



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

LUCAS HENRIQUE PEREIRA SILVA

**CINZAS DAS FOLHAS DE BAMBU: MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR SUSTENTÁVEL**

Presidente Prudente - SP
2024



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO
AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL**

LUCAS HENRIQUE PEREIRA SILVA

**CINZAS DAS FOLHAS DE BAMBU: MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR SUSTENTÁVEL**

Tese apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional – Área de concentração: Avaliação e Análise de Impacto Ambiental

Orientadora:
Profa. Dra. Angela Kinoshita
Co-orientadora:
Profa. Dra. Amparo Moragues Terrades

Presidente Prudente - SP
2024

624.189
S586ca

Silva, Lucas Henrique Pereira.

Cinzas das Folhas de Bambu: Material Cimentício
Suplementar Sustentável. / Lucas Henrique Pereira Silva.
– Presidente Prudente, 2024.

144 f.: il.

Tese (Doutorado em Meio Ambiente e
Desenvolvimento Regional) - Universidade do Oeste
Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2024.

Bibliografia.

Orientador: Dra. Angela Kinoshita.

1. Cura interna. 2. Carbopol. 3. Durabilidade. 4. ,
carbonatação. 5. Ataque por cloretos. I. Título.

LUCAS HENRIQUE PEREIRA SILVA

**CINZAS DAS FOLHAS DE BAMBU: MATERIAL CIMENTÍCIO
SUPLEMENTAR SUSTENTÁVEL**

Tese apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional – Área de concentração: Avaliação e Análise de Impacto Ambiental

Presidente Prudente, 20 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Angela Kinoshita
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente – SP

Prof. Dr. Sergio Marques Costa
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente – SP

Prof. Dr. Fernando Cardoso Fajoni
Universidade do Oeste Paulista – Unoeste
Presidente Prudente – SP

Prof. Dr^a. Márcia Rodrigues de Moraes Chaves
Faculdade EDUVALE
Avaré – SP

Prof. Dr. Miguel Angel Rubia Lopez
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid - Espanha

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os docentes e em especial aos que me inspiraram durante a minha jornada acadêmica. A vocação deles fizeram com que eu deslumbrasse não só suas disciplinas com interesse e admiração, mas também me fizeram entender o poder transformador da educação que me trouxe até aqui. Ainda no ensino fundamental e médio a professora Yolanda Mendes (Matemática), o professor Alexandre Paraisoto (Física), a professora Sheila Puga Benites (Química) e o professor Sergio Augusto Gouveia Junior (Literatura) me envolveram em sentimentos de desafio, curiosidade, pertencimento etc que fizeram me apaixonar pelo processo de ensino-aprendizagem. Durante a graduação a professora Daniele Araújo Altran, ainda no seu primeiro ano como docente, se desafiou e me apresentou a pesquisa. Aos professores Andryos Lemes, Fabrícia Mitiko Ikuta e Nayra Yumi Tsutsumoto por terem olhado para o meu futuro, visualizado algo que naquele momento eu ainda não podia enxergar e me incentivado a continuar estudando e fazer mestrado. Por fim agora no doutorado a professora Ângela Kinoshita que me ensinou muito pelo exemplo de dedicação, paciência, profissionalismo, capacidade técnica e tantos outros adjetivos que a fazem ser admirada por todos.

AGRADECIMENTOS

O doutorado é uma jornada longa e difícil, entretanto quando se tem o apoio necessário pode se tornar extremamente prazerosa. Durante esses 4 anos de dedicação ao doutorado muitas pessoas tornaram a caminhada mais leve e contribuíram para que fosse possível colher tantos frutos deste processo.

Agradeço a amiga Jacqueline Tamashiro por entre tantas coisas, ter me apresentado a professora Ângela Kinoshita, me convidado para participar de estudos quando ainda nem era aluno do programa, ter intermediado as conversas com os professores espanhóis que me receberam em Madrid e ter compartilhado os momentos de dificuldade e principalmente conquista.

Agradeço ao amigo Fabio Friol Guedes de Paiva que foi uma grata surpresa que o doutorado trouxe. Profissionalmente é excelente pesquisador e me ensinou e motivou muito a escrever e produzir trabalhos de grande impacto; pessoalmente se tornou um grande amigo que temos dividido momentos de celebração.

Ao Fábio e a Jacqueline obrigado por terem tornado nosso grupo de pesquisa tão forte.

Aos colegas do grupo de pesquisa que ajudaram na minha pesquisa ou que me permitiram ajudar nos seus trabalhos: Victor Nehring, Naiara Pavani, Maryane de Almeida, Vitor Peixoto e Alex Ramos da Silva. Espero continuar trocando experiências pessoais e profissionais com vocês.

Aos parceiros do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS), da FCT/Unesp – Luís Fernando dos Santos e Felipe Chaves pelas parcerias nas pesquisas que possibilitaram aprofundar as investigações.

Ao técnico de laboratório de construção civil da UNOESTE, Isac Moura, por toda ajuda, suporte e alívio cômico durante as horas longas e estressantes de trabalho no laboratório. Ao técnico de laboratório da construção civil do IFSP – Campus Presidente Epitácio, José Hélio Alves Junior pela disponibilidade e prontidão em ajudar sempre que necessário.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela oportunidade de fazer parte do Programa de Doutorado-sanduíche no Exterior (PDSE).

Aos amigos que o PDSE me trouxe – Nicole Novelli, Guilherme Nonose, Aldenor Junior, Renato Dantas e Gabriela Ayres obrigado por terem estado presente em um dos momentos que eu mais desejei e ao mesmo tempo foi tão desafiador na minha

vida. Foi uma adaptação difícil, mas a consciência da grande oportunidade que eu estava tendo e a conexão que tivemos logo de início me ajudaram. Agradeço em especial a Gabriela Ayres, com quem dividi apartamento e tantos momentos especiais (filmes, vinhos e reflexões profundas, viagens, modelos para revisão sistemática de literatura, montanhas russas, bolo holandês, sair de fiesta etc); Todos estes momentos me tiraram da zona de conforto e me fizeram crescer muito – Obrigado.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pela concessão do afastamento para qualificação que possibilitou maior dedicação e produção durante os estudos deste doutorado.

A minha mãe, Rosa Maria Trombeta Pereira, a Nair Soares, e ao Aloisio Grandi de Oliveira que além de toda ajuda e incentivo no meu dia-a-dia também coletaram e queimaram folha de bambu quando eu não pude fazer.

RESUMO

Cinzas das Folhas de Bambu: Material Cimentício Suplementar Sustentável

As mudanças climáticas e os desastres naturais registrados nos últimos anos têm obrigado a humanidade a buscar maneiras mais sustentáveis de viver e para isso é imperativo encontrar alternativas produtivas que demandem menos dos recursos naturais e causem menos poluição. A produção de cimento causa grandes impactos no meio ambiente com a emissão gases causadores do efeito estufa o que tem motivado a pesquisa de materiais alternativos menos poluentes. Ao buscar no passado é possível encontrar um cimento primitivo chamado atualmente de material pozolânico. Hoje os materiais pozolânicos estão presentes em diversos cimentos e apresentam vantagens técnicas como maior resistência em ambientes agressivos. Entre os materiais pozolânicos destacam-se alguns resíduos como escória de alto-forno e a cinza volante. A busca por novos materiais é importante a fim de atender demandas crescentes e locais. A cinza da folha de bambu (CFB) é um material relativamente novo e que tem se destacado. Nesse sentido, uma revisão sistemática de literatura foi realizada a fim de identificar o estado da arte e lacunas importantes no conhecimento. A partir deste ponto, dois *gaps* foram investigados. Primeiro: A eficiência da cura interna em argamassas compostas com cinza de folha de bambu. Neste capítulo foi utilizado o carbopol 940 (C940) enquanto polímero superabsorvente (PSA) nas quantidades de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação a massa de cimento. O PSA foi inserido previamente entumescido e inserido em argamassas cujo cimento foi substituído por quantidades de 12,50% e 25% de CFB. Diversos ensaios foram realizados para caracterizar os materiais utilizados e as argamassas produzidas. Os resultados mostraram que a CFB apresentou a reatividade necessária para uso enquanto material pozolânico. Já o C940 utilizado não apresentou as características físicas ideais para ser empregado como PSA em materiais cimentícios não contribuindo efetivamente com a cura interna o que levou a queda da resistência a compressão das argamassas testadas. No segundo estudo a durabilidade de argamassas compostas com 20%, 25%, 30% e 40% de CFB foi avaliada a partir de ensaios de resistência a compressão, resistividade elétrica, resistência a migração e difusão de cloretos e carbonatação. O ensaio mecânico mostrou equidade da resistência a compressão das argamassas compostas com a referência, mesmo com

os maiores níveis de substituição de cimento (30% e 40%). A resistividade elétrica indicou que maiores quantidades de CFB tornaram a matriz cimentícia mais densa. Os resultados dos testes de resistência ao ataque por cloretos, avaliada frente a migração e a difusão, mostraram melhor desempenho das argamassas compostas. O coeficiente de migração da argamassa com 40% de CFB foi 5,75 vezes menor que ao da argamassa de referência. Os dados obtidos demonstraram que a CFB pode representar uma excelente alternativa de material cimentício suplementar onde o este resíduo de outras cadeias produtivas está disponível, trazendo melhoras na durabilidade e diminuído custos de manutenção das edificações.

Palavras-chave: Cura interna; Carbopol; Durabilidade; Carbonatação; Ataque por cloreto.

