas dosagens.	Líquido alaranjado	0,3 a 2,0%	1,080 - 1,120

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante.

3.5 Preparação dos corpos de prova

A produção dos corpos de prova de concreto utilizados na pesquisa seguiu as normas específicas em cada etapa do processo, abrangendo desde a preparação até a moldagem e a cura.

3.5.1 Produção dos concretos

A produção dos concretos foi realizada conforme as diretrizes estabelecidas pela NBR 12655 (ABNT, 2015), seguindo os traços especificados na Tabela 4. A mistura dos materiais ocorreu em uma betoneira intermitente de eixo inclinado.

O processo teve início com a pesagem dos materiais em uma balança de precisão. Após a pesagem, os materiais foram adicionados à betoneira em funcionamento, seguindo a seguinte ordem:

- Agregado graúdo;
- 50% da quantidade de água;
- Material pozolânico, nos traços com a presença de BLA, esta foi adicionado a mistura juntamente com cimento Portland;
- Agregado miúdo;

- E por fim os 50% restante da quantidade de água.

Após a preparação de cada traço, os concretos foram submetidos ao ensaio de abatimento de tronco de cone, conforme especificado pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

3.5.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

O processo de moldagem e cura dos corpos de prova foi conduzido conforme as orientações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os corpos de prova foram moldados com dimensões de 10x20 cm (diâmetro x altura).

Na etapa de moldagem, utilizou-se adensamento manual com haste metálica, sendo a moldagem realizada em duas camadas com 12 golpes por camada. Além disso, foram aplicadas batidas leves na face externa do molde para assegurar o fechamento de eventuais vazios.

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desformados, identificados e submetidos à cura úmida em um tanque com água saturada com cal em temperatura controlada.

3.6 Ensaios em corpos de prova de concreto

Os ensaios realizados nos corpos de prova de concreto na etapa 3 da pesquisa são apresentados e descritos nesta seção.

3.6.1 Resistência à compressão

O ensaio foi realizado com três corpos de prova cilíndricos de concreto para cada traço em cada idade analisada, com dimensões de 10x20 cm (diâmetro x altura), conforme estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Os testes foram executados nas idades de 28, 91 e 180 dias, com o objetivo de avaliar a influência do BLA sobre a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo. O experimento foi conduzido no laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil (LEMCC) do IFRS.

3.6.2 Absorção de água por capilaridade

A determinação da absorção de água por capilaridade seguiu as recomendações da NBR 9779 (ABNT, 2012). Para o ensaio, foram utilizados três corpos de prova de concreto com dimensões de 10x20 cm (diâmetro x altura), na idade de 91 dias, para cada traço analisado. A escolha desta idade específica decorreu do desenvolvimento do efeito pozolânico ao longo do tempo, e neste período, a maior parte das reações pozolânicas já teria ocorrido.

Antes da execução do ensaio, os corpos de prova foram mantidos por 24 horas em uma estufa elétrica a 100°C. Após a retirada da estufa, os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão para determinar suas massas.

O ensaio iniciou-se com a imersão parcial dos corpos de prova em um nível constante de água, mantendo-se a 5 ± 2 mm acima da face inferior, sobre suportes, para permitir a ascensão capilar, conforme ilustra a Figura 12. Registrando as massas dos corpos de prova nos períodos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas a partir do início do ensaio.

A determinação da absorção de água por capilaridade foi realizada por meio da Equação 4.

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (4)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, expressa em gramas por centímetros quadrado (g/cm^2);

m_{sat} = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante o período de tempo especificado, expressa em gramas (g);

m_s = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de (23 ± 2) °C, expressa em gramas (g);

S = área da seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2).



Figura 12 – Realização do ensaio de absorção de água por capilaridade.
Fonte: Autor.

3.6.3 Coeficiente de migração de cloretos no concreto – NT Build 492

O coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário foi determinado conforme as diretrizes normatizadas pela NT Build 492 (1999). Este é um ensaio de migração de cloretos, no qual o deslocamento dos íons ocorre devido à imposição de uma diferença de potencial elétrico, determinando o coeficiente de difusão aparente do concreto por meio de uma equação empírica. Isso leva em consideração a tensão imposta, o tempo de duração do ensaio e a profundidade de penetração de cloretos.

Para a realização deste ensaio, foram utilizados quatro corpos de prova com dimensões de 100x50 mm (diâmetro x altura) para cada traço analisado. Esses corpos de prova foram obtidos a partir do corte da parte central de corpos de prova maiores, com dimensões de 100x200 mm (diâmetro x altura), conforme ilustra a Figura 13.

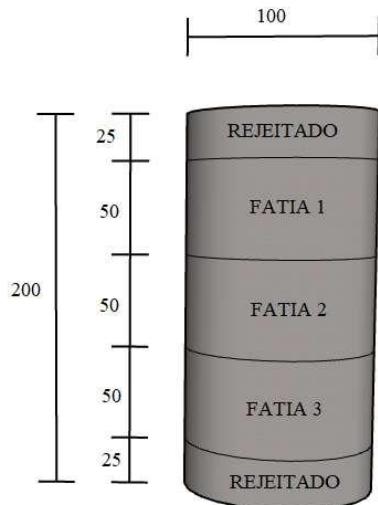


Figura 13 – Detalhe de como foi realizado o corte dos corpos de prova para realização da NT Build 492.
Fonte: Autor.

Cada corpo de prova foi posicionado sobre um cano de PVC de 100 mm, envolto por uma cinta de borracha e selado com silicone em todo o perímetro lateral, tanto na parte superior quanto na inferior. Em seguida, a vedação do sistema foi verificada, e o conjunto foi fixado com braçadeiras, formando um recipiente sólido. Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram saturados em um recipiente contendo água saturada com hidróxido de cálcio.

Os corpos de prova devidamente preparados foram colocados em uma caixa plástica sobre uma base inclinada, à qual foram adicionadas soluções de cloreto de sódio e hidróxido de sódio. Os itens necessários para a realização do ensaio podem ser visualizados de acordo com a Figura 14.

A solução anódica, adicionada na parte superior em relação ao corpo de prova, consiste em uma solução de 0,3 N de NaOH (hidróxido de sódio). Na parte inferior, que corresponde à solução catódica, foi adicionada uma solução de 10% de NaCl (cloreto de sódio), em massa em relação à água destilada. Para finalizar, foram posicionados os eletrodos na parte superior (ânodo) e inferior (cátodo).

O teste foi iniciado com a aplicação de uma tensão de 30 V, registrando-se a corrente inicial de cada espécime. Após o registro, foi efetuado o ajuste da corrente quando necessário, conforme especificado na Tabela 9. Após o ajuste, foi observado o novo valor de corrente inicial. O período de teste foi definido com base no valor da nova corrente, conforme a Tabela 9. Após a definição da duração do teste, registrou-se a temperatura inicial em cada solução do ânodo, utilizando um termômetro. O ensaio foi conduzido em um ambiente com temperatura controlada entre 20 e 25 °C.

Antes de finalizar o ensaio, registrou-se a corrente e a temperatura finais. Um exemplo da condução desse ensaio pode ser observado na Figura 15.

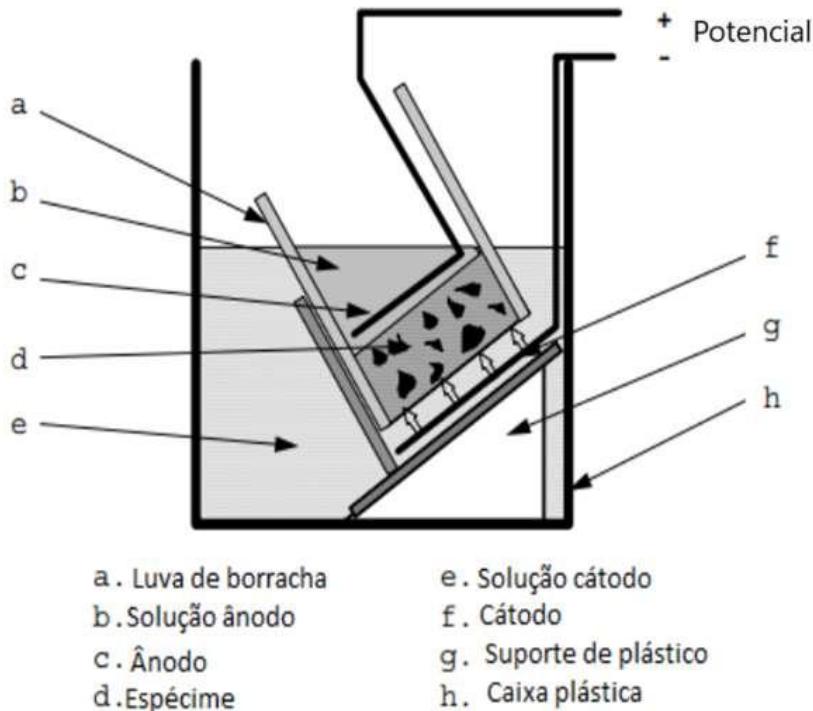


Figura 14 – Disposição da instalação do ensaio da NT Build 492.
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

Tabela 9 – Voltagem e duração do ensaio NT Build 492.

Corrente inicial I_{30V} com 30 V (mA)	Voltagem aplicada U (após ajuste) (V)	Nova corrente inicial Possível I_0 (mA)	Duração do teste t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

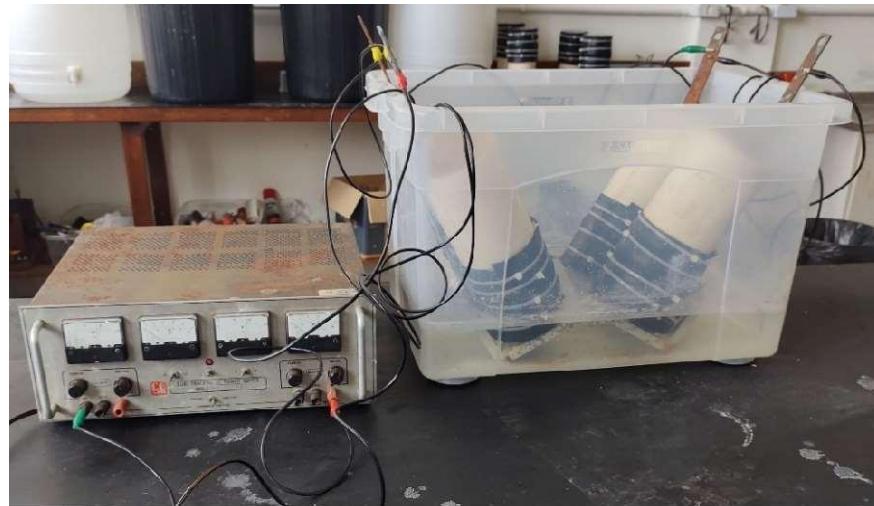


Figura 15 – Realização ensaio NT Build 492.
Fonte: Autor.

Neste ensaio, a ação potencial elétrica aplicado força os íons cloreto a migrar para dentro da amostra. Ao final do teste, as amostras de concreto são divididas ao meio através do ensaio de compressão diametral. Em cada face da divisão, é pulverizada uma solução de nitrato de prata, que forma uma região incolor em contraponto a uma região marrom decorrente da ausência de cloretos. Desta forma, é possível mensurar a profundidade de penetração de cloretos.

A mensuração da penetração de cloretos é realizada de acordo com a Figura 16, onde a região incolor é representada pela região clara da amostra. A partir da informação da penetração de cloretos e de outras informações obtidas no ensaio, é possível calcular o coeficiente de difusão de cloretos conforme a Equação 5.

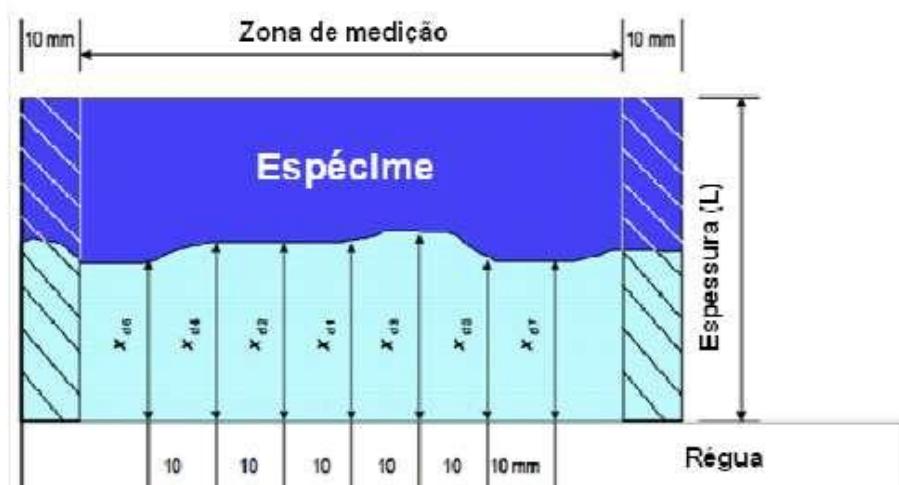


Figura 16 – Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos.
Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999).

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (5)$$

Onde:

D_{nssm} = coeficiente de migração no estado não estacionário, metros quadrados por segundo (m^2/s);

U = valor absoluto da voltagem aplicada, volts (V);

T = temperatura média das temperaturas inicial e final na solução anódica, $^{\circ}\text{C}$;

X_d = valor médio das profundidades de penetração, milímetros (mm);

t = duração do teste, horas (h);

3.6.4 Ensaio acelerado de migração de cloretos no concreto – Método

Multirregime - UNE 83987

A norma espanhola UNE 83987 (2012) estabelece um método de ensaio que permite a obtenção do coeficiente de difusão de cloretos no concreto nos estados estacionário e não estacionário.

O ensaio foi conduzido utilizando três corpos de prova de 100x30 mm (diâmetro x altura) para cada traço analisado. Esses corpos de prova foram obtidos pelo corte de corpos de prova maiores, com dimensões de 10x20 cm (diâmetro x altura), conforme ilustrado na Figura 17.

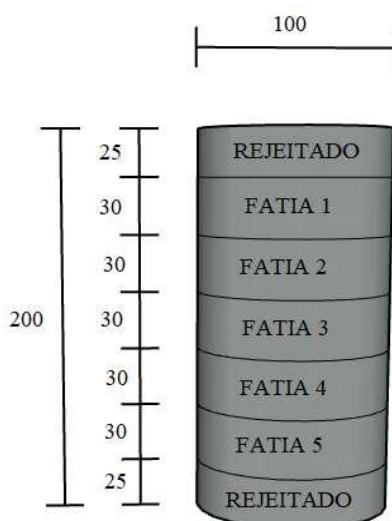


Figura 17 – Detalhe de como foi realizado corte dos corpos de prova para UNE 83987.
Fonte: Autor.

Para a obtenção do coeficiente de difusão, foi desenvolvido um aparato no qual as amostras ficaram expostas, de um lado, a uma solução contendo cloreto de sódio na concentração de 58,42 g de NaCl por litro (1 mol) de água destilada, e do outro lado, à água destilada. O aparato consiste na utilização de tubos e conexões de PVC com 100 mm de diâmetro, e também foi utilizado silicone para melhorar a estanqueidade do sistema. Após a preparação do aparato, foi realizado um teste de estanqueidade, seguindo as especificações da norma, conforme ilustrado na Figura 18.