ABSTRACT

Bambu leaf ash: Sustainable Supplementary Cementitious Material

The occurrences of climate change and natural disasters in recent years have compelled humanity to explore more sustainable ways of living. To achieve this, it is imperative to find productive alternatives that demand fewer natural resources and result in less pollution. The production of cement causes significant environmental impacts through the emission of greenhouse gases, which has prompted research into alternative materials that are less polluting. Looking into the past, a primitive form of cement called pozzolanic material can be found. Nowadays, pozzolanic materials are present in various cements and offer technical advantages, such as greater resistance in aggressive environments. Notable among pozzolanic materials are certain residues like blast furnace slag and fly ash. The search for new materials is crucial to meet growing and localized demands. Bamboo leaf ash (BLA) is a relatively new material that has gained attention. In this context, a systematic literature review was conducted to identify the state of the art and significant knowledge gaps. From this point, two gaps were investigated: 1- The efficiency of internal curing in mortars composed of bamboo leaf ash. In this chapter, carbopol 940 (C940) was used as a superabsorbent polymer (SAP) in quantities of 0.1%, 0.2%, and 0.3% relative to the cement mass. The pre-swollen SAP was incorporated into mortars where cement was replaced by 12.50% and 25% of CFB. Various tests were conducted to characterize the materials and mortars produced. The results showed that CFB exhibited the necessary reactivity for use as a pozzolanic material. However, C940 did not have the ideal physical characteristics to be used as an SAP in cementitious materials, leading to a decrease in the compressive strength of the tested mortars. 2- The durability of mortars composed of 20%, 25%, 30%, and 40% CFB was evaluated in terms of compressive strength, electrical resistivity, resistance to chloride migration and diffusion, and carbonation. The mechanical test demonstrated comparable compressive strength of mortars with the reference, even with higher levels of cement replacement (30% and 40% CFB). Electrical resistivity indicated that higher amounts of CFB resulted in a denser cementitious matrix. Results from tests on chloride attack resistance, evaluated against migration and diffusion, showed better performance of composite mortars. The migration coefficient of the mortar with 40% CFB was 5.75 times lower than that of the

reference mortar. The obtained data demonstrated that CFB could be an excellent alternative supplementary cementitious material where this residue from other production chains is available, bringing improvements in durability and reducing building maintenance costs.

Keywords: Intern curing; Carbopol; Durability; Carbonatation; Chloride attack.

LISTA DE SIGLAS

ATR	Refletância total atenuada
BET	Brunauer, Emmet e Teller
C940	Carbopol 940
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	Índice de Suporte California
CFB	Cinza da folha de bambu
CH	Hidróxido de cálcio
CP	Corpo de prova
Cs	Concentração superficial de cloretos
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Da	Coefficiente de difusão aparente
De	Coefficiente de difusão efetivo
DRX	Difração de raios-X
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DSL	Espalhamento dinâmico da luz
EAA	Espectroscopia de absorção atômica
FRX	Fluorescência de raios-X
FTIR	Infravermelho por transformada de Fourier
ICDD	International Center for Diffraction Data
IFSP	Instituto Federal de São Paulo
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
INBAR	International Network For Bamboo And Rattan
MCS	Material cimentício suplementar
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma técnica brasileira
PDSE	Programa de Doutorado-sanduíche no Exterior
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
PSA	Polímero superabsorvente
RHA	Cinza da casca de arroz
SCBA	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
TG	Termogravimetria
UNOESTE	Universidade do Oeste Paulista

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1-	Usos do bambu, por partes	27
Figura 2-	Aplicações de construção de bambu em a) Parede b) Estrutura de parede e telhado c) Forro de telhado e luminária d) Parede e e) Piso	30
Figura 3-	Aplicações do bambu em estruturas de edificações e pontes.....	31
Figura 4-	Aeroporto de Madri. Terminal 4: Barajas.....	35
Figura 5-	Escola Internacional Panyaden.....	36
Figura 6-	Instalações do METI.....	37
Figura 7-	Pavilhão da German-Chinese House	38

CAPÍTULO 3

Figura 1-	Fluxograma PRISMA de seleção dos estudos	49
Figura 2-	Distribuições de tamanho de partícula para CFB.....	57
Figura 3-	Valores de resistência relativa de compósitos com CFB.....	61

CAPÍTULO 4

Figura 1-	a) Queima da folha de bambu. b) Monitoramento da temperatura.....	81
Figura 2-	Controle de temperatura na queima da CFB.....	81
Figura 3-	Distribuição granulométrica do CFB realizada por DSL	88
Figura 4-	Difratograma da CFB.	89
Figura 5-	DRX do Carbopol.	90
Figura 6-	Distribuição granulométrica do carbopol realizada por peneiramento..	91
Figura 7-	Distribuição granulométrica do carbopol realizada por DSL.....	92
Figura 8-	Espectro FTIR do Carbopol 940.....	93
Figura 9-	TG e DTG do Carbopol (Linha contínua corresponde ao TG e tracejada ao DTG)	94
Figura 10-	a) Capacidade de absorção e dessorção do PSA (g/g PSA) b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura do formato do PSA seco.....	95

Figura 11-	Consistência das argamassas	96
Figura 12-	Resistência a compressão das argamassas sem CFB; CU = Cura úmida, SC – Sem processo de cura, PSA – quantidade de carbopol utilizado; (Letras diferentes no mesmo período de cura indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test)).	98
Figura 13-	Resistência a compressão das argamassas com CFB aos 7 dias de cura (Letras diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test))....	100
Figura 14-	Resistência a compressão das argamassas aos 28 dias de cura (Letras diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test)).....	101
CAPÍTULO 5		
Figura 1-	Esquema de ensaio de migração de cloro	119
Figura 2-	Esquema de ensaio de difusão de cloretos.....	120
Figura 3-	Câmara de carbonatação.....	122
Figura 4-	Análise termogravimétrica da CFB.....	124
Figura 5-	Distribuição granulométrica da CFB.....	125
Figura 6-	Resistencia a compressão, aos 7 e 28 dias de cura (Letras diferentes, no mesmo período de cura, indicam diferença estatística ($p < 0.05$, ANOVA, Tukey test))	126
Figura 7-	Varição na resistividade da argamassa ao longo da cura	127
Figura 8-	Corpos de prova após o ensaio de migração de cloretos	128
Figura 9-	Perfil de migração de cloretos livres.....	130
Figura 10-	Perfil de migração de cloretos totais dos traços referência, 20% CFB, 25%, 30% CFB e 40% CFB.....	130
Figura 11-	Corpos de prova após 70 dias em câmara de carbonatação	131

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

- Tabela 1-** Condições de calcinação utilizadas na preparação de CFB.56
- Tabela 2-** Constituintes químicos (% do peso) das CFB nos artigos revisados. ...59

CAPÍTULO 3

- Tabela 1-** Proporções da mistura das argamassas86
- Tabela 2-** Composição química da CFB e do cimento utilizado87
- Tabela 3-** Resistência a compressão, de acordo com o tempo de cura.....98

CAPÍTULO 4

- Tabela 1-** Características físicas da areia 115
- Tabela 2-** Composição das argamassas 116
- Tabela 3-** Composição da CFB 123
- Tabela 4-** Resistência a compressão, aos 7 e 28 dias de cura 125
- Tabela 5-** Coeficiente de migração das argamassas ensaiadas 128
- Tabela 6-** Coeficiente de difusão e concentração superficial de cloretos 129
- Tabela 7-** Dados relativos a carbonatação 132

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO	18
1 APRESENTAÇÃO	19
1.1 O Discente	19
1.2 Estrutura da Tese	20
1.3 Problemáticas da Pesquisa	21
1.4 Objetivo Geral	22
1.5 Objetivos Específicos	22
CAPÍTULO 2: O BAMBU E SUAS APLICAÇÕES: DO BROTO AS FOLHAS	23
1 INTRODUÇÃO	24
1.1 Mercado	26
1.2 Aplicações	26
2 APLICAÇÕES DO BAMBU NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	29
2.1 Bamboo como Material estrutural	30
2.1 Compósitos Reforçados com Fibra de Bambu	32
2.1.1 Compósito de bambu scrimber (CBS)	32
2.1.2 Compósitos laminados de bambu	33
2.2 Cinza da folha de bambu como material cimentício suplementar	34
3 EDIFÍCIOS NOTÁVEIS COM BAMBU	35
3.1 Aeroporto Internacional de Madri – Terminal Barajas	35
3.2 Pavilhão Esportivo da Escola Internacional Panyaden	35
3.3 Instituto Moderno de Educação e Formação - METI	36
3.4 German Chinese House	37
CAPÍTULO 3: POTENCIAL DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU ENQUANTO MATERIAL AGLOMERANTE SUPLEMENTAR – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	45
RESUMO	45

1	INTRODUÇÃO	46
2	MÉTODO	48
3	ESTADO DA ARTE	50
3.1	CFB em Compósitos Cimentícios	50
3.2	Adição de CFB para Estabilização de Solos	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	Atividade Pozolânica da CFB	59
4.2	Influência da CFB na Resistência a Compressão	60
4.3	Análises de Durabilidade	62
4.4	Custo e eficiência ambiental	63
5	CONCLUSÕES	64
	CAPÍTULO 4: EFICIÊNCIA DA CURA INTERNA POR MEIO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES EM ARGAMASSAS COMPOSTAS COM CINZA DE FOLHA DE BAMBU	71
	RESUMO	71
1	INTRODUÇÃO	72
2	REFERENCIAL TEÓRICO	74
2.1	Matrizes de Cimento Portland	74
2.2	Polímeros Superabsorventes	75
2.2.1	Carbopol 940	77
2.3	Materiais pozolânicos	77
3	METODOLOGIA	80
3.1	Material 80	
3.1.1	Cimento	80
3.1.2	Cinza da Folha de Bambu (CFB)	80
3.1.3	Carbopol	82
3.2	Métodos	82
3.2.1	Caracterização da CFB	82

3.2.2	Caracterização do Carbopol 940.....	82
3.2.3	Experimentação com Argamassas.....	84
3.2.4	Análise Estatística.....	86
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1	Caracterização da CFB.....	87
4.1.1	Composição Química.....	87
4.1.2	Tamanho de partículas.....	88
4.1.3	Mineralogia.....	89
4.2	Caracterização do Cabopol.....	90
4.2.1	Mineralogia.....	90
4.2.2	Tamanho de partículas.....	90
4.2.3	Espectroscopia de Infravermelho (FTIR).....	92
4.2.4	Análise térmica.....	93
4.2.5	Cinética de absorção / Dessorção.....	94
4.3	Experimentação com argamassa.....	96
4.3.1	Consistência.....	96
4.3.2	Resistência Mecânica.....	97
5	CONCLUSÃO.....	102
	CAPÍTULO 5: ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COMPOSTAS COM CINZA DA FOLHA DE BAMBU: CARBONATAÇÃO, DIFUSÃO E MIGRAÇÃO DE CLORETOS.....	109
	RESUMO.....	109
1	INTRODUÇÃO.....	110
2.1	Carbonatação.....	112
2.2	Ataque por Cloretos.....	112
3.1	Material 115	
3.1.1	Cimento Portland.....	115
3.1.1	Areia.....	115

3.1.2	Aditivo superplastificante.....	115
3.1.3	Cinza da Folha de Bambu (CFB)	115
3.2	Métodos	116
3.2.1	Caracterização da CFB	116
3.2.2	Experimentação com argamassas	116
4	RESULTADOS	123
4.1	Caracterização da CFB	123
4.2	Experimentação com argamassa	125
4.1.1	Resistência mecânica	125
4.2.1	Resistividade elétrica	127
4.2.3	Migração acelerada de cloretos	128
4.2.4	Difusão de cloretos.....	129
4.2.5	Carbonatação.....	131
5	CONCLUSÃO	133
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	141
	REFERÊNCIAS	142

CAPÍTULO 1: APRESENTAÇÃO

1 APRESENTAÇÃO

1.1 O Discente

O meu nome é Lucas Henrique Pereira Silva, iniciei minha formação superior cursando Engenharia Civil (2009/2012) na Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) e, posteriormente, mestrado pelo Programa em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional (2020) na mesma universidade.