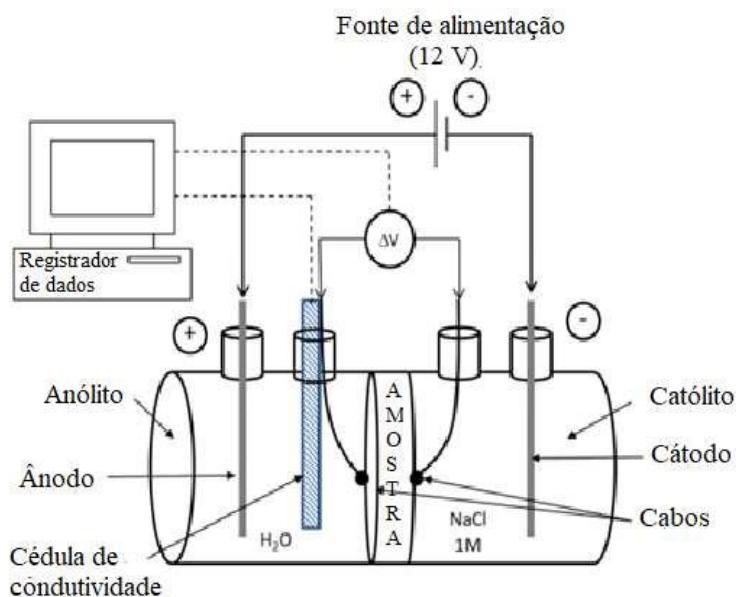


Figura 18 – Ilustração aparato utilizado no ensaio UNE 83987.
Fonte: Adaptado de UNE 83987 (2012).

Com o aparato pronto para utilização e devidamente testado, antes da realização do ensaio, as duas câmaras foram preenchidas com água destilada por 24 horas para garantir a saturação dos corpos de prova. Após o período de saturação, removeu-se a água, e posteriormente foi adicionada em uma câmara a solução de cloreto de sódio na concentração de 1 mol e na outra, água destilada.

Esse ensaio é considerado acelerado, de forma que os cloretos penetram por migração. Para acelerar a passagem de cloretos, na câmara que possui apenas água destilada foi introduzida uma barra de aço com carga positiva (ânodo), e na câmara com solução salina foi introduzida uma barra com carga negativa (cátodo), conforme ilustrado na Figura 19.

Durante a realização do ensaio, foram realizadas leituras periódicas, obtendo a condutividade da câmara com água destilada. Essa condutividade foi convertida em concentração de cloreto, em mol.



Figura 19 – Realização ensaio UNE 83987.
Fonte: Autor.

Durante a realização do ensaio, inicialmente, há um período em que a quantidade de cloreto que passa pela célula anódica é insignificante. Esse intervalo corresponde ao chamado "*time lag*" (τ) e define o tempo necessário para que os íons cloreto atravessem a amostra, saturando-a. Esse valor é importante para a determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário. Após este período, o fluxo de íons cloreto através da amostra se torna constante, o que corresponde ao período estacionário de difusão, conforme ilustra a Figura 20. O "*time lag*" (τ) é obtido por meio da interseção entre o prolongamento da reta que caracteriza o regime estacionário e o eixo do tempo, de acordo com o esquema da Figura 20 (RIBEIRO, 2018).

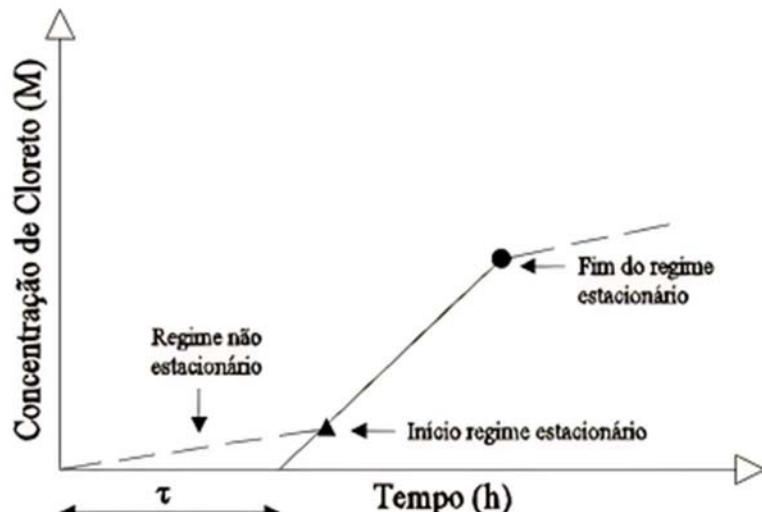


Figura 20 – Esquema determinação do *time lag* (τ), e período dos regimes estacionário e não estacionário.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2018).

A determinação do coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s), a partir de ensaio de migração, é efetuado por meio da equação de Nernst-Plank modificada, como apresentado na Equação 6.

$$D_s = \frac{J_{cl}RTl}{zFC_{cl}\gamma\Delta\Phi} \quad (6)$$

Onde:

D_s = Coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário, (m^2/s);

J_{cl} = fluxo de íons, ($\text{mol}/\text{s} \cdot \text{cm}^2$),

R = constante universal dos gases, 1,9872 cal/mol.K;

T = temperatura de realização do ensaio, em Kelvin (K);

l = espessura do corpo de prova, centímetros (cm);

z = valência dos íons, para cloretos igual a 1;

F = constante de Faraday, 23063 cal/volt;

C_{cl} = concentração de íons cloreto na célula catódica, (mol/cm^3)

γ = coeficiente de atividade da solução da célula catódica, para cloreto 0,657;

$\Delta\Phi$ = tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário, 6 V, como descrito anteriormente.

O fluxo de íons cloreto (J_{cl}) foi calculado utilizando a inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos na célula anódica em função do tempo, obtido a partir do ensaio de migração, como descrito na Equação 7.

$$J_{cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (7)$$

Onde:

V = volume da célula catódica contendo cloretos, centímetros cúbicos (cm^3);

A = área da seção do corpo de prova exposta, centímetros quadrados (cm^2);

dc/dt = inclinação da parte linear do gráfico de concentração de cloretos versus tempo, (Mol/s);

Para determinação do coeficiente de difusão no estado não estacionário (D_{ns}) a partir dos ensaios de migração, foi necessário determinar o *time lag* (τ), sendo determinado de acordo com a Equação 8.

$$D_{ns} = \frac{2l^2}{\tau\nu^2} \cdot \left[\nu \cdot \coth \frac{\nu}{2} - 2 \right] \quad (8)$$

$$\nu = \frac{ze\Delta\Phi}{KT} \quad (9)$$

Onde:

l = espessura do corpo de prova, centímetros (cm);

τ = *time lag* do ensaio de migração, em segundos (s);

ν = conforme Equação 9;

z = valência dos íons, para cloretos igual a 1;

e = carga elétron, $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb;

$\Delta\Phi$ = tensão média que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado não estacionário, 12 V, como descrito anteriormente;

K = constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;

T = temperatura de realização do ensaio, em Kelvin (K).

3.6.5 Classificação dos ensaios de determinação do coeficiente de difusão quanto a penetração de cloretos

Os métodos empregados para determinar o coeficiente de difusão de cloretos neste estudo, seguindo as diretrizes da NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012), não fornecem uma classificação específica para os resultados obtidos nos ensaios de determinação do coeficiente de difusão. Assim, neste trabalho, optou-se por adotar uma classificação baseada na penetração de cloretos no concreto, utilizando os resultados obtidos do coeficiente de difusão, conforme proposto por Nilsson, Ngo e Gjørv (1998), conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação coeficiente de difusão quanto a penetração de íons cloreto.

Migração de cloretos ($D \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Penetrabilidade dos íons cloreto
15	Alta
10-15	Moderada
5-10	Baixa
2,5-5	Muito Baixa
<2,5	Desprezível

Fonte: Nilsson, Ngo e Gjørv (1998).

Embora essa classificação seja amplamente adotada por diversos pesquisadores, é importante ressaltar que ela não reflete diretamente as características de penetração de cloretos no concreto. Na verdade, funciona apenas como um indicativo, pois existem muitas variáveis ambientais que influenciam essa penetração. Essas variáveis incluem o ambiente em que o concreto está sendo exposto, a zona de exposição, a concentração de cloretos, entre outros fatores.

4 Resultados e discussões

No presente capítulo, os resultados provenientes das análises e ensaios realizados são apresentados, analisados e discutidos em detalhes. A seção 4.1 aborda os resultados da caracterização da BLA, enquanto a seção 4.2 destaca os resultados obtidos nos ensaios realizados nos corpos de prova de concreto com substituição parcial do cimento por BLA.

4.1 Caracterização da cinza de folha de bambu

Nesta seção, serão minuciosamente descritos os resultados provenientes dos ensaios e análises realizados para caracterização da cinza de folha de bambu. Com base nessas conclusões, foi possível determinar a abordagem mais eficaz para a produção da BLA, considerando o tipo específico de bambu utilizado na pesquisa.

4.1.1 Massa específica

Os resultados referentes à massa específica para as distintas temperaturas de calcinação da BLA estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaio de determinação da massa específica

Temperatura de calcinação (°C)	Massa específica (g/cm ³)
500	1,98
600	1,93
700	1,96
900	1,95
1000	1,94

Fonte: Autor.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a temperatura de calcinação não exerceu influência significativa na massa específica da cinza de folha de bambu. Os dados obtidos para as diferentes temperaturas de calcinação não demonstraram variação significativa.

4.1.2 Análise química por fluorescência de raio X

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise química por fluorescência de raio X para as diversas temperaturas de calcinação da folha de bambu, expressos como a percentagem dos elementos químicos presentes na amostra. Com base nos resultados obtidos, é possível constatar que a variação na temperatura de calcinação das folhas de bambu exerceu influência na composição química da cinza produzida, resultando em diferentes quantidades de elementos químicos em cada temperatura de calcinação. Em todas as condições analisadas, foi observado um elevado teor de SiO_2 nas cinzas produzidas. A presença de Al_2O_3 não foi detectada em nenhum dos casos. Baixos teores de alumina (Al_2O_3) em cinzas de folhas de bambu, no entanto, também foram observados em outros estudos (VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2018; ROSELLÓ *et al.*, 2015).

Tabela 12 – Resultado fluorescência de raio X

Elemento	Temperatura de calcinação (°C)				
	500	600	700	900	1000
SiO_2	52,46	53,99	51,35	52,85	46,05
Al_2O_3	nd	nd	nd	nd	nd
TiO_2	0,02	0,01	0,01	nd	nd
Fe_2O_3	0,28	0,17	0,56	6,21	4,64
MnO	0,57	0,57	0,57	0,58	0,58
MgO	3,14	3,11	3,10	1,74	2,40
CaO	7,12	6,61	7,10	5,39	8,27
Na_2O	0,17	0,16	0,23	0,45	0,27
K_2O	2,77	2,64	2,73	2,38	3,80
P_2O_5	1,18	1,18	1,15	0,91	1,09
SO_3	nd	nd	nd	1,55	0,59
Cr_2O_3	nd	nd	nd	1,31	0,86
ZnO	nd	nd	nd	3,44	1,22
Eu_2O_3	nd	nd	nd	0,10	0,09
LOI	32,30	31,56	33,18	23,09	30,14

Nota: LOI representa a porcentagem de voláteis presentes na amostra.

Fonte: Autor.

A norma NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que materiais pozolânicos de classe E devem conter, em sua composição química, no mínimo 50% da soma dos elementos SiO_2 (dióxido de silício), Al_2O_3 (óxido de alumínio) e Fe_2O_3 (óxido de ferro). A cinza de folha de bambu produzida atende a esse critério em todas as temperaturas

de calcinação. Entre as temperaturas analisadas, a calcinação a 900 °C apresentou o maior nível de pozolanicidade, com 59,06% da soma dos elementos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, seguida pelas temperaturas de 600, 500, 700 e 1000 °C, com teores de 54,16%, 52,47%, 51,91% e 50,69% respectivamente. Observou-se que as variações nos teores de pozolanicidade entre as diferentes temperaturas de calcinação foram relativamente pequenas.

Os níveis de pozolanicidade alcançados com as cinzas produzidas nesta pesquisa podem não atingir valores tão elevados quando comparados aos estudos realizados por Dwivedi *et al.* (2006), Singh *et al.* (2007), Villa-Cociña *et al.* (2011) e Frías *et al.* (2012), nos quais índices de atividade pozolânica (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃) superiores a 80% foram obtidos. No entanto, é importante ressaltar que além do nível de pozolanicidade determinado pela composição química, outros fatores como o grau de amorfismo, atividade pozolânica e reatividade também devem ser considerados para avaliar completamente a qualidade do material como adição pozolânica.

4.1.3 Chapelle Modificado

O ensaio de Chapelle Modificado, também conhecido como método direto de determinação do teor de cal fixado por atividade pozolânica, optimiza a interação mineral com o hidróxido de cálcio devido à realização do ensaio em solução, sob agitação e em uma elevada temperatura (90 °C ± 5 °C). Essa condição acelera a reação, potencializando a atividade pozolânica e indicando o potencial reativo máximo da adição mineral através do consumo de cal. A Tabela 13 apresenta os teores de cal fixados [Ca(OH)₂/g] pelas BLAs nas diferentes temperaturas de calcinação.

Tabela 13 – Ensaio de Chapelle Modificado, teores de cal fixada, por atividade pozolânica.

Temperatura de calcinação (°C)	Cal fixada (mg Ca(OH) ₂ /g de adição)
500	883,3440
600	907,3680
700	759,5280
900	519,2880
1000	480,4800

Fonte: Autor.

Os autores Raverdy *et al.* (1980) estabelecem o valor mínimo de 436 mg Ca(OH)₂/g de adição para a classificação da adição mineral como material

pozolânico reativo. Em todas as temperaturas de calcinação, foi possível atender ao valor mínimo para a classificação do material como pozolânico nesta análise. Embora as temperaturas de calcinação de 900 e 1000 °C possam ser classificadas como pozolanas ativas, a quantidade de cal fixada foi muito próxima ao valor mínimo recomendado por Raverdy *et al.* (1980). Por outro lado, com a calcinação em temperaturas mais baixas, foram obtidas maiores quantidades de cal fixada, indicando material com alta pozolanicidade e reatividade. A temperatura de calcinação de 600 °C apresentou maior reatividade, com um consumo de 907,3680 mg Ca(OH)₂/g de adição, seguido das temperaturas de calcinação de 500 e 700 °C.

Hooppe Filho *et al.* (2017 a) analisaram a quantidade de cal fixada (mg Ca(OH)₂/g de adição) para diferentes tipos de materiais pozolânicos, obtendo quantidades de cal fixada de 1542 para sílica ativa, 1336 para sílica de casca de arroz e 1193 para o metacaulim. Os teores de cal fixada pelas BLAs utilizadas neste estudo são inferiores aos valores obtidos para os materiais pozolânicos analisados por Hooppe Filho *et al.* (2017). No entanto, a BLA com temperatura de calcinação de 600 °C apresenta valores ligeiramente inferiores aos do estudo de comparação, evidenciando alta reatividade do material nessa temperatura de calcinação.

4.1.4 Análise térmica (TG) e termogravimétrica derivada (DTG)

As análises termogravimétricas (TG) e derivada termogravimétrica (DTG) para as diferentes temperaturas de calcinação das BLAs são ilustradas nas Figuras 21, 22, 23, 24 e 25. Os resultados da variação de massa das amostras (TG) são expressos em porcentagem, mostrando a variação de massa das amostras analisadas nas diferentes temperaturas de calcinação. Enquanto isso, a derivada da variação de temperatura (DTG) exibe os picos de variações de massa que as amostras experimentaram com o aumento da temperatura de análise.

As temperaturas de calcinação de 500, 600 e 700 °C apresentaram perda de massa de 26,44 %, 21,35 % e 26,60 %, respectivamente, na análise de TG. Ao analisar a DTG para essas temperaturas de calcinação, verifica-se uma variação de massa inicial mais pronunciada do que durante a análise, apresentando pequenos picos de variação de massa. Este pico inicial de variação de massa da amostra caracteriza a eliminação de voláteis presentes, resultando em uma redução percentual significativa de massa ao final da análise, como evidenciado pelas curvas de TG.