Meu primeiro contato com a pesquisa se deu durante a graduação com a possibilidade de participar em um projeto de iniciação científica. No mestrado comecei a trabalhar na área de materiais de construção civil sustentáveis, investigando cinza de forno de olaria e cinza da folha do bambu como substitutos parciais do cimento Portland. Tive a oportunidade de colaborar em pesquisas com diferentes materiais como vinhaça, tijolos de solo-cimento com resíduos e ainda, identificação e análise de patologias de edificações. Assim, desenvolvendo conhecimento para elaboração de pesquisas com foco ambiental e reuso de resíduos.

Desde 2013 sou professor do ensino básico, técnico e tecnológico no Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Campus Presidente Epitácio onde venho atuando como docente no curso técnico em edificações e tive a oportunidade de orientar minha primeira iniciação científica, em 2019, após o término do mestrado.

Atualmente sou discente de doutorado do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional pela Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE) e realizei um período de 10 meses de doutorado Sanduíche na *Universidad Politécnica de Madrid*, Madri, Espanha.

No decorrer do doutorado venho integrando o Grupo de Pesquisa Ambiente e Tecnologia onde tenho a oportunidade de atuar junto a outros pesquisadores, o que resultou em publicações científicas relevantes envolvendo materiais cimentícios com a substituição de água, areia natural e cimento por diversos resíduos, tal como: vinhaça da cana-de-açúcar (Tamashiro *et al.*, 2022a; Tamashiro *et al.*, 2022b), resíduos de concreto (Tamashiro *et al.*, 2022a), areia proveniente da indústria de fundição metalúrgica (Paiva *et al.*, 2023) e resíduo de re-refino de óleo lubrificante (Ramos da Silva *et al.*, 2023), bem como na revisão sistemática de literatura publicada sobre resíduos inorgânicos industriais (Paiva *et al.*, 2021) e o capítulo “Bamboo as a Sustainable Building Material” (Silva *et al.*, 2023a) publicado no livro “Bamboo and Sustainable Construction” da Editora Springer.

1.2 Estrutura da Tese

Os resultados apresentados nesta tese de Doutorado são referentes ao projeto CAPES Processo nº 88881.690588/2022-01 (Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares - PROSUP) e CAPES Processo nº 88881.690588/2022-01 (Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior) sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Angela Mitie Otta Kinoshita, co-orientação da Prof^a. Dr^a. Amparo Moragues Terrades (PDSE/CAPES).

Esta tese encontra-se dividida em capítulos. O primeiro capítulo aborda a apresentação do discente, a estrutura da tese e o tema. O capítulo 2 traz uma versão traduzida e adaptada do capítulo “Bamboo as a Sustainable Building Material” (Silva *et al.*, 2023a) publicado no livro “Bamboo and sustainable construction” (Palombini; Nogueira, 2023). O capítulo 3 traz uma versão traduzida do artigo de revisão de literatura publicado no Journal of Building Engineering (Silva *et al.*, 2023b). Outros dois artigos, apresentados nos capítulos 4 e 5, também fruto deste doutorado, serão submetidos após a defesa.

Os capítulos descritos são elencados a seguir:

CAPÍTULO 2 – O bambu e suas aplicações: Do broto as folhas;

CAPÍTULO 3 – Potencial da cinza da folha de bambu enquanto material aglomerante suplementar – Uma revisão sistemática de literatura;

CAPÍTULO 4 – Eficiência da cura interna por meio de polímero superabsorvente em argamassas compostas com cinza de folha de bambu;

CAPÍTULO 5 – Estudo da durabilidade de argamassas compostas com cinza da folha de bambu: carbonatação, difusão e migração de cloretos.

O CAPÍTULO 2, traz uma visão geral do bambu, origem, principais produtores, regiões importadoras e exportadoras, principais produtos produzidos e edificações notáveis que empregaram o material.

No CAPÍTULO 3, uma revisão sistemática de literatura foi realizada estudando os artigos já publicados empregando a cinza da folha enquanto material aglomerante disponíveis em 4 das principais bases de dados (PubMed Central, Scielo, Scopus e Web of Science). Trinta e um artigos foram selecionados e informações de condições de calcinação, propriedade químicas, física e mecânicas foram extraídas e tabuladas a fim de possibilitar que a pesquisa partisse de pontos já conhecidos para investigar

lacunas importantes no conhecimento científico. Entre os *gaps* encontrados dois deles foram escolhidos para serem investigados mais a fundo e os resultados são apresentados nos capítulos 4 e 5.

O CAPÍTULO 4 traz a caracterização de um polímero superabsorvente (Carbopol 940) a fim de aplicá-lo na cura interna de compósitos cimentícios. A cinza da folha de bambu (CFB) também é caracterizada para ser empregada como substituto parcial do cimento Portland. Por fim, argamassas são produzidas para avaliar a eficácia da cura interna com C940 e o efeito da cinza da folha de bambu (CFB) nestes compósitos. A consistência e a resistência a compressão das argamassas foram avaliadas.

Por último, o CAPÍTULO 5 apresenta dados relativos à avaliação da durabilidade de argamassas compostas com CFB em substituição ao cimento nas quantidades de 20%, 25%, 30% e 40%. A princípio, a CFB é caracterizada e utilizada para moldagem de argamassas, cuja durabilidade é explorada a partir de ensaios de resistividade elétrica, carbonatação, migração e difusão de cloretos.

1.3 Problemáticas da Pesquisa

O cimento é o material de construção civil mais importante da história e hoje é o material mais produzido no mundo. Para sua produção é necessário a retirada de recursos naturais e altas temperaturas que causam impactos negativos ao meio ambiente, entretanto, é difícil imaginar o futuro sem ele. Uma das alternativas para minimizar os impactos é a busca por materiais pozolânicos alternativos (Silva *et al.*, 2023b). Esta alternativa poderia reduzir o consumo total de cimento em 20%, preservando a resistência e reduzindo os custos do concreto em 9% (ABNT, 2018).

Na busca por materiais cimentícios mais sustentáveis, o uso de diferentes resíduos que atendam demandas locais pode reduzir impactos de transporte além de solucionar problemáticas de descarte de resíduos. Entre diversos materiais (cinza da cana-de-açúcar, cinza de re-refino de óleo lubrificante, cinza da casca de ovo etc) que vem sendo pesquisado, a CFB tem se destacado por sua alta-reatividade que possibilita elevados teores de substituição (até então 30%) de cimento (Paiva *et al.*, 2021; Ramos da Silva *et al.*, 2023).

O Pontal do Paranapanema, região Oeste do Estado de São Paulo, é considerado um dos centros de atividades agroindustriais, e o segundo Estado do

Brasil com mais área de floresta plantada do país. O bambu é apontado como sendo um possível substituto a outras madeiras e ao aço em diferentes aplicações além de já ser utilizado por indústrias de celulose (Emamverdian *et al.*, 2020; França *et al.*, 2023).

O uso e a tendência de aumento de produção de bambu trazem a necessidade de se pensar alternativas para os resíduos gerados pela cadeia produtiva deste material. Um caminho natural é o uso das folhas enquanto biomassa e alternativas a destinação ou emprego das cinzas são importantes para um desenvolvimento sustentável.

1.4 Objetivo Geral

Estudar o emprego do carbopol 940 enquanto polímero superabsorvente usado para cura interna de argamassas compostas e a influência da cinza da folha de bambu na durabilidade de compósitos cimentícios.

1.5 Objetivos Específicos

- Buscar lacunas no conhecimento relacionadas ao uso da CFB enquanto material aglomerante;
- Compreender se o C940 pode contribuir na cura interna de compósitos cimentícios e de que maneira o uso de CFB em argamassas compostas alteram este sistema;
- Estudar a durabilidade de argamassas compostas com CFB;
- Estudar as propriedades da CFB enquanto adição mineral capaz de mitigar a migração e difusão de cloretos em argamassas;
- Investigar a carbonatação em argamassas compostas com CFB;

CAPÍTULO 2: O BAMBU E SUAS APLICAÇÕES: DO BROTO AS FOLHAS

1 INTRODUÇÃO

O bambu apareceu na Terra durante o período Cretáceo, que começou há 100 milhões de anos e terminou há mais de 65 milhões de anos. O bambu é originário da Ásia e atualmente ocorre naturalmente no Sri Lanka, Bangladesh, Tailândia e China. Os colonizadores portugueses introduziram o bambu na Indonésia, Malásia e Filipinas, enquanto os imigrantes chineses o introduziram nos Estados Unidos e mais tarde, os colonos chineses trouxeram o bambu para o Brasil (1,2).

De acordo com a Food and Agriculture Organization (FAO) (3), 31 milhões de hectares de florestas em todo o mundo são cobertos por bambu, com mais de 60% destas áreas localizadas no Brasil, Índia e China. Além disso, o bambu cobre 1% das áreas florestais do mundo. Em geral, a América Latina possui 10% das florestas de bambu, enquanto a Ásia possui 80% e a África possui 10%.

O bambu cresce de forma mais eficaz em climas temperados e tropicais quentes. Tem crescimento extremamente rápido, podendo atingir até 0,08 metros por dia nessas condições; no entanto, o bambu também pode ser cultivado em condições adversas, como climas desérticos ou montanhosos, quando a espécie adequada for escolhida (4).

Idealmente, o bambu deveria ser plantado durante a primavera, mas tem sido plantado no final do inverno em climas tropicais. No entanto, também têm havido colheitas bem-sucedidas em climas frios, desde que os bambus sejam plantados perto de árvores, muros e cercas para proteger dos ventos fortes (5).

Os bambus requerem cerca de oito horas de luz solar diariamente, embora algumas espécies precisem de sombra durante a parte mais quente do dia. Plantar bambu em uma região mais fria confere tolerância a menor quantidade de água, enquanto cultivá-lo em uma área mais quente requer plantá-lo em uma área com sombra parcial para evitar a desidratação da planta durante o inverno. O bambu deve ser cultivado em solos profundos, ricos e bem drenados. Se necessário, fertilizantes orgânicos poderiam ser usados para melhorar a qualidade do solo (6).