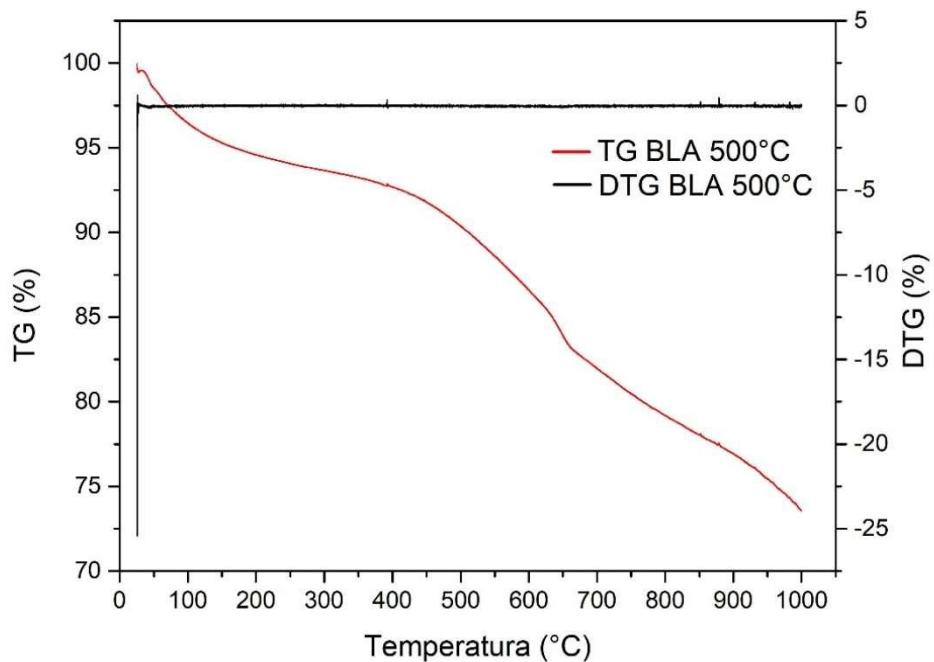


Figura 21 – Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 500 °C.
Fonte: Autor.

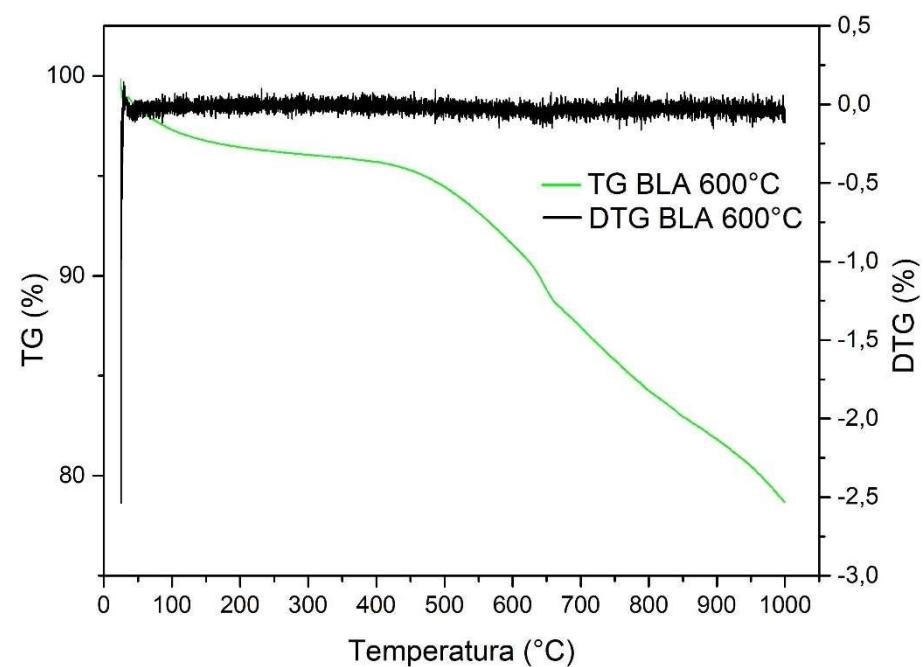


Figura 22 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 600 °C.
Fonte: Autor.

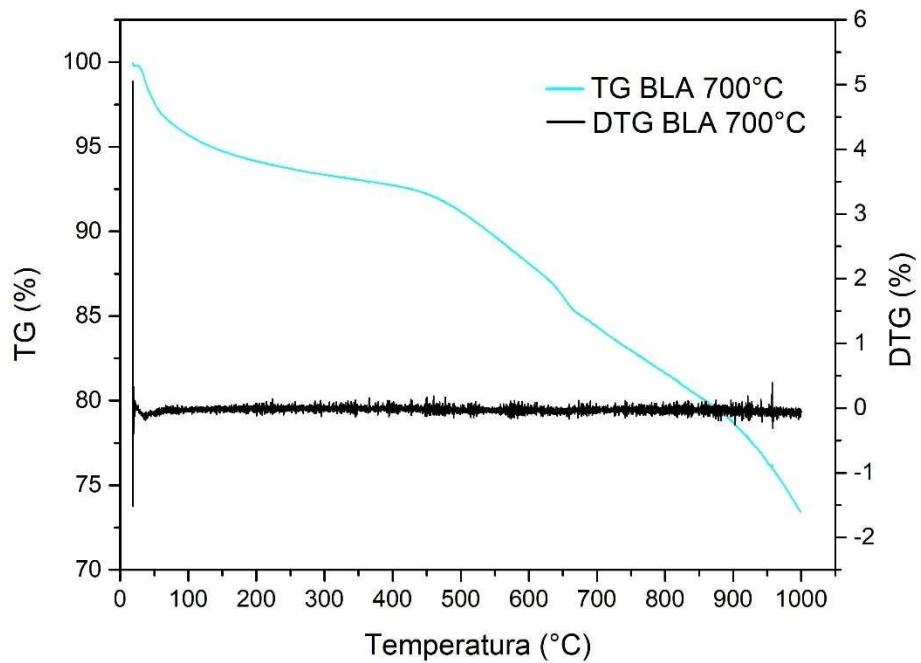


Figura 23 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 700 °C.
Fonte: Autor.

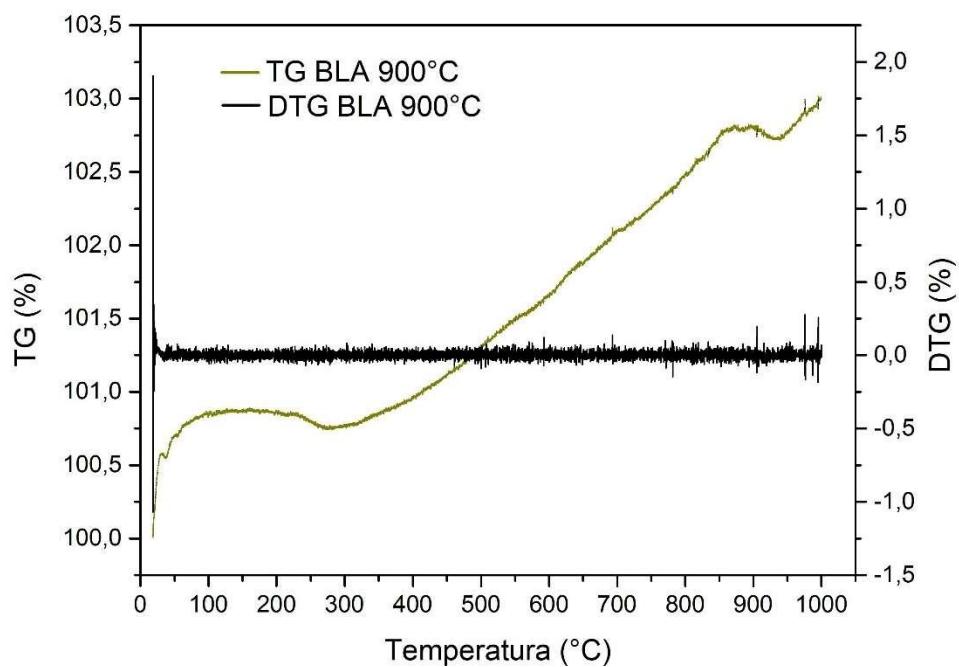


Figura 24 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 900 °C.
Fonte: Autor.

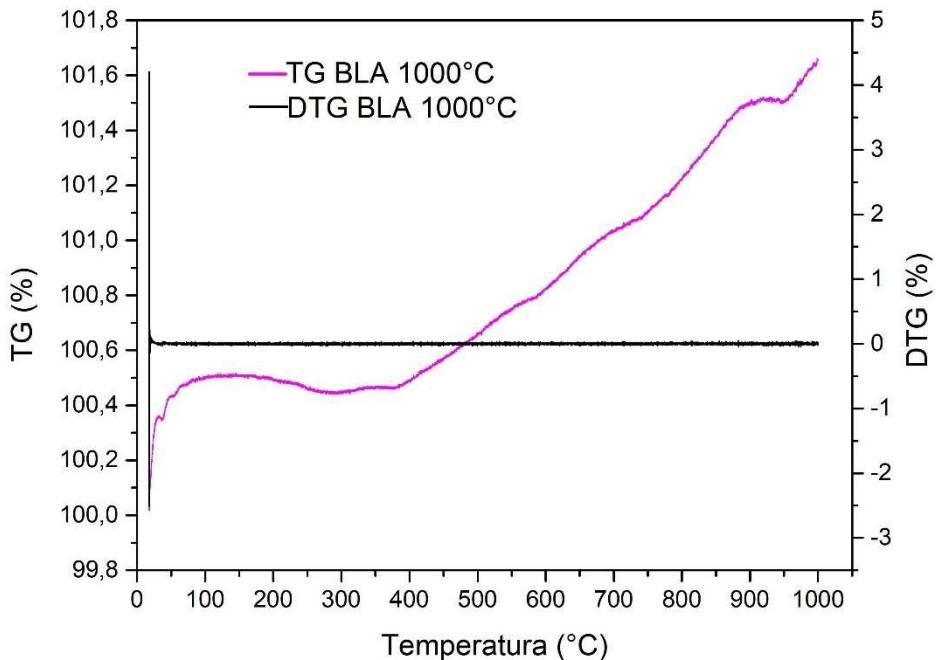


Figura 25 - Análise termogravimétrica e termogravimétrica derivada BLA calcinada a 1000 °C.
Fonte: Autor.

As temperaturas de calcinação de 900 e 1000 °C apresentaram ganho de massa de 3,01 % e 1,66 %, respectivamente, na análise de TG. Os gráficos de DTG para essas temperaturas de calcinação exibem um pico de aumento de massa inicial, seguido por picos de pequena variação de massa das amostras analisadas. O pico inicial resultou em um aumento de massa das amostras com a elevação da temperatura de análise. Dado que essas amostras foram calcinadas em temperaturas mais elevadas em comparação com as demais temperaturas de calcinação, ocorreu uma melhor queima do material sem a necessidade da eliminação de voláteis, que foram expelidos durante o próprio processo de calcinação, e o material começa a sofrer alterações estruturais, principalmente devido à cristalização. Esse processo de cristalização torna o material mais estável termicamente, reduzindo o grau de amorfismo e aumentando a cristalinidade. Consequentemente, a reatividade do material é drasticamente diminuída, sendo observada esse fato na análise de difração de raios-X.

Apesar de as BLAs calcinadas a 500, 600 e 700 °C possuírem uma quantidade significativa de voláteis que poderiam ser eliminados com o aumento da temperatura de calcinação, semelhante ao que ocorreu com a calcinação a 900 e 1000 °C, a eliminação desses voláteis com a elevação da temperatura de calcinação levaria à cristalização das cinzas, conforme demonstrado pelas análises de difração de raios-

X. Portanto, para possuir uma pozolanicidade adequada e ser considerada de estrutura amorfa, as cinzas devem conter uma quantidade de voláteis em sua composição.

4.1.5 Difração de raios-X

Os resultados das análises de difração de raios-X são apresentados nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 para as folhas de bambu calcinadas nas temperaturas de 500, 600, 700, 900 e 1000 °C, respectivamente.

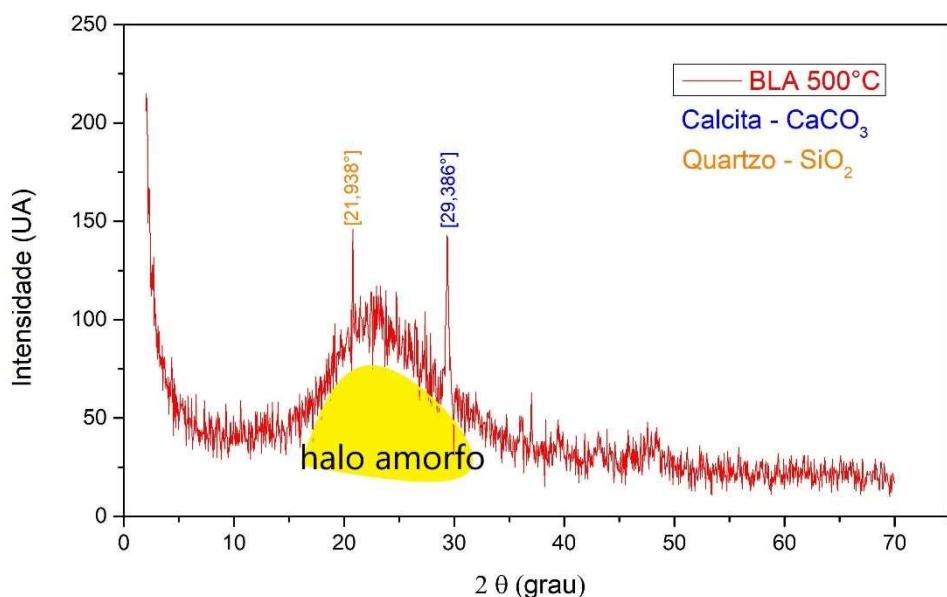


Figura 26 – Análise difração de raios-X BLA calcinada a 500 °C.
Fonte: Autor.

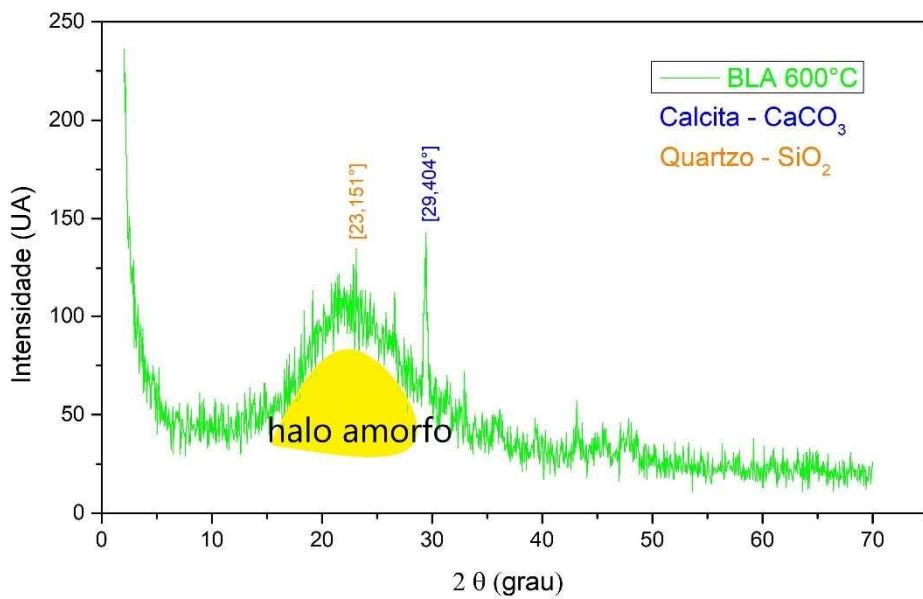


Figura 27 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 600 °C.
Fonte: Autor.

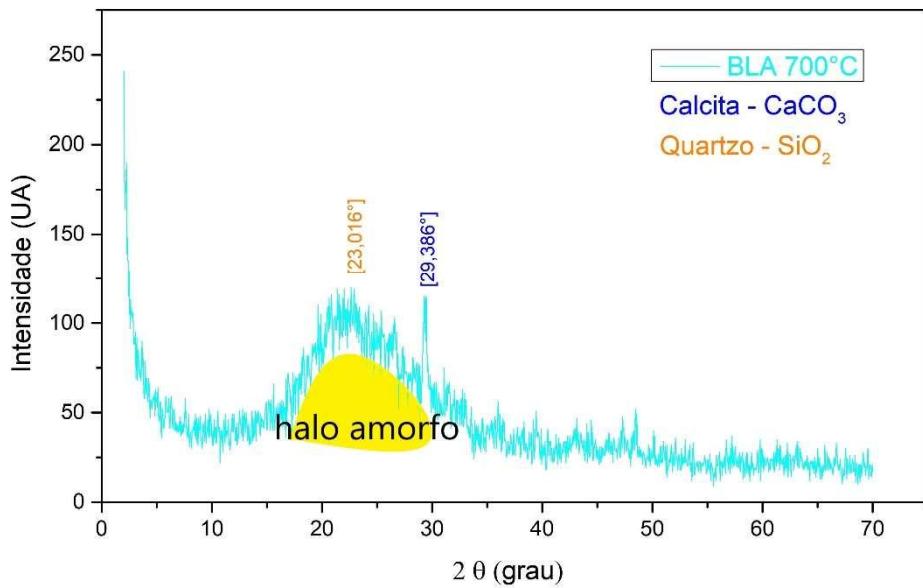


Figura 28 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 700 °C.
Fonte: Autor.

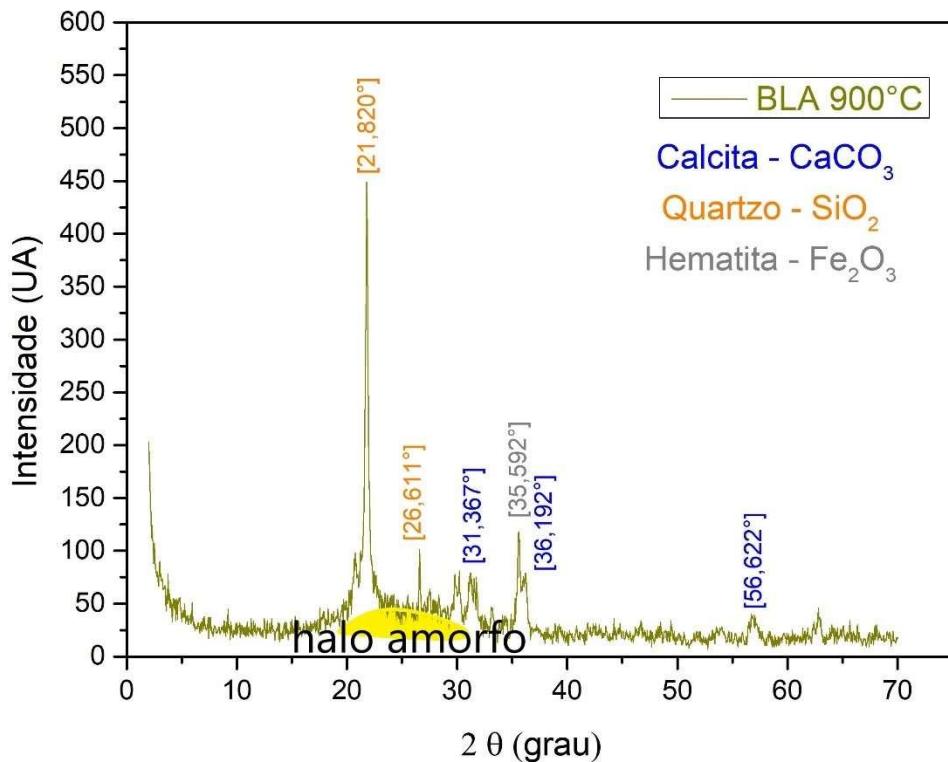


Figura 29 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 900 °C.
Fonte: Autor.

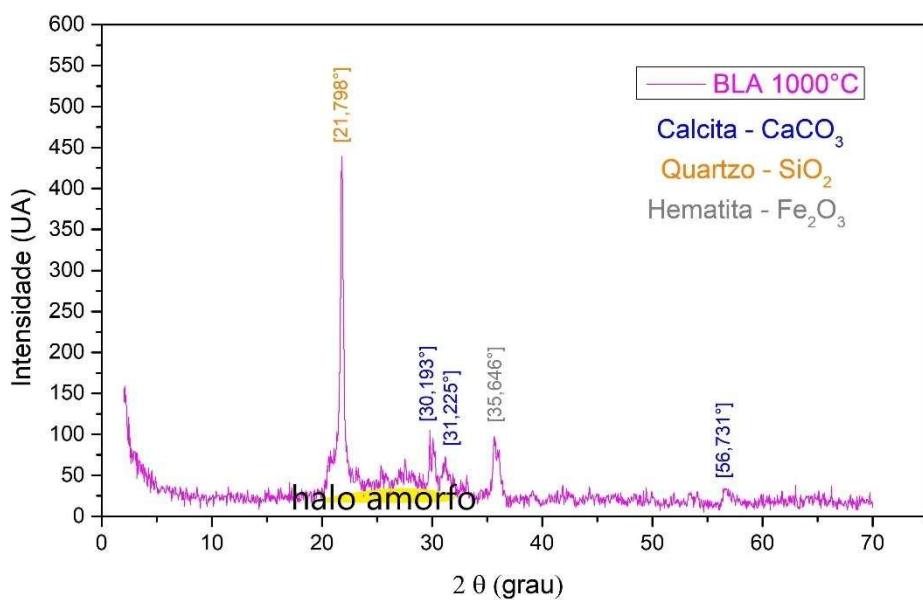


Figura 30 - Análise difração de raios-X BLA calcinada a 1000 °C.
Fonte: Autor.

A difração de raios-X revelou a composição mineralógica das amostras de 500, 600 e 700 °C, evidenciando um padrão de difração característico de material amorfó, conforme observado nos gráficos pela formação do halo amorfó bem definido. A banda larga observada entre 20° e 30° (2θ) pode ser atribuída à presença de sílica amorfá, conferindo atividade pozolânica à cinza. Nessas temperaturas de calcinação, foram identificadas fases de calcita (CaCO_3) e quartzo (SiO_2). Por outro lado, as temperaturas de calcinação de 900 e 1000 °C apresentaram composição mineralógica incluindo fases identificadas de calcita (CaCO_3), quartzo (SiO_2) e hematita (Fe_2O_3), com padrão característico de material cristalino, sem a clara formação do halo amorfó e uma maior ocorrência de picos cristalinos, indicando a cristalinidade do material. Este fenômeno sugere uma transição para estruturas cristalinas sob condições de calcinação em temperaturas mais elevadas. Comportamento semelhante foi observado por Cociña *et al.* (2018) e Frías *et al.* (2012), entre outros.

A Tabela 14 apresenta os resultados da porcentagem de amorfismo para as diferentes temperaturas de calcinação da folha de bambu, determinada pelo método de separação simples de áreas, conforme especificado no item 3.2.4 deste trabalho. Sendo que com a temperatura de calcinação de 600 °C foi possível obter material com 86,56 % de amorfismo. Essa característica do material é fundamental para o desenvolvimento da pesquisa. Pois quanto maior o grau de amorfismo do material pozolânico, mais reatividade esse material possui para reagir com o hidróxido de cálcio produzido na hidratação do cimento e formar produtos resistentes como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) e/ou o sílico-aluminato de cálcio hidratado (S-A-C-H).

Tabela 14 – Determinação da porcentagem amorfá das diferentes temperaturas de calcinação.

Temperatura de calcinação (°C)	% de amorfismo
500	78,86
600	86,56
700	85,43
900	47,03
1000	40,83

Fonte: Autor.

As temperaturas de calcinação de 900 e 1000 °C demonstraram um baixo nível de amorfismo, classificando o material como cristalino nessas condições. Nessas temperaturas, o material não exibiu reatividade, evidenciada pela ausência do halo

amorfo, não sendo possível atribuir potencial pozolânico ao material. Portanto, não é recomendado como aglomerante em conjunto com o cimento. Devido a esse fato, essas temperaturas de calcinação foram excluídas do restante das análises conduzidas no estudo.

4.1.6 Análise granulométrica

Os resultados da análise granulométrica da cinza de folha de bambu são destacados na Tabela 15. Os parâmetros D_{10} e D_{90} referem-se aos diâmetros de corte da curva de distribuição acumulada em 10 % e 90 %, respectivamente. Enquanto, o parâmetro D_{50} está associado à mediana da distribuição e representa o diâmetro médio de partícula (D_m).

Com base nos resultados obtidos, é evidente que o aumento do tempo de moagem da BLA resultou em uma redução das dimensões das partículas do material. Observa-se que o material apresenta uma granulometria fina em todos os tempos de moagem utilizados.

Vale ressaltar que, de acordo com os autores Villar-Cociña *et al.* (2020), uma análise similar realizada em sua pesquisa utilizando um analisador de partículas por difração a laser em modo líquido resultou em uma granulometria média de 21,41 μm para a BLA utilizada. Este valor é próximo aos obtidos neste estudo para o tempo de moagem de quatro horas da BLA investigada.

Andrade Neto *et al.* (2021), ao avaliarem a distribuição granulométrica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, observaram partículas com D_{50} de 36,68 μm . Ao caracterizar cinzas volantes para uso potencial em concreto, Bagheri *et al.* (2013) identificaram um diâmetro médio de 12 μm .

Evidentemente, as características dimensionais da cinza dependem dos processos pelos quais o material passa. Vale ressaltar que essas propriedades influenciam significativamente a atividade pozolânica. A redução das dimensões das partículas tende a aumentar a área superficial do material, aumentando o seu potencial de reações dentro da matriz cimentícia e o seu efeito *filler*.

Tabela 15 – Resultado da análise de granulometria à laser

Temperatura de calcinação (°C) e tempo de moagem	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D _m (μm)
500 - 1 hora	60,93	20,63	4,04	27,45
500 - 2 horas	52,01	15,70	3,17	22,35
500 - 3 horas	43,84	12,90	2,64	18,47
500 - 4 horas	37,35	10,9	2,24	15,65
600 – 1 hora	64,80	22,94	4,52	29,76
600 – 2 horas	56,98	17,84	3,51	24,93
600 – 3 horas	48,50	14,85	3,04	20,94
600 – 4 horas	43,06	13,00	2,65	18,340
700 – 1 hora	71,31	24,18	4,78	32,29
700 – 2 horas	64,63	19,73	3,78	28,10
700 – 3 horas	57,66	16,43	3,19	24,31
700 – 4 horas	53,04	14,27	2,86	21,75

Fonte: Autor.

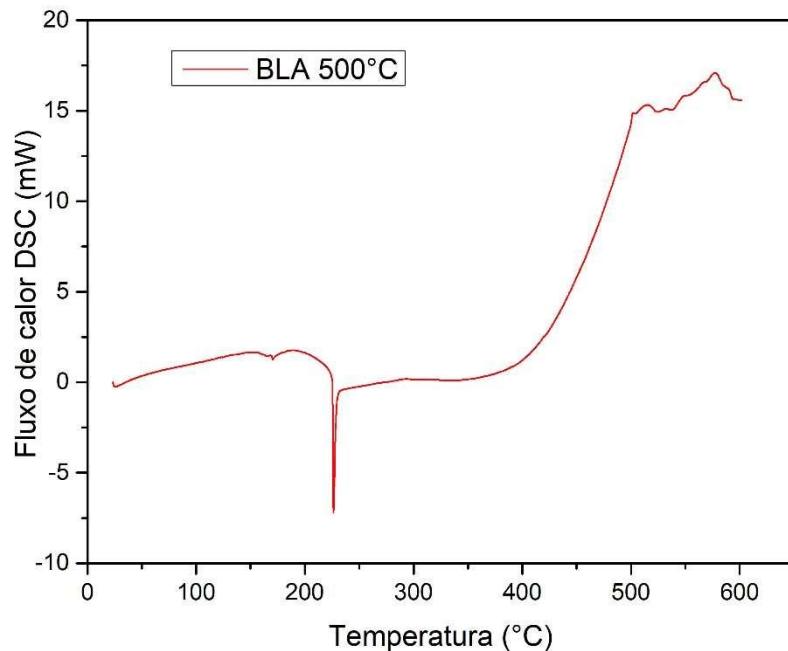
4.1.7 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As curvas de variação de fluxo de calor DSC para as diferentes temperaturas de calcinação das folhas de bambu são apresentadas nas Figuras 31, 32 e 33, com os resultados de DSC expressos em *mili* watt (mW).

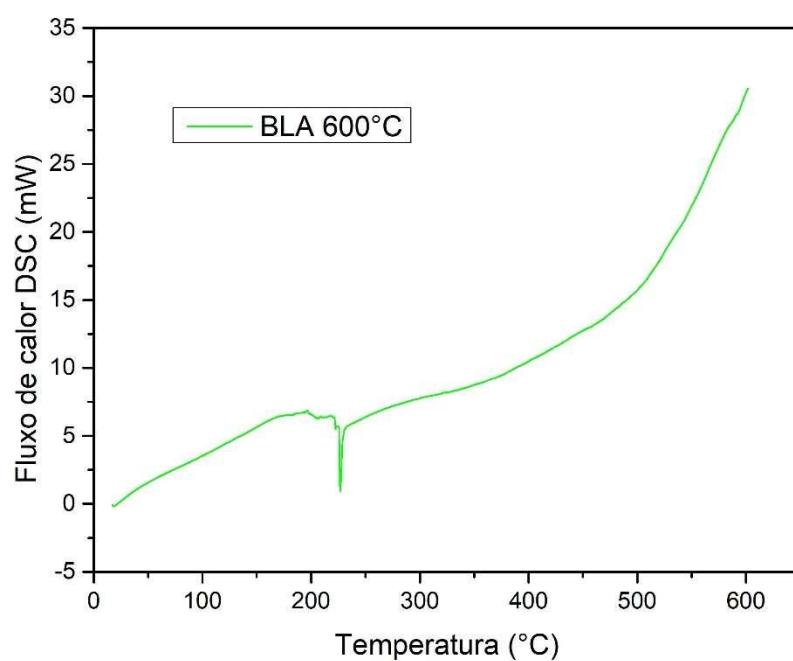
Para as diversas temperaturas de calcinação, os materiais exibem, no início da análise, um pequeno pico endotérmico em torno dos 25 °C, indicando a perda de voláteis livres presentes nas amostras. Não ocorre nenhum evento térmico significativo até aproximadamente 210, 220 e 190 °C para as temperaturas de calcinação de 500, 600 e 700 °C, respectivamente, quando ocorre um novo pico endotérmico em cada temperatura de calcinação. Esse pico é característico da eliminação de voláteis associados aos produtos de reação presentes nas amostras, resultando na perda de uma maior quantidade de massa das amostras. Os voláteis presentes na BLA são identificados como água ou umidade presentes na amostra (BERNAL *et al.*, 2002; COSTA *et al.*, 2023).

Na temperatura de calcinação de 500 °C, ocorre ainda um pico endotérmico entre 500 e 550 °C, relacionado à eliminação de mais produtos voláteis. Para as

temperaturas de calcinação de 600 e 700 °C, não foi observada nenhuma nova ocorrência de evento térmico até o final do ensaio (BERNAL *et al.*, 2002; COSTA *et al.*, 2023).