O bambu pode ser propagado a partir de seus rizomas e colmos, denominado propagação vegetativa. Rizomas paquimorfos e leptomorfos são transplantados com base em seus aspectos morfológicos e outras características (7).

O transplante de rizomas paquimórficos requer cortar a parte onde o rizoma antigo se conecta ao novo rizoma, cortar o colmo acima do primeiro nó e plantá-lo

com o caule acima do solo e o rizoma abaixo do solo. Para transplantar leptomorfos é necessário cortar quaisquer botões e, se houver colmo acima do primeiro nó, colocá-lo entre 0,30 e 0,50 metros abaixo do solo. É necessário plantar um colmo de bambu enterrado a 0,30 metros abaixo do solo e mantê-lo úmido no momento do transplante (8,9).

Plantado em tiras de 1,0 a 1,5 metros de distância, o bambu pode crescer com sucesso como um plantio denso. A irrigação deve ser feita com frequência, principalmente quando as plantas são jovens e o tempo está seco. Neste caso, a recomendação é regar diariamente. As árvores de bambu mais antigas podem ser regadas duas ou quatro vezes por semana quando houver vento. O bambu não tolera solos encharcados, portanto, a rega deve deixar o solo úmido (10).

O bambu é colhido entre o 3º e o 5º ano de crescimento. As árvores devem ser cortadas acima do primeiro nó, a 0,20 metros do solo. As árvores de bambu devem ser colhidas em meses secos para evitar geadas ou danos causados pela seca (11).

Nas culturas de bambu, as árvores são colhidas com equipamentos especializados e os colmos com menor teor de umidade devem ser colhidos em condições climáticas mais frias e secas. Isto pode ser conseguido utilizando colmos mais leves, que facilitam tanto o corte como o transporte, ao mesmo tempo que protegem os colmos de fissuras durante o transporte (12).

Quando verdes, os bambus perdem muita água ao serem retirados da touceira, o que pode levar as árvores a murchar e impedir seu uso estrutural. Líquenes e fungos na superfície do colmo são sinais de que está pronto para ser cortado. Além disso, menos seiva circulando pelos colmos os torna menos suscetíveis a ataques de insetos e fungos.

Serras, motosserras e outras ferramentas podem ser facilmente utilizadas para colher bambus centrais, que são provavelmente as árvores mais antigas e, portanto, mais resistentes a pragas e à decomposição. No entanto, as serras devem ser usadas somente após a remoção do máximo possível de cada galho, para evitar lascas ou danificar a árvore. As operações de tratamento e armazenamento começam após o corte dos talos de bambu em comprimentos necessários para venda ou uso pessoal (13).

O bambu é muito utilizado em alguns setores industriais devido à sua durabilidade, que pode ser de um a três anos sem tratamento e em contato com o solo, e de quatro a seis anos sem tratamento e sem contato com o solo. Porém, o

manejo adequado dos colmos pode garantir maior ou melhor durabilidade aos bambus (14).

1.1 Mercado

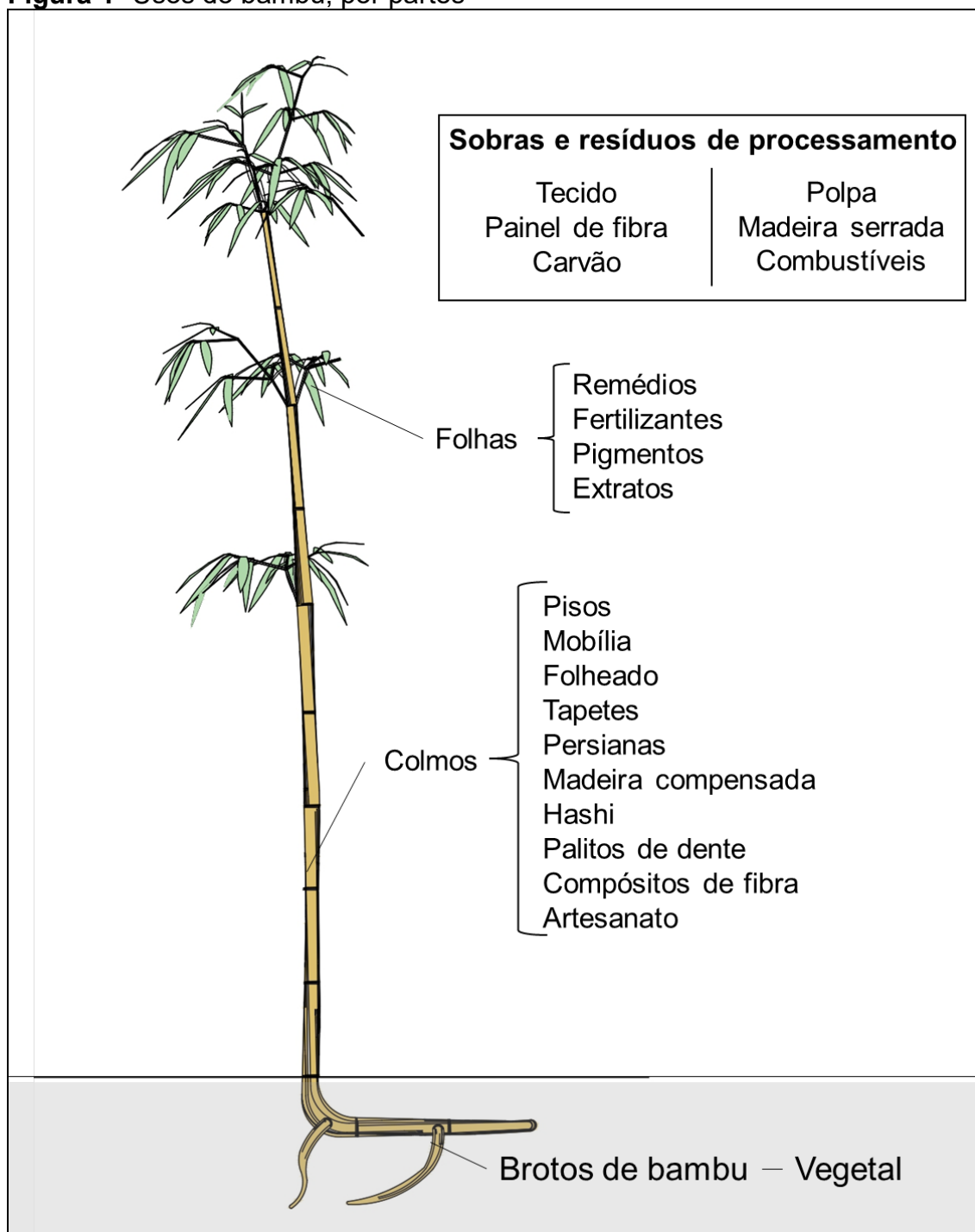
Apesar de todos os usos possíveis, o bambu não possui um grande comércio, devido ao equívoco sobre o material, entre outros motivos, principalmente pelo desconhecimento sobre os benefícios e aplicações do bambu.

Em 2020, o consumo de bambu atingiu 90 milhões de toneladas em todo o mundo (15). Em 2019, as exportações de bambu totalizaram US\$ 3,054 bilhões. Os principais mercados de exportação de bambu são Ásia (81%), Europa (10% ou US\$ 297 milhões) e América do Norte (US\$ 265 milhões representando 9%). Só a China representa 67% de todas as exportações mundiais. As mesmas regiões são as principais importadoras: Europa (33%), América do Norte (32%) e Ásia (31%) (16). Os elevados níveis de comércio de produtos de bambu na Europa e na América do Norte devem-se às tecnologias avançadas para processamento de bambu nestes blocos, apesar da baixa ou inexistência de produção local (16).

1.2 Aplicações

Em geral, as plantas de bambu podem ser utilizadas da base ao topo. As raízes e brotos poderiam ser usados como fonte de alimento e como esculturas, enquanto a parte inferior, média e superior dos bambus podem ser usadas em artesanato, pisos, folheados, esteiras, compensados, carvão e outros. As aplicações das folhas vão desde medicamentos até pigmentação e fertilizantes e, mais recentemente, as cinzas das folhas têm sido utilizadas como material suplementar no cimento. Por fim, o bastão e as pontas são aplicados como hashi, compósitos de fibra, cobertura, artesanato e decoração (17)(Correal, 2020). A Figura 1 mostra alguns usos das partes do bambu.

Figura 1- Usos do bambu, por partes



Fonte: O autor

Como recurso energético renovável, o valor da energia produzida a partir da combustão dos caules do bambu Tong é de 17.585 kJ/kg, muito próximo do das cascas de palmeira (18.466 kJ/kg); portanto, a biomassa do bambu é altamente adequada para produzir energia elétrica com grande potencial como alternativa aos

combustíveis fósseis (18). Além disso, outro estudo concluiu que o bambu tem um valor calorífico comparável ao da madeira (19).

Como recurso alimentar, os brotos de bambu contêm 27% de sua porção comestível (20). O broto de bambu é fonte de vitaminas do complexo B, carboidratos e proteínas, com baixo teor de gordura e calorias, e sua fácil disponibilidade tem despertado o interesse da comunidade científica. Em 2017, o comércio internacional de brotos de bambu representou 19% do total das exportações de produtos de bambu, incluindo tecidos, móveis e produtos industrializados (16).

O bambu tem sido extensivamente investigado e utilizado em farmacologia e medicina. Estudos recentes descobriram que as folhas de bambu contêm inúmeras substâncias ativas que poderiam ser usadas para tratar infecções, doenças imunológicas, doenças metabólicas relacionadas à obesidade e outras (21). Por exemplo, na Coreia do Sul, uma receita tradicional que combina sal e bambu (sal de bambu roxo) é popularmente utilizada na prevenção e tratamento de diversas doenças. Outro estudo mostrou a importante contribuição do sal de bambu roxo no tratamento de doenças inflamatórias (22). Outra investigação relatou a atividade inibitória da solução de extrato de folhas de bambu contra o vírus influenza (H1N1) e HIV (23).

Além disso, pesquisadores investigaram a capacidade das cinzas das folhas de bambu na adsorção de corantes têxteis (azul de metileno). Os resultados mostram que a adsorção do azul de metileno chega a 87,79% com tempo de contato de 20 min (24).

Como material de construção, o bambu já é bastante conhecido e os próximos tópicos deste capítulo apresentarão uma abordagem aprofundada sobre seus possíveis usos.

2 APLICAÇÕES DO BAMBU NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O setor da construção é muito importante para as economias mundiais; contudo exige a extração de grandes quantidades de recursos naturais não renováveis para a produção de materiais de construção. O bambu representa uma alternativa a alguns destes materiais com características semelhantes aos tradicionais; além disso, os materiais à base de bambu são biodegradáveis. Esta seção aborda algumas aplicações do bambu no setor da construção civil. Para compreender o potencial do bambu como material de construção é necessário compreender a estrutura do colmo do bambu. O colmo é a parte aérea da planta composta por nós e entrenós, cujo número e espaçamento variam entre as espécies. Os nós são as interconexões transversais da parede do caule com células orientadas radialmente, enquanto os entrenós, que são tubos ocos, são orientados longitudinalmente (25). De acordo com Liese (1985), ocorre maior concentração de fibras na face externa da parede do caule. Do ponto de vista estrutural, as fibras embutidas na parede externa da haste proporcionam rigidez à flexão, com finalidade análoga ao reforço de aço no concreto (25).

Uma das principais preocupações na utilização de materiais naturais no setor da construção é a sua durabilidade. No caso do bambu, a vida útil do material não tratado e em contato com o solo varia de um a três anos, de quatro a cinco anos quando os materiais não ficam expostos às intempéries, e acima de 15 anos em condições favoráveis (usos internos). Para aumentar a durabilidade, produtos químicos como boro, bórax e ácido bórico são usados para preservar o bambu em projetos de construção em grande escala. Geralmente, os tratamentos podem ser realizados em tanque aberto para imersão ou sob pressão, pelo método de Boucherie modificado contra-ataque biológico (17). Em um tanque aberto, o colmo é imerso em uma solução conservante por vários dias para permitir uma penetração lenta no bambu. No método Boucherie modificado, é utilizado um sistema de pressão conectado a uma extremidade do tubo, forçando axialmente os conservantes para dentro dos vasos da haste, deixando a outra extremidade e reduzindo o tempo de tratamento para algumas horas. Além disso, a solução é reciclada. Finalmente, o método de pressão é o mais eficaz; no entanto, é um dos mais caros, necessitando de equipamentos especializados, sendo comum o uso de creosoto e conservantes à

base de água. Informações adicionais sobre métodos de preservação podem ser encontradas nos estudos de Jayanetti e Follet (1998) e Janssen (2000) (26, 27).

Exemplos de aplicações de construção são mostrados na Figura 2. O bambu permite inúmeras aplicações, como construção de casas (a) (b), elementos decorativos e forros (c), paredes de barro em regiões mais pobres (d) e pisos de bambu (e). O bambu tratado com produtos químicos ou conservantes apresentou durabilidade efetiva por até 40 anos (28). Portanto, o bambu pode ser uma alternativa eficiente para substituir a madeira convencional e outros elementos nas construções principalmente devido ao seu crescimento acelerado.

Figura 2- Aplicações de construção de bambu em a) Parede b) Estrutura de parede e telhado c) Forro de telhado e luminária d) Parede e e) Piso



Fonte: Adaptado de (29-33)

2.1 Bamboo como Material estrutural

O bambu é um material versátil e seu uso como material estrutural traz muitas vantagens como o fato de ser leve, resistente, sustentável, de baixo custo, recurso auto-renovável, planta de rápido crescimento, resistente a terremotos, entre outros (28). Figura 3 mostra algumas aplicações do bambu na estrutura de escolas em áreas rurais (a) (b) (c) e pontes (d) (e). De acordo com Wanderley *et al.* (34), existem mais de 1.200 espécies de bambu; entretanto, menos de 100 espécies de bambu possuem propriedades para aplicação estrutural. As espécies mais utilizadas são o bambu Moso, Guadua e *Dendrocalamus asper*. Do ponto de vista técnico, o bambu pode

atingir a resistência estrutural máxima em três anos (35). Alguns estudos mostraram que a resistência à tração do bambu pode chegar a 400 MPa, enquanto a fibra de bambu tem resistência de até 1000 Mpa (36-38). Em geral, o aço atinge entre 400 e 1100 MPa de resistência à tração. Se utilizadas corretamente, as fibras de bambu possuem potencial mecânico superior à madeira e semelhante ao aço, além de serem um material mais leve (39).

Figura 3- Aplicações do bambu em estruturas de edificações e pontes



Fonte: Adaptado de (40-44)

Porém, a aplicação do bambu para fundações estruturais é restrita devido à decomposição acelerada quando em contato com solo úmido. Este problema pode ser parcialmente resolvido através de tratamentos químicos ou com conservantes eficazes. Algumas aplicações usaram concreto pré-formado, colunas de concreto ou estacas de bambu (28). Uma aplicação do bambu que vem substituindo a madeira é a sua utilização em treliças/estruturas de telhado. As treliças de bambu podem ser utilizadas sobre vigas e terças de bambu, proporcionando robustez à estrutura, além de serem mais leves e fáceis de instalar (28).

Ainda são poucos surgem os relatos sobre a substituição do aço pelo bambu em elementos estruturais. Sabe-se que o concreto de cimento Portland é altamente alcalino ($\text{pH} > 12$), característica adequada para preservar o aço, mitigando os potenciais efeitos de sua corrosão (45). Em contrapartida, o alto pH do cimento afeta a estrutura celular dos materiais lignocelulósicos, como madeira, bambu e outros (46).

Assim, a utilização do bambu da mesma forma que o aço nessas situações torna-se inviável. Os estudos sobre durabilidade relataram perda de 50% da resistência à tração do bambu após um ano condicionado em meio alcalino e após três anos a perda chegou a 70% (47). A hidratação do cimento resulta em variação térmica, e a lignina é solúvel em ambientes alcalinos quentes (48). A alcalinidade pode ser reduzida através do uso de cimento ternário (49) ou através de carbonatação (50), mitigando parcialmente a degradação da biomassa. Portanto, mais estudos devem ser realizados sobre a aplicação do bambu como reforço estrutural em concreto.

2.1 Compósitos Reforçados com Fibra de Bambu

2.1.1 Compósito de bambu scrimber (CBS)

Compósitos de bambu scrimber (CBS) surgiu no início da década de 1980 para ser usado como material estrutural (51). CBS pode substituir os tradicionais painéis de madeira como alternativa à extração de madeiras nobres. Por ser um bloco de madeira, o CBS é formado por fibras de bambu saturadas de resina, que são comprimidas, formando um bloco denso e maciço.

A literatura aponta a viabilidade de produção de CBS com espécies de bambu, como *Bambusa chungii* (52), *Dendrocalamus spp.* (53), *Phyllostachys heterocycla* (54), *Neosinocalamus affinis* (55), and *Bambusa rigida* (56). No processo de fabricação, alguns defeitos naturais da matéria-prima, como juntas, anisotropia, espessura irregular e interior vazado, são removidos ou distribuídos igualmente, apresentando maiores vantagens em relação à madeira (28,52,56).

Devido à sua resistência mecânica, durabilidade, estabilidade dimensional e coloração semelhante à madeira nobre, o CBS pode ser utilizado como elemento estrutural em vigas e pilares, pisos externos, enchimentos de paredes com isolamento térmico, painéis de cisalhamento e painéis prediais (52,57).

A taxa de inchaço da espessura do bambu muda quando em contato com a água. Contudo, a resistência à absorção de água dos materiais BSC aumenta proporcionalmente ao teor de resina aplicada. A resistência à flexão e o módulo de elasticidade do CBS atingem aproximadamente 200 MPa e 22 GPa, respectivamente (52).

CBS pode ser utilizado em pisos externos e edifícios devido às suas propriedades de baixa absorção de água e resistência mecânica com a seleção de métodos de processamento apropriados e taxas máximas de aplicação de resina. Estudos (15) investigaram o biocompósito verde de bambu e palha de arroz. Partículas de bambu e palha de arroz foram misturadas homoganeamente em diferentes proporções. Posteriormente, as partículas foram pulverizadas com Difenilmetano diisocianato modificado (MDI) e adesivos à base de lignina. As partículas misturadas foram colocadas em moldes (50 cm²) com pressão entre 5 e 16 MPa sob altas temperaturas. A resistência de união interna atingiu 0,57 MPa e, após 24 horas, atingiu taxa de inchamento de 7% em espessura. Portanto, o biocompósito de bambu atendeu aos requisitos da norma ISO P-FN MR1 para painéis em condições úmidas (15).

2.1.2 Compósitos laminados de bambu

Em 2020, o consumo de bambu atingiu 90 milhões de toneladas em todo o mundo. Para cada tonelada de produto à base de bambu fabricado, é gerada aproximadamente uma tonelada de resíduos de bambu (15). O aproveitamento de resíduos industriais do processamento do bambu é de apenas 40%, resultando em 60% de desperdício de recursos com potencial aproveitamento (55). Compósitos laminados de bambu consistem em resíduos de bambu misturados com adesivos submetidos à prensagem a quente, resultando em materiais para laminados e painéis de fibra de bambu (55,58).

Cada espécie de bambu possui características diferentes de comprimento do colmo (59). A literatura relata a fabricação de compósitos laminados de bambu utilizando as seguintes espécies: *Neosinocalamus affinis*, *Phyllostachys pubescens* (60), e *Phyllostachys bissetii* (61). Espécies de bambu com comprimentos de entre nós mais curtos são preferidas quando os colmos são usados com aplicações estruturais (59). O bambu laminado comporta-se como um compósito reforçado com fibras, apresentando módulo de elasticidade uniforme (62).

A melhoria das características físicas e mecânicas pode ser alcançada através do processo de abrasão superficial (61). A abrasão superficial limpa resíduos das superfícies, removendo células suberizadas e siliciosas, bem como ceras e silicones depositados no bambu. Consequentemente, o aumento da rugosidade favorece a

impregnação de resinas na superfície, aumentando o módulo médio de ruptura, o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos compósitos laminados de bambu.

2.2 Cinza da folha de bambu como material cimentício suplementar

O conteúdo deste item foi destacado e publicado como um artigo separado e está apresentado no capítulo 3, intitulado Potencial da cinza da folha de bambu enquanto material aglomerante suplementar – Uma revisão sistemática de literatura.

3 EDIFÍCIOS NOTÁVEIS COM BAMBU

3.1 Aeroporto Internacional de Madri – Terminal Barajas

O termina 4 (Barajas) do Aeroporto internacional de Madri (Figura 4), foi projetado pelo Estudio Lamela, Rogers Stirk Harbour & Partners. A edificação é um exemplo bem conhecido do uso do bambu em tetos e telhados de galpões. O local economiza energia com estratégias bioclimáticas, que incluem um extenso forro de bambu de 200 mil m² nas fachadas externas e internas. Ao longo de toda a cobertura da área de passageiros foram utilizadas ripas de bambu sobrepostas de diversos tamanhos, todas tratadas contrafogo, formando o famoso teto ondulado (63).