Fonte: Autor.



Fonte: Autor.

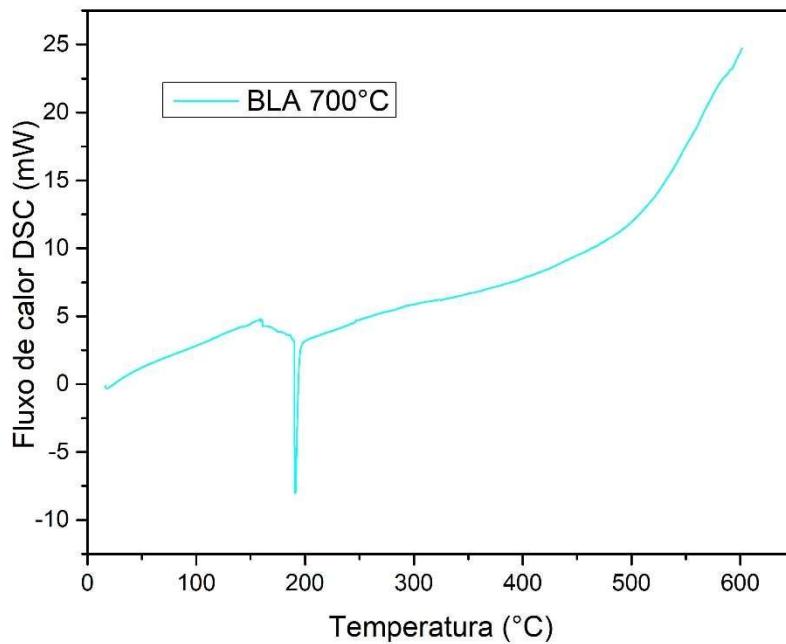


Figura 33 - Análise DSC para BLA calcinada a 700 °C.
Fonte: Autor.

4.1.8 Índice de atividade pozolânica com cal

Os resultados obtidos para resistência à compressão no ensaio de atividade pozolânica com cal são apresentados na Tabela 16 para as diferentes temperaturas de calcinação da BLA.

Tabela 16 – Ensaio de índice de atividade pozolânica com cal.

Temperatura de calcinação (°C)	Resistência à compressão média (MPa)
500	6,20
600	6,80
700	6,50

Fonte: Autor.

Para o Índice de Atividade Pozolânica com cal (IAP), a NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que, para evidenciar atividade pozolânica, é necessário alcançar uma resistência à compressão superior a 6 MPa. Portanto, os resultados obtidos neste ensaio mostram que todas as temperaturas de calcinação analisadas atendem aos requisitos estabelecidos pela norma. Assim, pode-se concluir que a BLA calcinada nas temperaturas estudadas apresenta evidências claras de atividade pozolânica.

Os autores Hoppe Filho *et al.* (2017 a) conduziram ensaios de IAP com cal utilizando adições de sílica de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, fíler calcário e fíler quartzo, obtendo resultados positivos para as adições de sílica de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim, com resistências à compressão de 6,1 MPa, 9,6 MPa e 16,0 MPa, respectivamente. As demais adições não alcançaram valores de resistência à compressão superiores ao mínimo exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Comparando esses resultados com os obtidos por Hoppe Filho *et al.* (2017a) com as BLAs, é possível constatar que as BLAs apresentaram resistência à compressão no ensaio de IAP com cal semelhante à sílica de casca de arroz, porém significativamente inferior à sílica ativa.

4.1.9 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

A Tabela 17 apresenta o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias obtidos por meio da resistência à compressão das argamassas com substituição parcial do cimento por BLA em relação à argamassa de referência, considerando as diferentes temperaturas de calcinação.

Tabela 17 – Ensaio de Atividade pozolânica com cimento aos 28 dias

Temperatura de calcinação (°C)	índice médio de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)
500	131,15
600	131,59
700	113,07

Fonte: Autor.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que as argamassas com substituição parcial de cimento Portland por material pozolânico devem apresentar índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias ($I_{cimento}$) superior a 90 %, conforme a Equação 3. Este critério é atendido no estudo em questão, onde as argamassas com substituição parcial do cimento por BLA apresentaram o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias superiores a 90 %. Esses resultados evidenciam a atividade pozolânica das cinzas calcinadas nas temperaturas analisadas, destacando seu desempenho notavelmente superior em comparação ao traço de referência.

Hoppe Filho *et al.* (2017 b), ao realizar ensaios de IAP com cimento utilizando sílica de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, fíler calcário e fíler quartzo, obtiveram

índices de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de 94,40 %, 79,81 %, 89,78 %, 56,45 % e 56,20 %, respectivamente. Os valores obtidos pelas BLAs no presente estudo são superiores aos obtidos por Hoppe Filho *et al.* (2017), evidenciando assim o bom desempenho da BLA no IAP com cimento.

4.1.10 Determinação da melhor condição de produção da BLA

Com base nos resultados obtidos nas análises e ensaios de caracterização das cinzas de folhas de bambu produzidas, é possível constatar que, em alguns parâmetros, a variação na temperatura de calcinação não provocou alterações significativas no material. No entanto, em outros parâmetros, observou-se uma mudança expressiva no comportamento da cinza de folha de bambu em função da temperatura de calcinação.

A massa específica da BLA não apresentou variação significativa com a mudança na temperatura de calcinação. No entanto, a análise de fluorescência de raio X revelou algumas variações na composição mineralógica do material em função da temperatura de calcinação. Notavelmente, a calcinação a 900 °C resultou na maior porcentagem de pozolanicidade, porém nessa temperatura a cinza tenha se tornado predominantemente cristalina na análise de difração de raios-X. Neste sentido, as temperaturas de calcinação de 900 °C e 1000 °C foram descartadas em algumas análises devido à cristalinidade do material, sendo necessário que este apresente características amorfas para ser utilizado como material pozolânico em substituição parcial ao cimento.

As temperaturas de calcinação de 500 °C, 600 °C e 700 °C apresentaram resultados semelhantes em algumas análises e ensaios realizados, com a temperatura de 600 °C destacando-se por seu melhor desempenho em relação às demais, conforme discutido nos subitens anteriores. A BLA calcinada a 600 °C demonstrou possuir atividade pozolânica, atribuída à sua composição química, aos resultados obtidos nos índices de atividade pozolânica com cal e cimento, bem como à sua estrutura amorfada, evidenciada pelo difratograma de raios-X. Além disso, o ensaio de Chapelle modificado confirmou sua alta reatividade. Assim, a temperatura de calcinação de 600 °C, combinada com o tempo de moagem de 4 horas, foi definida como a condição ideal de produção da BLA entre as condições avaliadas nesta pesquisa.

Nesse sentido, doravante, a cinza de folha de bambu calcinada a 600 °C com um tempo de moagem de 4 horas será referida apenas como BLA ao longo do restante da pesquisa.

4.2 Avaliação dos concretos produzidos

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, coeficiente de difusão de cloretos no concreto em regime estacionário conforme a NT Build 492 (1999) e UNE 83987(2012) e nos regimes estacionário e não estacionário conforme a UNE 83987 (2012) em concretos com substituição parcial de cimento por BLA.

4.2.1 Resistência à compressão

Na Tabela 18, estão apresentados os valores médios de resistência à compressão (f_{cm}) dos concretos nas idades de 28, 90 e 180 dias, juntamente com os desvios padrão (σ) e os coeficientes de variação (CV). Com base nos resultados, é evidente um baixo coeficiente de variação para o ensaio realizado, classificando o resultado como muito bom de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Tabela 18 – Resistência à compressão média.

Concreto	28 Dias			90 Dias			180 Dias		
	f_{cm} (MPa)	σ	CV (%)	f_{cm} (MPa)	σ	CV (%)	f_{cm} (MPa)	σ	CV (%)
Referência	38,20	1,32	3,45	46,97	1,20	2,55	49,84	0,22	0,44
BLA 5	39,05	1,54	3,93	47,43	1,79	3,78	50,16	0,15	0,29
BLA 10	44,40	0,85	1,91	47,50	1,15	2,43	52,91	1,77	3,34
BLA 15	45,13	0,81	1,71	50,05	0,58	1,15	55,06	0,55	1,00

Notas: f_{cm} – Resistência à compressão (MPa)

σ – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação, resultado da divisão do desvio padrão pela média

Fonte: Autor.

A partir da Tabela 18, foi elaborado o gráfico com as médias de resistência à compressão (f_{cm}), apresentado na Figura 34. Observa-se que a substituição parcial do cimento por BLA proporcionou possíveis benefícios aos concretos estudados, resultando em aumento da resistência à compressão. Esse efeito foi particularmente

evidente nos teores mais elevados de substituição. Por outro lado, com a substituição de 5% do cimento por BLA, não foi constatada alteração significativa na resistência à compressão.

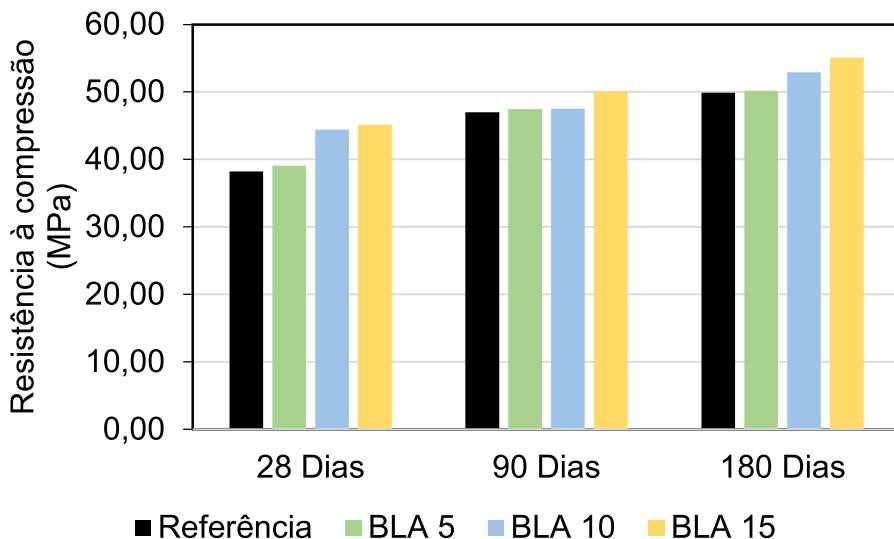


Figura 34 – Resistência à compressão média.

Fonte: Autor.

A substituição parcial do cimento por BLA nos teores de 10 e 15 % resultou em aumentos na resistência à compressão de 16,23 % e 18,15 %, respectivamente, aos 28 dias. Da mesma forma, aos 180 dias, os incrementos foram de 6,14 % e 10,46 %, respectivamente. Destaca-se ainda que a utilização da BLA proporcionou notáveis ganhos de resistência à compressão do 28º ao 180º dia, com o concreto BLA 15 apresentando um aumento expressivo de 22 %.

A substituição parcial do cimento por BLA não teve como principal objetivo o ganho de resistência mecânica. O foco dessa substituição foi aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado, como evidenciado pelos ensaios de absorção de água por capilaridade e coeficiente de difusão de cloretos, realizados conforme as normas NT Build 492 e UNE 83987, com os resultados apresentados nos itens 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4. Além disso, buscou-se alcançar esse objetivo sem perdas significativas na resistência à compressão.

De modo geral, a substituição parcial do cimento por adições minerais visa principalmente aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado. No entanto, na presente pesquisa, verificou-se que, além de reduzir a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de difusão de cloretos, o uso da

BLA também resultou em ganhos de resistência mecânica, ampliando os benefícios esperados dessa substituição.

Sell Junior *et al.* (2021) analisaram a influência da substituição parcial do cimento por sílica ativa no concreto, observando um aumento nesta propriedade de 12,15 % e 17,86 % para substituições com teores de 10 % e 20 %, respectivamente, aos 28 dias. Já Wally *et al.* (2021) examinaram a utilização de metacaulim em substituição parcial ao cimento, constatando um aumento na resistência à compressão de 0,53 % e 5,97 % para teores de substituição de 10 % e 20 %, respectivamente.

No contexto deste estudo, foram constatadas porcentagens mais expressivas de aumento na resistência à compressão em comparação com os estudos mencionados, evidenciando, assim, o bom desempenho da BLA em relação às adições minerais já consolidadas no mercado.

4.2.2 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade no concreto ocorre quando o concreto seco entra em contato direto com a água, que é absorvida devido à ação capilar, resultante das forças de adesão entre as moléculas de água e as paredes dos poros do concreto. Embora esse fenômeno não reflita diretamente a resistência do concreto à penetração de íons agressivos, como nos ensaios de difusão de cloreto ou carbonatação, a absorção capilar de água é amplamente considerada um indicador da durabilidade do concreto. Isso se deve ao fato de que os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade podem ser correlacionados com parâmetros importantes, como a taxa de carbonatação, permeabilidade e difusão de gases (ALDERETE *et al.*, 2020; VILLAGRÁN-ZACCARDI *et al.*, 2022)

Os resultados médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade são apresentados na Tabela 19 e na Figura 35, destacando os benefícios proporcionados pela substituição parcial do cimento por BLA no concreto. A substituição demonstrou uma redução na absorção de água por capilaridade em comparação com o concreto de referência em todos os períodos analisados e para as diferentes porcentagens de substituição. À medida que os teores de substituição foram aumentados, observou-se uma diminuição correspondente na absorção de água por capilaridade.

Tabela 19 – Ensaio absorção de água por capilaridade média.

Concreto	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)				
	3h	6h	24h	48h	72h
Referência	0,15	0,20	0,52	0,76	0,91
BLA 5	0,14	0,19	0,47	0,65	0,79
BLA 10	0,12	0,16	0,42	0,57	0,68
BLA 15	0,10	0,14	0,40	0,49	0,59

Fonte: Autor.

Os benefícios oferecidos pela BLA podem ser atribuídos à sua natureza pozolânica de alta reatividade. Este material contribui para a redução dos poros no concreto devido à ocorrência de reações pozolânicas durante a fase de hidratação do cimento, gerando uma quantidade adicional de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), o principal componente de cimentação. Dessa forma, o material pozolânico reduz a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e aumenta a quantidade de C-S-H. A diminuição na porosidade e na absorção capilar também ocorre devido à densificação da pasta, causada pelo efeito microfiler.

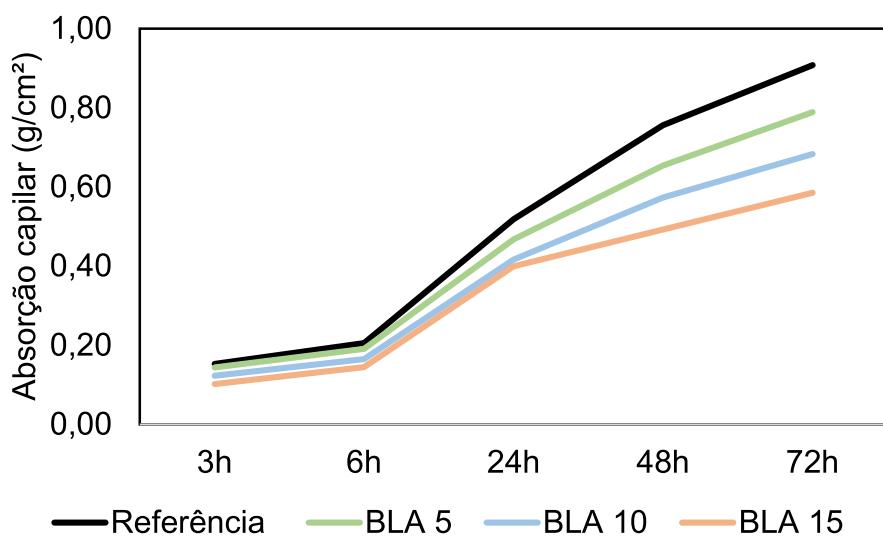


Figura 35 – Ensaio Absorção de água por capilaridade.