Além da beleza estética que esse material promove, a aplicação do acabamento em bambu no aeroporto é interessante porque lembra ao viajante a simplicidade, gerando a impressão de um ambiente aconchegante e tranquilo (64).

Figura 4- Aeroporto de Madri. Terminal 4: Barajas



Fonte: Adaptado de (65,66)

3.2 Pavilhão Esportivo da Escola Internacional Panyaden

Outro exemplo é o pavilhão esportivo da Escola Internacional Panyaden (Figura 5), projetado por by Chiangmai Life Construction na cidade de Chiang Mai no norte da Tailândia. Um edifício esportivo com zero carbono, construído apenas com bambu, em linha com a missão da Panyaden de “Escola Verde” (67).

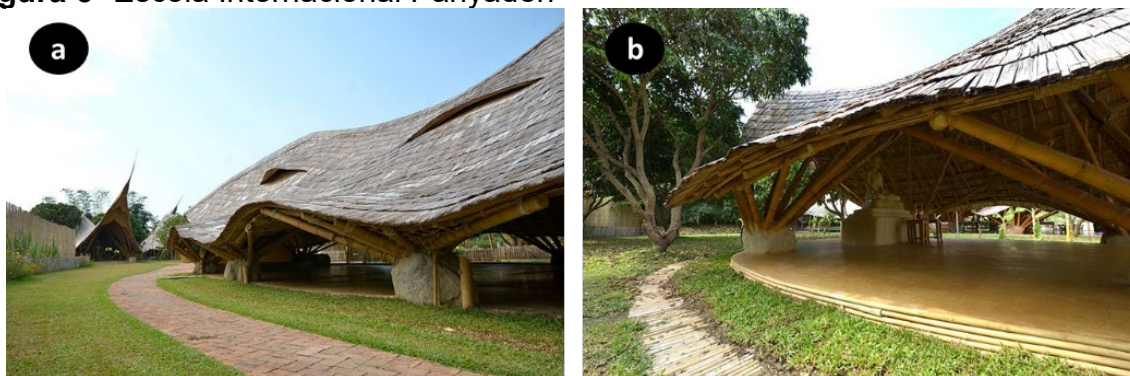
O salão possui estrutura de desenho orgânico composta por dez treliças de bambu com mais de 17 metros de extensão, sem reforços ou ligações de aço. Com área de 782 m², capacidade para 300 pessoas e composta por quadras de futsal, basquete, vôlei e badminton, além de palco para shows (68).

O edifício foi projetado para suportar com segurança ventos locais de alta velocidade, terremotos e todas as outras forças naturais. Além disso, a estrutura de

bambu fica exposta em todo o interior, criando aberturas em arco ao redor da borda do hall, com um design sustentável estrategicamente feito para promover um clima fresco e agradável durante todo o ano através de ventilação natural e isolamento (68).

O bambu foi selecionado e tratado com bórax (borato de sódio), e nenhum produto químico tóxico foi envolvido no processo de tratamento. O bambu utilizado na construção absorveu uma quantidade maior de carbono do que o carbono emitido durante o tratamento, transporte e construção, a expectativa de vida deste salão de bambu é de pelo menos 50 anos (68).

Figura 5- Escola Internacional Panyaden



Fonte: Adaptado de (69,70)

3.3 Instituto Moderno de Educação e Formação - METI

Localizado numa aldeia chamada Rudrapur, no distrito de Dinajpur, no norte do Bangladesh, o Instituto Moderno de Educação e Formação (METI) foi construído à mão em quatro meses por artesãos, estudantes e professores locais, utilizando os recursos naturais disponíveis na região. Tem uma área construída de 325 m² e foi projetado pela arquiteta austríaca Anna Heringer e pelo arquiteto alemão Eike Roswag-Klinge, valendo-lhes o Prémio Aga Khan para a Arquitetura em 2007 (71).

Bangladesh é um país pequeno, com apenas aproximadamente 15 milhões de hectares de terra; no entanto, com uma população de cerca de 150 milhões de pessoas (72). Consequentemente, alimentar e proporcionar educação a todos estes cidadãos, protegendo simultaneamente o ambiente, torna-se uma tarefa delicada. Portanto, este é justamente o objetivo fundamental do METI: melhorar a qualidade de vida dos moradores utilizando princípios de sustentabilidade, oferecendo acolhimento e auxílio para inserção no mercado de trabalho.

Quanto à estrutura do edifício, a sua fundação é em alvenaria de tijolos e está dividida em dois pisos. As paredes do piso térreo foram executadas com uma técnica

adaptada denominada “Wellerbau”, que consiste em paredes de barro reforçadas com palha batida e acabamento com lama batida. O teto é composto por uma tripla camada de varas de bambu conectadas a vigas de sustentação por meio de pinos de aço fixados com amarrações de náilon. O telhado do segundo andar utiliza ripas de bambu nas paredes, janelas e portas. Por fim, seu teto é revestido com chapas de ferro galvanizado corrugado (73), conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6- Instalações do METI



Fonte: Adapted from (74, 75)

3.4 German Chinese House

A German-Chinese House é uma estrutura concebida pelo designer alemão Markus Heinsdorff com o apoio do engenheiro estrutural Schlaich Bergemann e parceiros. A construção foi representativa do “Goethe-Institute” na EXPO 2010 em Xangai (76).

Ponto de encontro entre duas culturas, a German-Chinese House traz em seu projeto referências arquitetônicas e tecnologias construtivas dos dois países que leva em seu nome. O teto adotado, feito com membrana de PVC capaz de bloquear a luz solar direta, mas também garantir iluminação adequada, é uma homenagem à arte asiática de dobrar papel Origami (77).

A ideia do projeto foi utilizar um material simples e antigo, o bambu, de forma moderna e eficaz, trazendo um conceito de sustentabilidade contemporâneo. Foi adotado o tipo “bambu gigante” e para as ligações entre varas de bambu foram utilizados parafusos roscados e flanges de aço inoxidável cimentadas nas extremidades com até 4,3 metros de comprimento. O edifício tem dois andares. O piso superior tem 4 m de altura e pode ser acessado por uma escada de aço (77), conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7- Pavilhão da German-Chinese House



Fonte: (78)

REFERÊNCIAS

1. Kleinhenz V, Midmore DJ. Aspects of bamboo agronomy. In 2001. p. 99–153. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065211301740321>
2. Tewari DN. A monograph on bamboo. India: International Book Distributors Dehra Dun India; 1993. 498 p.
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Forest Resource Assessment 2010. Rome, Italy; 2010.
4. Medeiros H, Castro W, Salimon CI, Silva IB da, Silveira M. Tree mortality, recruitment and growth in a bamboo dominated forest fragment in southwestern Amazonia, Brazil. *Biota Neotrop* [Internet]. 2013 Jun;13(2):29–34. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1676-06032013000200029&lng=en&tling=en
5. Shirin F, Mishra JP, Bhadrawale D, Saudagar IA, Gupta T, Berry N. Seasonal and hormonal variation during adventitious rhizogenesis in five commercially important bamboo species for production of quality planting material. *J For Res* [Internet]. 2021 Sep 3;26(5):377–85. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13416979.2021.1935548>
6. Dembitsky VM, Poovarodom S, Leontowicz H, Leontowicz M, Vearasilp S, Trakhtenberg S, et al. The multiple nutrition properties of some exotic fruits: Biological activity and active metabolites. *Food Res Int* [Internet]. 2011 Aug;44(7):1671–701. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963996911001608>
7. Gulabrao YA, Kaushal R, Tewari SK, Tomar JMS, Chaturvedi OP. Seasonal effect on rooting behaviour of important bamboo species by culm cuttings. *J For Res* [Internet]. 2012 Sep 4;23(3):441–5. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11676-012-0282-0>
8. ZHOU GM, XU JM, JIANG PK. Effect of Management Practices on Seasonal Dynamics of Organic Carbon in Soils Under Bamboo Plantations. *Pedosphere* [Internet]. 2006 Aug;16(4):525–31. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1002016006600842>
9. Ben-zhi Z, Mao-yi F, Jin-zhong X, Xiao-sheng Y, Zheng-cai L. Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *J For Res* [Internet]. 2005 Jun;16(2):143–7. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/BF02857909>
10. Isagi Y, Shimada K, Kushima H, Tanaka N, Nagao A, Ishikawa T, et al. Clonal structure and flowering traits of a bamboo [*Phyllostachys pubescens* (Mazel) Ohwi] stand grown from a simultaneous flowering as revealed by AFLP analysis. *Mol Ecol* [Internet]. 2004 Apr 27;13(7):2017–21. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-294X.2004.02197.x>

11. Zhang D, Zhang A, Xue L. A review of preparation of binderless fiberboards and its self-bonding mechanism. *Wood Sci Technol* [Internet]. 2015 Jul 9;49(4):661–79. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00226-015-0728-6>
12. Pandey AK, Ojha V. Standardization of harvesting age of bamboo shoots with respect to nutritional and anti-nutritional components. *J For Res* [Internet]. 2013 Mar 16;24(1):83–90. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11676-012-0317-6>
13. Hong M, Wei W, Yang Z, Yuan S, Yang X, Gu X, et al. Effects of timber harvesting on *Arundinaria spanostachya* bamboo and feeding-site selection by giant pandas in Liziping Nature Reserve, China. *For Ecol Manage* [Internet]. 2016 Aug;373:74–80. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112716302043>
14. Lima HC, Willrich FL, Barbosa NP, Rosa MA, Cunha BS. Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. *Mater Struct* [Internet]. 2008 Jun 12;41(5):981–9. Available from: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-007-9299-9>
15. Pang B, Zhou T, Cao XF, Zhao BC, Sun Z, Liu X, et al. Performance and environmental implication assessments of green bio-composite from rice straw and bamboo. *J Clean Prod*. 2022;375(August):134037.
16. INBAR. Trade Overview 2019: Bamboo and Rattan Commodities in the International Market. Beijing; 2019.
17. Correal FF. Bamboo design and construction. In: Kent A. Harries BS, editor. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials (Second Edition)*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering; 2020. p. 521–59.
18. Wahono J, Sumarwan U, Arifin B, Purnomo H. RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE BAMBOO FOREST BASED ON COMMUNITY EMPOWERMENT. *J Apl Bisnis dan Manaj* [Internet]. 2021 Jan 28; Available from: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jabm/article/view/34642>
19. Purbasari A, Samadhi TW, Bindar Y. Thermal and Ash Characterization of Indonesian Bamboo and Its Potential for Solid Fuel and Waste Valorization. *Int J Renew Energy Dev* [Internet]. 2016 Jul 15;5(2):95–100. Available from: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijred/article/view/11614>
20. Satya S, Bal LM, Singhal P, Naik SN. Bamboo shoot processing: food quality and safety aspect (a review). *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 2010 Apr;21(4):181–9. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224409002994>
21. Kimura I, Kagawa S, Tsuneki H, Tanaka K, Nagashima F. Multitasking bamboo leaf-derived compounds in prevention of infectious, inflammatory, atherosclerotic, metabolic, and neuropsychiatric diseases. *Pharmacol Ther* [Internet]. 2022 Jul;235:108159. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0163725822000535>
22. Shin H, Lee E, Kim C, Shin T, Kim S, Song Y, et al. Anti-inflammatory Activity of Korean Folk Medicine Purple Bamboo Salt. *Immunopharmacol Immunotoxicol*