Fonte: Autor.

Na Figura 36, apresenta-se um gráfico exibindo os percentuais de alteração na absorção de água por capilaridade dos diferentes tipos de concretos estudados em comparação com o concreto de referência, ao final do ensaio. Assim, foi possível quantificar os benefícios decorrentes da substituição parcial do cimento por BLA na absorção de água por capilaridade. Observa-se que as reduções na absorção de água

por capilaridade foram de 35,51 %, 24,77 % e 13,08 % para substituições de 15 %, 10 % e 5 %, respectivamente. Os resultados obtidos podem ser considerados semelhantes aos verificados por Onikeku *et al.* (2019), que constataram uma redução na absorção de água por capilaridade de 42,95 % ao realizar a substituição parcial de cimento por BLA em teores de 10 %.

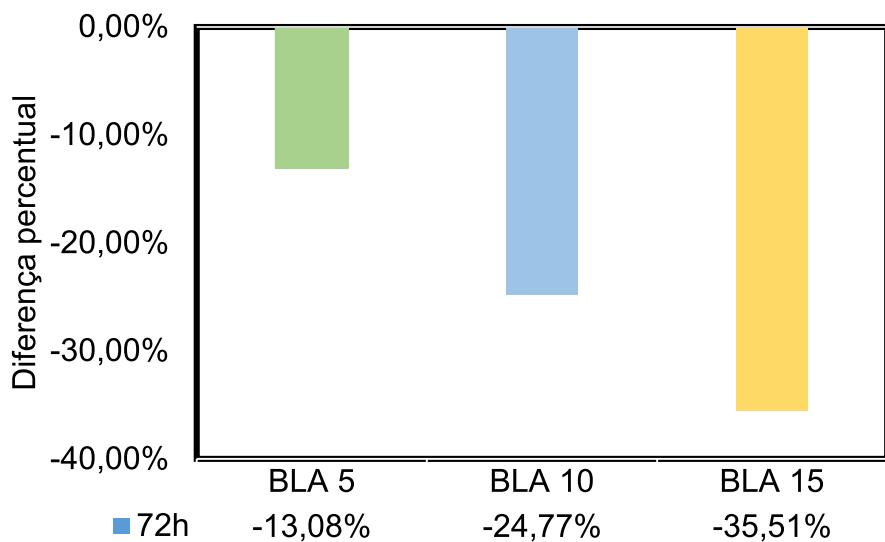


Figura 36 - Alteração da absorção de água por capilaridade em relação concreto de referência ao final do ensaio.

Fonte: Autor.

No estudo conduzido por Sell Junior *et al.* (2021), a substituição parcial de cimento por sílica ativa em teores de 20 % resultou em uma significativa redução de 21,03 % na absorção de água por capilaridade. Em paralelo, a pesquisa de Wally *et al.* (2021) analisou a influência da substituição parcial do cimento por metacaulim, constatando uma redução de 4,06 % na absorção de água por capilaridade com a substituição em teores de 20 %. Desta forma, é possível constatar que a BLA proporcionou reduções mais expressivas na absorção de água por capilaridade em comparação com os materiais mencionados, os quais têm ampla aplicação na construção civil.

4.2.3 Coeficiente de migração de cloretos no concreto – NT Build 492

Os valores de D_{nssm} , obtidos por meio do método da NT Build 492 (1999) aos 28 e 90 dias, são apresentados na Tabela 20 e na Figura 37, juntamente com a

classificação quanto à penetração de cloreto aos 90 dias, conforme proposto por Nilsson, Ngo e Gjørv (1995). Observa-se que a substituição parcial do cimento por BLA resultou em uma redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto nas idades analisadas. À medida que houve aumento nos teores de substituição, verificou-se uma redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto. Além disso, a atividade pozolânica da BLA contribui para a diminuição do coeficiente de difusão de cloretos no concreto dos 28 para os 90 dias de idade.

Tabela 20 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm}) obtido através do método de teste NT Build 492.

Concreto	$D_{nssm} (x10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ aos 28 dias	$D_{nssm} (x10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ aos 90 dias	Classificação quanto a penetração de cloretos
Referência	10,69	8,51	Baixa
BLA 5	7,83	5,28	Baixa
BLA 10	6,76	2,92	Muito baixa
BLA 15	5,33	2,45	Desprezível

Fonte: Autor.

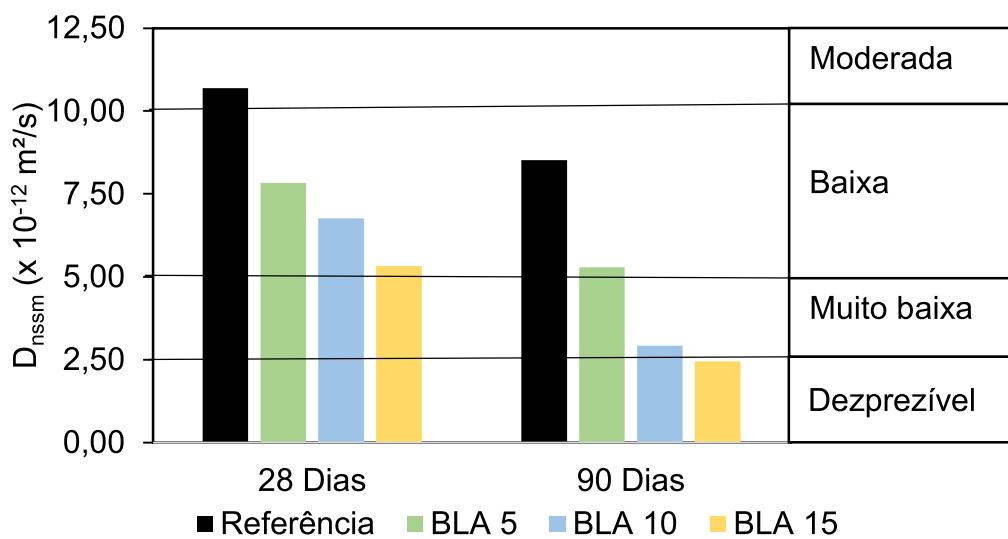


Figura 37 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{nssm}) pelo método da NT Build 492.
Fonte: Autor.

A substituição do cimento por BLA nos teores de 5, 10, e 15 % proporcionou uma notável redução no coeficiente de difusão de cloretos no concreto, atingindo reduções de 26,72 %, 36,72 %, e 50,14 % aos 28 dias, e 37,98 %, 65,72 %, e 71,22 % aos 90 dias, respectivamente. Destaca-se ainda uma redução expressiva de 54 % no coeficiente de difusão de cloretos no concreto com um teor de substituição de 15 % ao longo do período de 28 a 90 dias de idade. Isso evidencia o efeito dos materiais

pozolânicos, como o BLA, quando usados em substituição parcial ao cimento, por exercerem tanto efeitos físicos quanto químicos, resultando em uma redução significativa nos coeficientes de difusão do concreto. Esse desempenho comprova a eficácia das partículas de BLA no refino da matriz cimentícia e na melhoria da zona de transição interfacial entre a pasta de cimento e os agregados.

Além disso, a formação de silicatos de cálcio hidratados, originada pela reação pozolânica, preenche os poros e aprimora a microestrutura do concreto contendo BLA. Esses efeitos, proporcionados pelas cinzas das folhas de bambu, criam barreiras que dificultam a penetração de cloretos. As adições pozolânicas também contribuem para o aumento da resistividade elétrica do concreto, reduzindo a condução iônica. Portanto, a atividade pozolânica do BLA é reafirmada, com os efeitos mais significativos observados em idades mais avançadas, quando uma parcela substancial das reações pozolânicas já ocorreu.

Wally *et al.* (2021) realizaram a determinação do coeficiente de difusão de cloretos no concreto utilizando o método da NT Build 492, ao realizar a substituição parcial do cimento por sílica ativa e metacaulim aos 90 dias. Eles constataram reduções significativas no coeficiente de difusão de cloretos no concreto, sendo de 50,69 %, 68,23 %, e 90,49 % ao substituir o cimento pelos teores de 5, 10 e 20 % de sílica ativa, respectivamente. Já com a utilização de metacaulim, as reduções foram de 24,75 %, 66,19 %, e 77,99 % para substituições nos teores de 5, 10 e 20 %, respectivamente. Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os de Wally *et al.* (2021), verifica-se que a BLA apresenta porcentagens de redução do coeficiente de difusão ligeiramente inferiores à sílica ativa, mas resultados semelhantes aos do metacaulim.

4.2.4 Ensaio acelerado de migração de cloretos no concreto - multiregime - UNE 83987

Os valores obtidos para o coeficiente de difusão em estado estacionário e não estacionário, por meio do método multiregime da UNE 83987 (2012), são apresentados nas Tabelas 21 e 22 para as idades de 28 e 90 dias, respectivamente. A classificação em relação à resistência à penetração de cloretos também é apresentada, sendo importante observar que esta classificação foi realizada considerando exclusivamente os valores de D_{ns} . Essa abordagem decorre da origem

da classificação proposta por Nilsson, Ngo e Gjørv (1995), a qual foi inicialmente concebida para se relacionar a coeficientes de difusão em estado não estacionário. Sendo possível observar que os resultados obtidos nesta análise de D_{ns} são semelhantes aos resultados de D_{nssm} obtidos por meio da NT Build 492 (1999).

Tabela 21 - Coeficientes de difusão de cloreto (estado estacionário e não estacionário) obtidos através do método de ensaio UNE 83987 aos 28 dias.

Concreto	Time-lag (h)	Fluxo de íons ($\times 10^{-10}$ mol/(cm ² .s))	D_s ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	D_{ns} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Resistência à penetração de cloreto (D_{ns})
Referência	103	5,57	1,06	10,20	Moderada
BLA 5	150	4,64	0,89	7,02	Baixa
BLA 10	168	3,81	0,73	6,27	Baixa
BLA 15	215	1,49	0,54	4,90	Muito baixa

Fonte: Autor.

Tabela 22 - Coeficientes de difusão de cloreto (estado estacionário e não estacionário) obtidos através do método de ensaio UNE 83987 aos 90 dias.

Concreto	Time-lag (h)	Fluxo de íons ($\times 10^{-10}$ mol/(cm ² .s))	D_s ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	D_{ns} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Resistência à penetração de cloreto (D_{ns})
Referência	170	0,27	0,99	6,19	Baixa
BLA 5	215	0,22	0,79	4,90	Muito baixa
BLA 10	405	0,17	0,63	2,60	Muito baixa
BLA 15	490	0,14	0,50	2,15	Desprezível

Fonte: Autor.

A substituição parcial do cimento por BLA resultou em notáveis alterações nos concretos analisados. A elevação dos níveis de substituição ocasionou um aumento no Time-lag, contribuindo para a redução do fluxo de íons no concreto (JC). Essa alteração, por sua vez, resultou em quedas significativas nos coeficientes de difusão em estado estacionário (D_s) de 16,67 %, 31,68 % e 48,93 % aos 28 dias, e 37,70 %, 35,64 % e 49,37 % aos 90 dias, para taxas de substituição de 5, 10 e 15 %, respectivamente. Este fenômeno indica um atraso na penetração dos íons cloreto, evidenciando-se como uma extensão do tempo necessário para o início do regime de difusão estacionária. Consequentemente, essa modificação resulta em uma maior durabilidade do concreto.

Essa resposta está intrinsecamente ligada às modificações nas propriedades físicas, como a redução da porosidade, e nas características microestruturais, incluindo o refinamento da rede porosa, além das reações pozolânicas induzidas pela substituição parcial do cimento por BLA no concreto. Notavelmente, quanto maior o

teor de BLA, maior é o tempo necessário para a difusão dos íons cloreto atingir o estado estacionário. Esse efeito se reflete na redução dos valores dos coeficientes de difusão em estado não estacionário (D_{ns}) em 31,33 %, 38,69 % e 52,09 % aos 28 dias e 20,93 %, 58,02 % e 65,31 % aos 90 dias, para os corpos de prova com substituição parcial do cimento por BLA em teores de 5, 10 e 15 %, respectivamente, como apresentado na Figura 38.

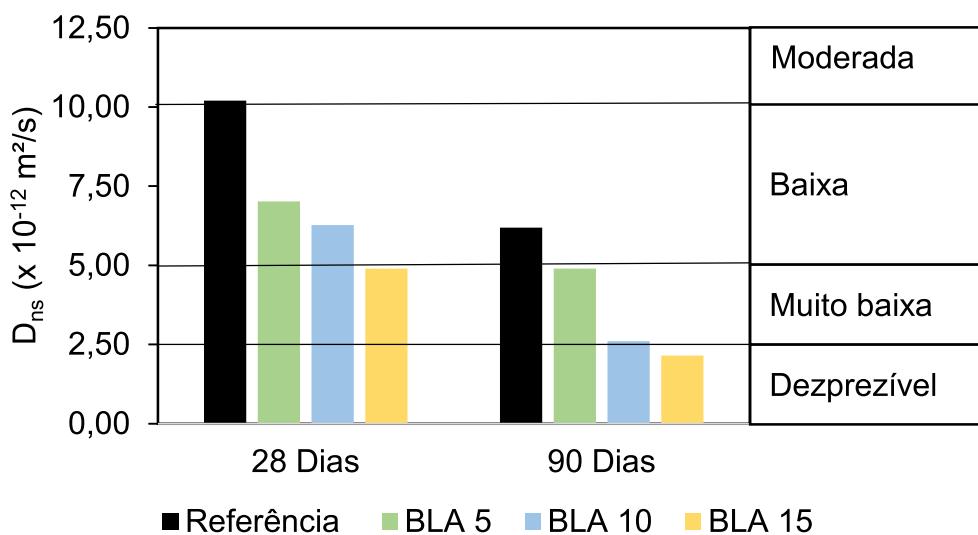


Figura 38 - Coeficiente de difusão em estado não estacionário (D_{ns}) obtido através do método de teste UNE 83987.

Fonte: Autor.

A diminuição nos coeficientes de difusão e a correspondente melhoria na resistência à penetração de cloretos pela substituição por BLA estão diretamente relacionadas à redução na interconectividade dos poros, resultante dos efeitos físicos da adição de BLA e da reação pozolânica. Esses resultados apontam para a eficácia da BLA na promoção da durabilidade do concreto, especialmente em relação à resistência à penetração de íons cloreto.

De forma geral, nota-se que o aumento do teor de BLA melhorou a resistência do concreto à penetração de cloretos nas duas idades de realização do método de ensaio Multiregime da UNE 83987 (2012). Estes resultados estão alinhados com os obtidos em outros ensaios realizados neste trabalho, onde foram observados aumentos na resistência à compressão e reduções na absorção de água e penetração de cloretos pelo método da NT Build 492 (1999).

4.2.5 Correlação entre os coeficientes de migração em estado não estacionário

A Figura 39 apresenta as correlações entre os dois métodos de determinação do coeficiente de migração de cloretos em estado não estacionário obtidos neste estudo, nomeadamente, D_{ns} e D_{nssm} . Verifica-se uma forte correlação entre os coeficientes de estado não estacionário obtidos, com $R^2 = 0,9942$ aos 28 dias e $R^2 = 0,9532$ aos 91 dias. Vale ressaltar que o método de ensaio Multiregime oferece uma ampla gama de informações sobre as propriedades do concreto relacionadas à penetração de cloretos, incluindo Time-lag, fluxo de íons no concreto, D_s e D_{ns} . No entanto, este método pode demandar algumas semanas para ser concluído em certos casos. Por outro lado, o ensaio da NT Build 492 (1999) é um método que pode ser realizado de forma relativamente rápida, não exigindo períodos superiores a 96 horas, o que contribui para sua aplicação no controle de qualidade do concreto.