[Internet]. 2003 Jan 9;25(3):377–84. Available from:
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1081/IPH-120024505>

23. Ito A, Tsuneki A, Yoshida Y, Ryoike K, Kaidoh T, Kageyama S. In Vitro Inhibition of Cytopathic Effect of Influenza Virus and Human Immunodeficiency Virus by Bamboo Leaf Extract Solution and Sodium Copper Chlorophyllin. *Yonago Acta Med* [Internet]. 2016 Mar;59(1):61–5. Available from:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27046952>

24. Kuntari K, Fajarwati FI. Utilization of bamboo leaves wastes for methylene blue dye adsorption. In 2018. p. 020062. Available from:
<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5065022>

25. Liese W. *Bamboo - Biology, Silvics, Properties, Utilization*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. German Agency for Technical Cooperation; 1985. 132 p.

26. Jayanetti DL, Follet PR. *Bamboo in Construction: An Introduction*. INBAR Tech. 1998. 120 p.

27. Janssen JJA. *Designing and building with bamboo*. INBAR Technical Report No. 20 International Network for Bamboo and Rattan; 2000. 221 p.

28. Yadav M, Mathur A. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview. *Mater Today Proc*. 2021;43:2872–6.

29. Inhabitat. SUNSHINE IN / BAMBOO HOUSE - Tongji University Shanghai [Internet]. 2010 [cited 2022 Oct 1]. Available from:
<https://www.flickr.com/photos/inhabitat/4722493883>

30. Samaniego A. Bamboo Cabin [Internet]. 2018 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://pxhere.com/en/photo/1458465>

31. Verch M. Bamboo Baskets with Light Bulbs as Ceiling Lamps and Decoration in a Restaurant in Ho Chi Minh City, Vietnam [Internet]. 2020 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/30478819@N08/50597432632>

32. Tennen-Gas. Japanese traditional style Bamboo reinforced mud wall [Internet]. 2008 [cited 2022 Oct 1]. Available from:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Japanese_Bamboo_reinforced_mud_wall.JPG

33. Pbroks13. Bamboo flooring [Internet]. 2007 [cited 2022 Oct 1]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bamboo_Flooring.jpg

34. Wanderley M das GL, Sheperd GJ, Giulietti AM. *FLORA FANEROGÂMICA DO ESTADO DE SÃO PAULO*. São Paulo: Editora Hucitec; 2001. 317 p.

35. Escamilla EZ, Habert G. Regionalizing the environmental impact of bamboo-based buildings by integrating life cycle assessment with geographic information systems: A comparative case-study in Colombia. *10th World Bamboo Congr Korea 2015*. 2015;17–22.

36. Akwada DR, Akinlabi ET. Bamboo Use in Construction Industry: How Sustainable is it? 2015. 16–18 p.
37. Osorio L, Trujillo E, Van Vuure AW, Verpoest I. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/ epoxy composites. *J Reinf Plast Compos*. 2011 Mar;30(5):396–408.
38. Wang F, Shao J, Keer LM, Li L, Zhang J. The effect of elementary fibre variability on bamboo fibre strength. *Mater Des*. 2015 Jun;75:136–42.
39. Mofidi A, Abila J, Ng JTM. Novel Advanced Composite Bamboo Structural Members with Bio-Based and Synthetic Matrices for Sustainable Construction. *Sustainability*. 2020 Mar;12(6):2485.
40. Cosi AS. Panyaden's Eco-friendly Assembly Hall and Indoor Sports Hall [Internet]. 2017 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.panyaden.ac.th/2017/07/10/panyaden-eco-friendly-assembly-hall-indoor-sports-hall/>
41. Forgemind ArchiMedia. Bambu - Ibuku Green School 08 [Internet]. 2010 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/eager/15946400596/>
42. Forgemind ArchiMedia. Bambu - Ibuku Green School 06 [Internet]. 2008 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/eager/15784872838/in/photostream/>
43. Forgemind ArchiMedia. Bambu - Ibuku Green School 05 [Internet]. 2007 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/eager/15786539457/in/photostream/>
44. Wu L. The bamboo bridge in Crosswaters Ecolodge & SPA [Internet]. 2010 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://www.flickr.com/photos/13523064@N03/5371912960>
45. Behnood A, Van Tittelboom K, De Belie N. Methods for measuring pH in concrete: A review. *Constr Build Mater*. 2016 Feb;105:176–88.
46. Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2016;83:98–112.
47. Hosoda K. Bamboo reinforced concrete. Syukyosya Syoin, Japan; 1942.
48. Gram H. Durability of natural fibres in concrete. Stockholm; 1983.
49. John VM, Cincotto MA, Sjöström C, Agopyan V, Oliveira CTA. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. *Cem Concr Compos*. 2005 May;27(5):565–74.
50. Tonoli GHD, Santos SF, Joaquim AP, Savastano H. Effect of accelerated carbonation on cementitious roofing tiles reinforced with lignocellulosic fibre. *Constr Build Mater*. 2010 Feb;24(2):193–201.

51. Sun X, He M, Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. *Constr Build Mater.* 2020;249(1239):118751.
52. Rao F, Zhu X, Zhang Y, Ji Y, Lei W, Li N, et al. Water resistance and mechanical properties of bamboo scrimber composite made from different units of *Bambusa chungii* as a function of resin content. *Constr Build Mater.* 2022;335(April):127250.
53. Gauss C, Kadivar M, Savastano H. Effect of disodium octaborate tetrahydrate on the mechanical properties of *Dendrocalamus asper* bamboo treated by vacuum/pressure method. *J Wood Sci.* 2019;65(1).
54. Qi J, Xie J, Yu W, Chen S. Effects of characteristic inhomogeneity of bamboo culm nodes on mechanical properties of bamboo fiber reinforced composite. *J For Res.* 2015;26(4):1057–60.
55. Zheng L, Wu Y, Li P, Sun B, Sheng G, Zuo Y. Construction of crystallization nucleation and network crosslinking structure in bamboo scrap/magnesium oxychloride composites via nano-SiO₂. *J Mater Res Technol.* 2021;15:5496–506.
56. Huang X, Xie J, Qi J, De Hoop CF, Xiao H, Chen Y, et al. Differences in physical–mechanical properties of bamboo scrimbers with response to bamboo maturing process. *Eur J Wood Wood Prod.* 2018;76(4):1137–43.
57. Huang Y, Ji Y, Yu W. Development of bamboo scrimber: a literature review. *J Wood Sci.* 2019;65(1).
58. Tang G, Zhang Z, Sun P, Jiang T. Experimental Research on Basical Mechanical Properties of Bamboo Plywood. *J Phys Conf Ser.* 2020;1637(1).
59. Chaowana K, Wisadsatorn S, Chaowana P. Bamboo as a sustainable building material—culm characteristics and properties. *Sustain.* 2021;13(13).
60. Chow A, Ramage MH, Shah DU. Optimising ply orientation in structural laminated bamboo. *Constr Build Mater.* 2019;212:541–8.
61. Tang K, Jiang Y, Chen L, Li X, Qi J, Chen Q, et al. Fabrication of laminated bamboo composites from small diameter bamboo (*Neosinocalamus affinis*) by sand blasting surface modification. *Ind Crops Prod.* 2022;187(PA):115377.
62. Penellum M, Sharma B, Shah DU, Foster RM, Ramage MH. Relationship of structure and stiffness in laminated bamboo composites. *Constr Build Mater.* 2018;165:241–6.
63. Kaur N, Saxena S, Gaur H, Goyal P. A review on bamboo fiber composites and its applications. In: 2017 International Conference on Infocom Technologies and Unmanned Systems (Trends and Future Directions) (ICTUS) [Internet]. IEEE; 2017. p. 843–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8286123/>
64. Tatematsu BK. Architectural Similarities Between the Structure of Adolfo Suárez Madrid–Barajas Airport and Actin Filaments with Binding Proteins. *Wheat J Cell Biol Res.* 2016;(6):1–10.