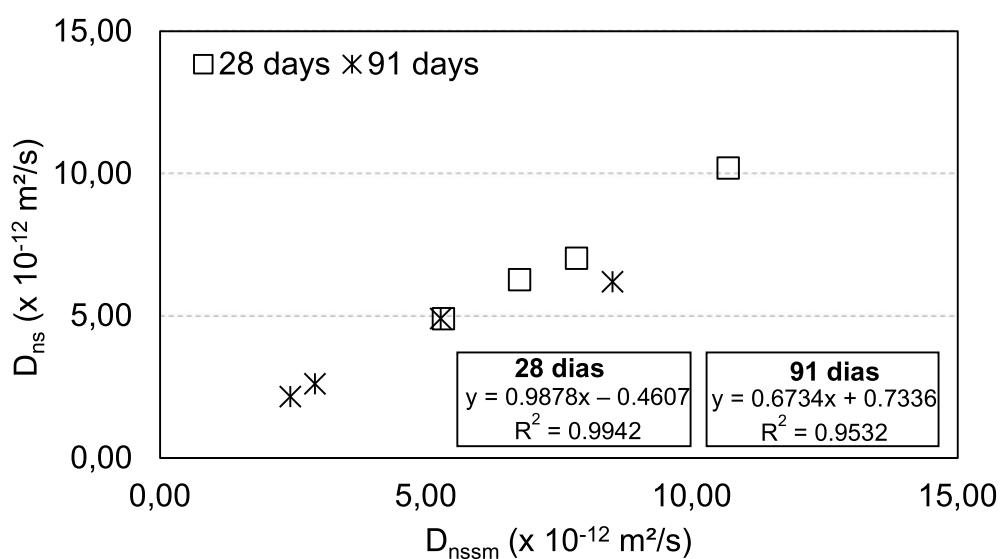


Figura 39 – Correlação entre os coeficientes de migração em estado não estacionário obtidos através dos testes Multiregime (D_{ns}) e NT Build 492 (D_{nssm}).

Fonte: Autor.

5 Conclusões

No presente estudo, realizou-se a produção de cinza a partir das folhas de bambu da espécie *Bambusa tuldaoides*, submetendo-as a diferentes temperaturas de calcinação (500, 600, 700, 900 e 1000 °C). Além disso, procedeu-se à caracterização minuciosa das cinzas resultantes. Posteriormente, a condição de produção que demonstrou o desempenho mais promissor na caracterização foi escolhida para substituir parcialmente o cimento em corpos de prova de concreto, em percentuais de 5, 10 e 15 %.

A avaliação desses corpos de prova de concreto foi conduzida por meio de ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, e coeficiente de difusão de cloretos no concreto, utilizando os procedimentos estabelecidos pela NT Build 492 (1999) e UNE 83987 (2012). Dessa forma, este trabalho se dedicou a investigar o comportamento da cinza de folha de bambu desde sua produção até a sua utilização como substituto parcial do cimento no concreto, analisando sua influência nos resultados obtidos nos ensaios mencionados.

5.1 Principais conclusões

Diante dos resultados obtidos nas análises realizadas na caracterização da cinza de folha de bambu e nos ensaios em corpos de prova de concreto com substituição parcial do cimento por BLA, considerando as limitações inerentes a este estudo, foi possível observar as seguintes influências do material estudado:

- A temperatura de calcinação não exerceu influência significativa na massa específica da cinza de folha de bambu, indicando que essa propriedade permaneceu praticamente inalterada com a variação da temperatura de calcinação.
- Na análise da composição química da BLA por meio de fluorescência de raio X, todas as temperaturas de calcinação atenderam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), apresentando teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ superiores a 50 %. A temperatura de calcinação a 900 °C obteve o maior nível de pozolanicidade com 59,06 %, seguido da temperatura de 600 °C com teor de 54,16 %. É relevante destacar que as BLAs são predominantemente compostas por Sílica (SiO_2).
- A difração de raios-X indicou que as temperaturas de calcinação de 500, 600 e 700 °C possuem estrutura amorfa, com a BLA calcinada a 600 °C alcançando o maior

nível de amorfismo, com 86,56 %. Já as cinzas calcinadas a 900 e 1000 °C apresentaram comportamento cristalino.

- Apesar da temperatura de calcinação de 900 °C ter apresentado o mais elevado nível de pozolanicidade em sua composição química, foi descartada do restante da pesquisa devido à cristalinidade do material, o que comprometeria sua atividade pozolânica. A temperatura de calcinação de 1000 °C também foi descartada pelos mesmos motivos.

- As análises termogravimétricas (TG) demonstraram que as BLAs calcinadas a 500, 600 e 700 °C possuem uma quantidade significativa de voláteis em sua composição. A elevação da temperatura de calcinação eliminaria esses voláteis, mas levaria a cinza a possuir estrutura cristalina.

- Nos índices de atividade pozolânica (IAP) com cal e com cimento, as BLAs calcinadas a 500, 600 e 700 °C atenderam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), evidenciando atividade pozolânica nas cinzas calcinadas nessas temperaturas. A BLA calcinada a 600 °C apresentou o melhor desempenho, obtendo 6,80 MPa de resistência à compressão no IAP com cal e índice 131,15 % no IAP com cimento.

- Utilizando o método de Chapelle Modificado, as temperaturas de calcinação de 500, 600 e 700 °C apresentaram teores expressivos de cal fixado, indicando boa reatividade do material nessas temperaturas, com a BLA calcinada a 600 °C obtendo o melhor desempenho com 907,3680 mg Ca(OH)₂/g de adição.

- Com base nas análises e resultados obtidos na caracterização das cinzas de folha de bambu produzidas com diferentes temperaturas de calcinação, foi constatado que a cinza calcinada a 600 °C e com tempo de moagem de 4 horas apresentou o melhor desempenho nas condições de produção analisadas nesta pesquisa, sendo um material pozolânico composto predominantemente por sílica (SiO₂) amorfica.

- Quanto à substituição parcial do cimento por BLA, observou-se uma diminuição dos poros no concreto devido à ação pozolânica e ao efeito filler proporcionado pela cinza. Isso resultou em redução na absorção de água por capilaridade e no coeficiente de difusão de cloreto no concreto, à medida que os teores de substituição foram aumentados. Houve, ainda, incremento na resistência mecânica com o aumento dos teores de substituição.

- Na substituição parcial do cimento por BLA, observou-se a necessidade de utilizar uma quantidade maior de aditivo superplastificante para alcançar a

trabalhabilidade desejada (slump). À medida que os percentuais de substituição aumentaram, foi necessário aumentar ainda mais a quantidade de aditivo consumido.

- A substituição parcial do cimento por 15 % de BLA apresentou o melhor desempenho na resistência à compressão, com ganho de 18,15 % aos 28 dias. Devido aos efeitos pozolanicos da cinza, esse mesmo teor de substituição proporcionou aumento na resistência à compressão de 22 % dos 28 aos 180 dias.

- A absorção de água por capilaridade foi reduzida em 35,51 % com a substituição parcial do cimento por 15 % de BLA, sendo este o teor de substituição que proporcionou a maior redução nesta propriedade.

- No teste rápido de migração de cloretos (D_{nssm}), foi evidenciada uma redução significativa do coeficiente de difusão de cloretos no concreto com a substituição parcial do cimento por BLA. A substituição em um teor de 15 % proporcionou o melhor desempenho, resultando em uma redução de 50,14 % aos 28 dias e 71,22 % aos 90 dias. Este resultado evidencia a eficácia da BLA em mitigar a migração de cloretos, contribuindo para a durabilidade e desempenho a longo prazo do concreto.

- No teste multiregime da UNE 83987 (2012), o coeficiente de difusão de cloretos diminuiu com o aumento dos teores de BLA em substituição parcial ao cimento, tanto em regime não estacionário (D_s) quanto estacionário (D_{ns}). A substituição do cimento por BLA induziu um retardamento no *time-lag*, causando uma redução no fluxo de íons e, consequentemente, retardando a penetração de cloretos no concreto. A substituição do cimento por BLA em um teor de 15 % resultou em uma redução de 49,93 % no D_s e 52,09 % no D_{ns} . Esses resultados destacam o impacto positivo da incorporação de BLA na resistência do concreto à migração de cloretos em diferentes condições de teste.

- O aumento do teor de BLA resultou na redução da penetração de cloreto no concreto de acordo com ambos os métodos de teste realizados. Embora as reduções nos coeficientes de estado não estacionário estejam relacionadas ao maior intervalo de tempo fornecido pelo BLA, as reduções nos coeficientes de estado estacionário refletem a menor porosidade do concreto gerada pelas cinzas de bambu.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, torna-se evidente que a folha de bambu, quando devidamente calcinada a uma temperatura apropriada e finamente moída, apresenta propriedades altamente vantajosas para sua utilização como material cimentício suplementar no concreto. Essa abordagem não apenas promove

melhorias nas propriedades mecânicas, mas também contribui para a durabilidade do material.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

No desenvolvimento desta pesquisa, surgiram aspectos que podem ser explorados, mas devido às limitações do programa experimental e ao tempo disponível, não foi possível abranger todos eles. Portanto, apresentam-se sugestões para a ampliação e continuação do estudo:

- Avaliar a produção de cinza de folha de bambu utilizando outras espécies de bambu, visando compreender possíveis variações nas propriedades em função da diversidade das matérias-primas.
- Explorar a calcinação das folhas de bambu utilizando diferentes temperaturas, a fim de expandir a variedade de condições térmicas e compreender melhor a influência dessa variável nas propriedades da cinza.
- Utilizar diferentes métodos de análise para caracterizar o material, buscando um entendimento mais aprofundado em relação ao comportamento da BLA e suas propriedades.
- Adotar dosagens com maiores teores substituição do cimento por BLA. Em níveis similares aos utilizados em cimentos pozolanicos.
- Avaliar a durabilidade do concreto diante da ação de outros agentes deletérios, como a carbonatação e o ataque por sulfatos, expandindo assim a compreensão dos efeitos da BLA em diferentes condições ambientais.
- Ampliar o número de ensaios das metodologias estudadas, de modo a avaliar a dispersão dos resultados nos métodos normatizados, proporcionando uma análise mais robusta e abrangente das propriedades da BLA em diferentes situações experimentais.

Referências

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

AÏTCIN, P.C. Portland cement. In: **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing, p. 27-51, 2016.

ALDERETE, Natalia Mariel; ZACCARDI, YA Villagrán; DE BELIE, Nele. Mechanism of long-term capillary water uptake in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, p. 103448, 2020.

ALEXANDER, Mark Gavin; BEUSHAUSEN, Hans. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 17-29, 2019.

ALEXANDER, Mark Gavin. Service life design and modelling of concrete structures—background, developments, and implementation. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 3, p. 224-245, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. 2017.

_____. **ASTM G106 - Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements**. 2015.

ANDRADE. C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742. 1993.

ANDRADE NETO, José da Silva; FRANÇA, Mavisson Júlio Santos; AMORIM JUNIOR, Nilson Santana; RIBEIRA, Daniel Véras. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and building materials**, v. 266, p. 120959, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Redução na emissão de CO₂ é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento**. Acessado em novembro de 2020. Disponível em < <https://abcp.org.br/imprensa/reducao-na-emissao-de-co2-e-sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento/>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **ABNT NBR 5738: Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 5751: Materiais pozolânicos-Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 5752: Materiais pozolânicos—determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. ABNT, Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. ABNT, Rio de Janeiro, 2023.

ABNT NBR 7211: Agregados para concreto-Especificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

ABNT NBR 7215: Cimento portland: Determinação da resistência à compressão. ABNT, Rio de Janeiro, 2019.

ABNT NBR 7525: Contentor flexível - Determinação da resistência à queda operacional. ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos-Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR: 12653: Materiais pozolânicos-Requisitos. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica. ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento e aceitação. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. ABNT, Rio de Janeiro, 2020.

ABNT NBR 16916: NBR16916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ABNT NBR 16917: NBR16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ABNT NBR 16972: NBR16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ABNR NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

ASHA, P.; SALMAN, A.; KUMAR, R. Arun. Experimental study on concrete with bamboo leaf ash. **Int J Eng Adv Technol**, v. 3, n. 6, p. 46-51, 2014.

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

BAGHERI, Alireza; ZANGANEH, Hamed; ALIZADEH, Hadi; SHAKERINIA, Mohammad; MARIAN Mohammad Ali Seifi. Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. **Construction and building materials**, v. 47, p. 1402-1408, 2013.

BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de Construção**, 1. 5.ed. revisada. 488 p. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BERNAL, Cláudia; COUTO, Andréa Boldarini; BREVIGLIERI, Susete Trazzi; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais-DSC. **Química Nova**, v. 25, p. 849-855, 2002.

BERTOLINI, Luca; ELSENER, Bernhard; PEDEFERRI, Pietro; POLDER, Rob. **Corrosion of steel in concrete**. Weinheim, Germany: Wiley-Vch, 2013.

BEUSHAUSEN, Hans; TORRENT, Roberto; ALEXANDER, Mark G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 11-20, 2019.

BROOMFIELD, John P. **Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair**. 2 nd edition. CRC Press, 2003.

BOLTE, Gerd; ZAJAC, Maciej; SKOCEK, Jan, HAHA, Mohsen Ben. Development of composite cements characterized by low environmental footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 503-514, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.050>.

BUILD, Nord Test. **492 - Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments**. 1999.

CAROLINO, A. S. **Estimativa do percentual de cristalinidade de polímeros semicristalinos derivados da anilina através dos padrões de difração de Raios x**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

CLAISSE, Peter. Transport properties of concrete. **Concrete International**, v. 27, n. 1, p. 43-48, 2005.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. Estudo da influência de cimentos na fluência em concretos para a construção civil. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, p. 98-104, 2006.

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

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

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro; PAES, Isaura de Nazaré Pinheiro; SOUZA, Paulo Sérgio Lima; AZEVEDO, Caroline Menezes. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 45-55, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000100292>.

COSTA, António; APPLETON, Júlio. Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 46, p. 3-13, 2007.

COSTA, Heloína Nogueira; ARGONZ, Raquel; CABRAL, Antônio Eduardo Bezerra; FERREIRA, Ricardo Emílio. Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais. **Ambiente Construído**, v. 23, p. 203-223, 2023.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1975. 414p.

DA SILVA, Amanda Fernandes Pereira; ANDRADE, Danilo Teixeira Mascarenhas de; RIOS, Nelson Agapito Brandão; Nascimento, Laécio Guedes do. Concrete performance with addition of bamboo ash. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e309996755-e309996755, 2020.

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

DARWIN, David; DOLAN, Charles William; NILSON, Arthur H. **Design of concrete structures**. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

DHINAKARAN, G.; GANGAVA, Hari Chandana. Compressive strength and durability of bamboo leaf ash concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 3, 2016.

DONG, B., LI, G., ZHANG, J., LIU, Y., XING, F., HONG, S. Non-destructive tracing on hydration feature of slag blended cement with electrochemical method. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 467-473, 2017.

DRUMOND, Patrícia Maria; WIEDMAN, Guilherme. **Bambus do Brasil: da biologia à tecnologia**. 1 ed. ICH. Rio de Janeiro, 2017.

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. Doi: <https://doi.org/10.5897/IJPS.9000022>.

ERNESTO, V.C., EDUARDO, V.M., SERGIO, F.S., HOLMER, S., GONEN, T., AND YAZICIOGLU, S. The influence of mineral admixtures on the short- and long-term performance of concrete. **Building and Environment**, 42, 3080-3085, 2007.

FANTON, Tássia. **Proposta de método de ensaio acelerado para a determinação do coeficiente de difusão de íons cloreto em concretos na condição saturada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2017.

FIGUEIREDO, Enio P.; MEIRA, Gibson R. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. México: **Boletim técnico ALCONPAT Internacional**, v. 6, 2013.

FRÍAS, Moisés; SAVASTANO, Holmer; VILLAR, Ernesto; ROJAS, M. Isabel Sánchez de; SANTOS, Sergio. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 9, p. 1019-1023, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.005>.

GENTIL, V. **Corrosão**, 3º Edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

Global Cement and Concrete Association. **Cement Sustainability Initiative Getting the Numbers Right Project Emissions Report 2018**. Acessado em novembro de 2020. Disponível em <<https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>>.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo, oficina de textos, 2015.

GONÇALVES, Diva. Bambu é alternativa de renda na produção familiar. Agricultura familiar Biotecnologia e biossegurança Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação. Embrapa Acre. 15 de maio de 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/34230725/bambu-e-alternativa-de-renda-na-producao-familiar>. Acessado em: 09/07/2023.

GUIGNONE, Guilherme Cunha; VIEIRA, Geilma Lima; ZULCÃO, Robson; DEGEN, Maxwell Klein; MITTRI, Sérgio Hémerson de Moraes; BAPTISTA, Gercyr. Incorporation of glass powder and metakaolin as cement partial replacement to improve concrete mechanical properties and increase service life. **Journal of Composite Materials**, v. 54, n. 21, p. 2965-2983, 2020.

HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of concrete Research**, v. 41, n.147, p. 51-61, 1989.

HAMADA, Hussein M.; ABDULHALEEM, Khamees N; MAJID, Ali; JAWAHERY, Mohammed S.; THOMAS, Blessen Skariah; YOUSIF, Salim T. The durability of concrete produced from pozzolan materials as a partially cement replacement: A comprehensive review. **Materials Today: Proceedings**, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.337>

Hasan, K., Karim, A., Islam, M.T. et al. A review of the mechanical properties and durability of concrete containing recycled seashells as a partial cement replacement. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 25, n. 6, p. 3192-3216, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01795-5>

HASHOLT, Marianne Tange; JENSEN, Ole Mejlhede. Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 290-297, 2015.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese de doutorado em engenharia da construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993. 231 p.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 edição. São Paulo-SP, editora PINI, 1993.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In **IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções**. Anais. Porto Alegre, RS, 1997.

HO, D.W.S. **Durability of concrete**. The civil engineering handbook, 2003.

JERÔNIMO, Valdith Lopes. **Estudo da durabilidade de concretos com adição de resíduos da indústria de cerâmica vermelha com foco na corrosão de armaduras**. 2014. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HOPPE FILHO, Juarez; GOBBI, Andressa; PEREIRA, Eduardo; QUARCIONI, Valdecir Angelo; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017. a

HOPPE FILHO, Juarez; GOBBI, Andressa; PEREIRA, Eduardo; TANAKA, Rodrigo Satoshi; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte II): Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, p. e11873, 2017. b

ISMAIL, Idawati; BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L.; NICOLAS, R.S., BRICE, D.G., KILCULLEN, A.R., HAMDAN, S.; VAN DEVENTER, J.S.J. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1187-1201, 2013.

JAISWAL, Sanjay S.; PICKA, J.D.; IGUSA, T.; KARR, A.F.; SHAH, S.P.; ANKENMAN, B.E.; STYER, P. Statistical studies of the conductivity of concrete using ASTM C1202-94. **Concrete Science and Engineering**, v. 2, n. 6, p. 97-105, 2000.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, MG da. **Cinzas e aglomerantes alternativos**. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas: Unicamp, p. 145-190, 2003.

JULIO-BETANCOURT, G. A.; HOOTON, R. D. Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 6, p. 1007-1015, 2004.

KOLAWOLE, John Temitope; OLUSOLA, Kolapo Olubunmi. Compressive strength characteristics of bamboo leaf ash blended cement concrete. **Knowledge Exchange for Young Scientists (KEYS)**, v. 83, 2015.

KNIGHT, Kelli A.; CUNNINGHAM, Patrick R.; MILLER, Sabbie A. Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 139, p. 105049, 2023.

LI, Kefei; ZHANG, Dongdong; LI, Quanwang; FAN, Zhihong. Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 545-558, 2019.

LIANG, M. T.; WANG, K. L.; LIANG, C. H. Service life prediction of reinforced concrete structures. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 9, p. 1411-1418, 1999.

LING, Hao; QIAN, Chunxiang; KANG, Wence; LIANG, Chengyao; CHEN; Huaicheng. Combination of Support Vector Machine and K-Fold cross validation to predict compressive strength of concrete in marine environment. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 355-363, 2019.

LIU, Yanbo; PRESUEL-MORENO, F. A Study on the Correlation between Concrete Electrical Resistivity and Chloride Migration Coefficients. In: **The Seventh International Conference 15 on concrete under Severe Conditions-Environment and Loading**. 2013.

LU, Zhongyu; SU, Lizhu; XIAN, Guijun, Lu, Baihang; XIE, Jianhe. Durability study of concrete-covered basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars in marine environment. **Composite Structures**, v. 234, p. 111650, 2020.

MACKECHNIE, J. R.; ALEXANDER, M. G. Repair principles for corrosion-damaged reinforced concrete structures. **Research monograph**, v. 5, 2001.

MEDEIROS, M.H.F.; ROCHA, F.C.; MEDEIROS JUNIOR, R.A.; HELENE, P.R.L. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864-885, 2017.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concrete microstructure, properties and materials**. 2017.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de Armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. IFPB. João Pessoa, 2017.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloreto em concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 4, p. 223-248, 2019.

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

MONTEIRO, Paulo J.M.; MILLER, Sabbie A.; HORVATH, Arpad. Towards sustainable concrete. **Nature materials**, v. 16, n. 7, p. 698-699, 2017.

MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A.M.P.; FERREIRA, M.G.S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. **Cement and Concrete Composites**. v. 25, n. 4-5, p. 491-502, 2003.

MORAES, M.J. B.; MORAES, J.C.B.; TASHIMA, M.M.; AKASAKI, J.L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 369-380, 2019.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Bookman Editora, 2013.

NGUYEN, Thanh Há; GHORBEL, Elhem; FARES, Hanaa; COUSTURE, Annelise. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. **Cement and Concrete Composites**, V. 104, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340>.

NILSSON, L., NGO, M. H., GJØRV, O. E. High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg. In **Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading**, Vol. 2, pp. 1193-1198, 1995

NITA, Clovis. **Utilização de pozolanas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. Dissertação de mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NORMA ESPAÑOLA, UNE 83987: **Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido**. Método multiregimen. Espanha, 2012.

NOUSHINI, Amin; CASTEL, Arnaud. Performance-based criteria to assess the suitability of geopolymers concrete in marine environments using modified ASTM C1202 and ASTM C1556 methods. **Materials and Structures**, v. 51, n. 6, p. 146, 2018.

OLONADE, K. A.; JAJI, M. B.; ADEKITAN, O. A. Experimental comparison of selected pozzolanic materials. **African Journal of Science, Technology, Innovation and Development**, v. 9, n. 4, p. 381-385, 2017.

ONIKEKU, Oluwaseye; SHITOTE, Stanley Muse; MWERO, John; ADEDEJI, Adeola A. Evaluation of characteristics of concrete mixed with bamboo leaf ash. **The Open Construction & Building Technology Journal**, v. 13, n. 1, 2019.

OSSORIO, Anile; LORENZO, Raydel. Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 72, p. 161-172, 2014.

OŽBOLT, J., BALABANIĆ, G.; PERIŠKIĆ, G.; KUŠTER, M. Modelling the effect of damage on transport processes in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1638-1648, 2010.

PAYÁ, Jordi; MONZÓ, José M.; BORRACHERO, María V.; VELÁZQUEZ, Sergio. Pozzolanic reaction rate of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in cement pastes. **Advances in cement research**, v. 25, n. 2, p. 112-118, 2013. Doi: <http://dx.doi.org/10.1680/adcr.11.00053>.

PILLAI, R.G.; GETTU, R.; SANTHANAM, M.; RENGARAJU, S.; DHANDAPANI, Y.; RATHNARAJAN, S.; BASAVARAJ, A.S. Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 118, p. 111-119, 2019.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Brussels: CEBELCOR, 1974. 644 p.

POURBAIX, M. **Lecciones de corrosión electroquímica**. 3. ed. Bruselas: CEBELCOR, 1987, 387 p.

RAMBO, Magale KD; FERREIRA, Márcia. Determination of cellulose crystallinity of banana residues using near infrared spectroscopy and multivariate analysis. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 26, p. 1491-1499, 2015.

RAMEZANIANPOUR, Ali A.; GHIAVAND, E.; NICKSERESHT, I.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 715-720, 2009.

RAMEZANIANPOUR, Ali A.; PILVAR, Amirreza; MAHDIKHANI, Mahdi; MOODI, Faramarz. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2472-2479, 2011.

RAVERDY M., BRIVOT F., PAILLERE A.M., DRON, R. "Appreciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires", In: **7th Int. Congr. Chem. Cem.** Paris, 1980.

RIBAS, Rodrigo Pinheiro. **Bambu: planta de grande potencial no desenvolvimento sustentável**. 2015.

RIBEIRO, Daniel Véras. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: Ribeiro, D. V. (org.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Véras. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Tese de Doutorado em Ciência dos Materiais –Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 222 f. 2010.

RIBEIRO, Daniel Véras; ABRANTES, J. C. C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: a new approach. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 98-104, 2016.

RIBEIRO, Daniel Véras; CASCUDO, Oswaldo. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. In: Ribeiro, D. V. (org.). Corrosão e degradação em estruturas de concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

RIBEIRO, Daniel Véras; LABRINCHA, João Antonio; MORELLI, Márcio Raymundo. Chloride diffusivity in red mud-ordinary Portland cement concrete determined by migration tests. **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 227-234, 2011.

RIBEIRO, Daniel Véras; SOUZA, Carlos Alberto Caldas; ABRANTES, J. C. C. Uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 8, n. 4, p. 529-546, 2015.

RIDING, Kyle A.; POOLE, J.L.; SCHINDLER, A.K.; JUENGER, M.C.G.; FOLLIARD, K.J. Simplified concrete resistivity and rapid chloride permeability test method. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 4, p. 390-394, 2008.

ROSELLÓ, Josefa et al. Microscopy characterization of silica-rich agrowastes to be used in cement binders: bamboo and sugarcane leaves. **Microscopy and Microanalysis**, v. 21, n. 5, p. 1314-1326, 2015.

SANTI, Thais. O potencial do Bambu. O papel. **Revista mensal de tecnologia em celulose e papel**. Ano LXXVI N° 4, abril de 2015.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília. Brasília – DF, 2006.

SASANIPOUR, Hossein; ASLANI, Farhad; TAHERINEZHAD, Javad. Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116598, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324>.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloreto em estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília. 161 f. Brasília, 2006.

SCHULZ, Deisinara Giane; FONTES, Andréa Maria Teixeira; BOIAGO, Nayara Parisoto; MACHADO, Adriana. Alelopatia de bambu (*Dendrocalamus giganteus* MURO). **Revista Cultivando o Saber**, v. 3, n. 3, p. 31-39, 2010.

SELL JUNIOR, Félix Krolow; WALLY, Gustavo Bosel; TEIXEIRA, Fernando Ritiéle; MAGALHÃES, Fábio Costa. Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, p. e14407, 2021.

SHI, Cajun. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 3, p. 537-545, 2004.

SILVA, Lucas Henrique Pereira; PAIVA, Fábio Friol Guedes de; TAMASHIRO, Jaqueline Roberta; KINOSHITA, Angela. Potential of bamboo leaf ash as supplementary binder materials-A systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, p. 106547, 2023.

SILVA, Lucas Henrique Pereira; TAMASHIRO, Jacqueline Roberta; ANTUNES, Patrícia Alexandra; PEREIRA, Danillo Roberto. Caracterização da cinza de forno de olaria para aplicação em cimento pozolânico. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0892>.

SILVA, Lucas Henrique Pereira; TAMASHIRO, Jacqueline Roberta; PAIVA, Fábio Friol Guedes de; SANTOS, Luis Fernando dos; TEIXEIRA, Silvio Rainho; KINOSHITA, Angela; ANTUNES, Patricia Alexandra. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102769, 2021.

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

SNELLINGS, Ruben; SURANENI, Prannoy; SKIBSTED, Jørgen. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, v. 171, p. 107199, 2023.

SONG, Guangling. Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. **Cement and concrete research**, v. 30, n. 11, p. 1723-1730, 2000.

TAFFESE, Woubishet Zewdu; SISTONEN, Esko. Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions. **Automation in Construction**, v. 77, p. 1-14, 2017.

TANG, Luping; UTGENANNT, Peter; BOUBITSAS, Dimitrios. Durability and service life prediction of reinforced concrete structures. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, v. 43, n. 10, p. 1408-1419, 2015.

TANG, S.W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 143-154, 2015.

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

TONG, L.; GJØRV, O. E. Chloride diffusivity based on migration testing. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 7, p. 973-982, 2001.

TORRES, Marco Aurélio Mata Gonçalves. **Identificação e caracterização do potencial alelopático do bambu Apoclada simplex McClure & Smith**. Dissertação de mestrado. Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo, 2015.

TREADAWAY, K. Corrosion period. In: SCHIESSL, P. (Ed.). **Corrosion of steel in concrete**. New York: RILEM / Chapman and Hall, p. 56-69, 1988.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

UMOH, Akaninyene A.; ODESOLA, Isaac Abiodun. Characteristics of bamboo leaf ash blended cement paste and mortar. **Civil Engineering Dimension**, v. 17, n. 1, p. 22-28, 2015.

VAN DER TOORN, A. **The maintenance of civil engineering structures**. Heron, v. 39, n. 4, p.3-34, 1992.

VERIAN, Kho Pin; ASHRAF, Warda; CAO, Yizheng. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 30-49, 2018.

VILLAGRÁN-ZACCARDI, Yury A.; ALDERETE, Natalia M.; BENÍTEZ, Alejandra; CARRASCO, María F.; CORALLO, Patricio; LÓPEZ, Raul; RIOS, Cristian. Relationship between sorptivity coefficients of concrete as calculated from the evolution of water uptake versus t_0 . 5 or t_0 . 25. **Construction and Building Materials**, v. 342, p. 128084, 2022.

VILLAR-COCIÑA, Ernesto; MORALES, Eduardo Valencia; SANTOS, Sergio F.; SAVASTANO JR, Holmer; FRÍAS, Moisés. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 68-73, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.003>.

VILLAR-COCIÑA, Ernesto; RODIER, Loic; SAVASTANO JR, HOLMER; LEFRÁN, Manuel; FRÍAS, Moisés. A comparative study on the pozzolanic activity between bamboo leaves ash and silica fume: kinetic parameters. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 4, p. 1627-1634, 2020.

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.

ZHUO, Zhao; FENG, Xing; DAWANG, Li. Stochastic durability analysis of pre-stressed concrete structure under marine environment. In: **2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering**. IEEE, 2010. p. 765-767.

WALLY, Gustavo Bosel; MAGALHÃES, Fábio Costa; SELL JUNIOR, Félix Krolow; TEIXEIRA, Fernando Ritiéle; REAL, Mauro de Vasconcellos. Estimating service life of reinforced concrete structures with binders containing silica fume and metakaolin under chloride environment: durability indicators and probabilistic assessment. **Materials and Structures**, v. 54, p. 1-16, 2021.

WEI, J.; CEN, K. Empirical assessing cement CO₂ emissions based on China's economic and social development during 2001–2030. **Science of the Total Environment**, v. 653, p. 200–211, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.371>.

WU, Z.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. **Cement and concrete research**, v. 98, p. 136-154, 2017.