65. Roletschek R. Flughafen Madrid-Barajas, Eingangsbereich, links die Sicherheitskontrolle [Internet]. 2017 [cited 2022 Oct 1]. Available from: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:17-12-14-Flughafen-Madrid-Barajas-RalfR-DSCF1008.jpg>
66. Delso D. Terminal 4 del aeropuerto de Madrid-Barajas, España [Internet]. 2013 [cited 2022 Oct 1]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Terminal_4_del_aeropuerto_de_Madrid-Barajas,_España,_2013-01-09,_DD_05.jpg
67. Xiao Y, Li Z, Liu KW, editors. Modern Engineered Bamboo Structures [Internet]. CRC Press; 2019. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429786662>
68. Orhon AV, Altin M. Utilization of Alternative Building Materials for Sustainable Construction. In 2020. p. 727–50. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-20637-6_36
69. Takeaway. Panyaden school Chiang Mai 04 [Internet]. 2011 [cited 2022 Nov 28]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panyaden_school_Chiang_Mai_04.JPG
70. Takeaway. Panyaden school Chiang Mai 03 [Internet]. 2011 [cited 2022 Nov 28]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Panyaden_school_Chiang_Mai_03.JPG
71. Ashraf KK. This is Not a Building! Handmaking a School in a Bangladeshi Village. *Archit Des* [Internet]. 2007 Nov;77(6):114–7. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.575>
72. Huq SMI, Shoaib JUM. The Soils of Bangladesh [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2013. (World Soils Book Series; vol. 1). Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-007-1128-0>
73. Lim JCS. Hand-Made School. Rudrapur, Bangladesh; 2007.
74. Tschaperkotter. Meti School Exterior [Internet]. 2018 [cited 2022 Oct 10]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meti_School_Exterior.jpg
75. Hossain N. Heringer meti school [Internet]. 2008 [cited 2022 Oct 10]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heringer_meti_school.jpg
76. Schittich C. Details Around the Corner. *Archit Des* [Internet]. 2014 Jul;84(4):36–43. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.1779>
77. Sieder M, Rein A, Seise N. Vom Halm zum Tragwerk. *Bautechnik* [Internet]. 2013 Dec;90(12):816–21. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bate.201300082>
78. Deutschland - Land der Ideen. German-Chinese House [Internet]. 2010 [cited 2022 Oct 10]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:011_DuC_Haus_Nacht_8826~8828_Kingka_y_Branded.jpg

CAPÍTULO 3: POTENCIAL DA CINZA DA FOLHA DE BAMBU ENQUANTO MATERIAL AGLOMERANTE SUPLEMENTAR – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados na sociedade contemporânea; no entanto, a sua produção exige grandes quantidades de matérias-primas e recursos naturais. A produção de cimento é responsável pelas maiores emissões de CO₂, causando grandes impactos ambientais. A utilização de resíduos industriais como material cimentício complementar (MCS) tem sido cada vez mais estudada para reduzir e minimizar esses impactos negativos. Nesta revisão sistemática da literatura, investigamos o possível uso da cinza de folha de bambu (CFB) como MCS. Analisamos 31 artigos de quatro bases de dados e avaliamos os efeitos das condições de calcinação do BLA, bem como suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e de durabilidade. A revisão da literatura demonstra que o BLA apresenta alta reatividade pozolânica e que os compósitos com substituição do cimento pelo BLA apresentam ótimas propriedades mecânicas e maior durabilidade.

Palavras-chave: Cinza da folha de bambu, material pozolânico, resistência, concreto, argamassa

SILVA, Lucas Henrique Pereira; PAIVA, Fábio Friol Guedes de; TAMASHIRO, Jacqueline Roberta; KINOSHITA, Angela. Potential of bamboo leaf ash as supplementary binder materials - A systematic literature review. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 71, p. 106547, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106547>.

1 INTRODUÇÃO

O cimento é o material manufaturado mais utilizado em todo o mundo e suas demandas são justificadas por seu baixo custo e eficácia (1). No entanto, a produção de cimento é responsável por enormes emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global (2). A maior parte das emissões de dióxido de carbono (CO₂) deriva da calcinação na qual o calcário (CaCO₃) é transformado em cal (CaO) (3). A queima do combustível para fornecer as altas temperaturas exigidas no processo de calcinação responde pelo restante do CO₂ emitido na fabricação. A produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂ (4), o que impulsiona a busca por novos materiais com potencial para substituição do cimento. Além disso, os resíduos gerados em outros sistemas de produção têm potencial para uso como material cimentício suplementar (MCS) (5).

Atualmente, alguns subprodutos já são utilizados na produção de cimento, como a escória de alto-forno. As escórias são materiais residuais da indústria siderúrgica, resultantes do processamento de minerais em altas temperaturas, geralmente entre 900°C e 1200°C (6). O Comitê Europeu de Normalização afirma que a escória de alto-forno é o principal constituinte do cimento tipo CEM III/C, chegando a 95% (7). Esse material também é utilizado em outras partes do mundo, como no Brasil, onde a escória compõe entre 35% e 70% do cimento Portland tipo III. Outros subprodutos industriais comumente usados no cimento são as cinzas volantes e a sílica ativa, no entanto, espera-se que a disponibilidade desses materiais diminua com o tempo, além disso, a disponibilidade deles é limitada em algumas regiões e países (5).

A escória de ferro dos altos-fornos representa 28% da produção de ferro gusa (8). Em 2022, a produção mundial de ferro foi de 1885 milhões de toneladas o que nos permite estimar em 527,8 milhões de toneladas de escória de alto forno (9). A produção mundial de cimento no ano de 2022 foi de 4,1 bilhões de toneladas (10). Mesmo que as 527,8 milhões de toneladas de escória de alto-forno fossem utilizadas para a produção de cimento, seriam insuficientes para suprir a demanda mundial. Portanto, há relevância para avaliar alternativas para uso como MCS.

Dentre os subprodutos relatados na literatura, destacam-se algumas cinzas agroindustriais já disponíveis após sua utilização como biomassa na produção de energia. A cinza da casca de arroz (CCA) é descrita como o resíduo agroindustrial que melhor substitui parcialmente o cimento (11). No entanto, pesquisas recentes

mostraram que a cinza de folha de bambu (CFB) tem resultados semelhantes ou até melhores que CCA em alguns aspectos (12).

Desde a publicação dos primeiros trabalhos sobre o CFB como MCS, alguns estudos foram realizados para melhor entender as melhores condições de calcinação, caracterização do material, definição dos índices ótimos de substituição e avaliação da influência do CFB em diferentes aplicações. O presente estudo apresenta uma revisão sistemática da literatura compreendendo todos os trabalhos e caracterizações da CFB como um aglomerante na construção civil.

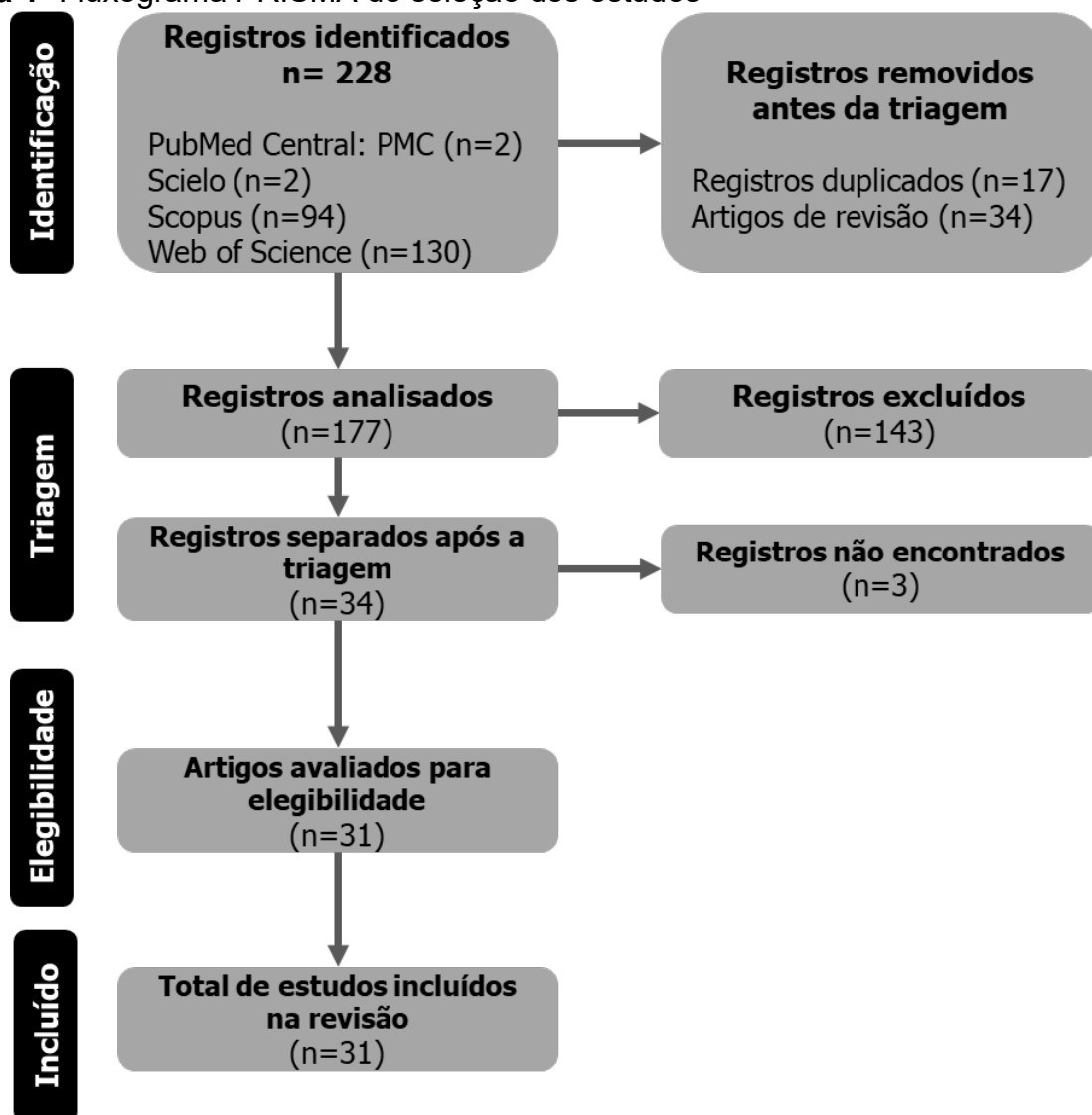
2 MÉTODO

A rápida disseminação do conhecimento nos dias de hoje exige que os pesquisadores encontrem uma forma eficaz de conhecer o atual estado da arte. As revisões de literatura podem ser cruciais para obter informações relevantes sobre um tópico específico (13), pois permitem entender e identificar questões que requerem investigação aprofundada. Na revisão sistemática da literatura, o risco de subjetividade é reduzido, pois os critérios de seleção são claros. A Figura 1 mostra o fluxograma PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) utilizado no processo de seleção dos artigos estudados.

Para coletar os artigos dessa revisão, uma pesquisa da palavra-chave "cinzas de folhas de bambu", em inglês, foi realizada em quatro bancos de dados (PubMed Central, Scielo, Web of Science e Scopus). Esses bancos de dados foram usados por seu alto nível de cobertura.

A busca não teve um período de início definido, considerou todos os estudos publicados até dezembro de 2022. A busca abrangeu trabalhos com "cinza de folha de bambu" no título, resumo ou palavras-chave. A busca mostrou um total de 228 artigos. Durante a primeira fase, de identificação, 17 artigos foram excluídos por estarem repetidos em mais de uma base de dados e 34 foram excluídos por se tratar de artigos de revisão de literatura. Os artigos de revisão de literatura foram excluídos pois as revisões sistemáticas são consideradas estudos secundários, que têm nos estudos primários sua fonte de dados (14). Dos 177 artigos resultantes e analisados na etapa da triagem, 143 foram excluídos porque contavam com a palavra "cinza de folha de bambu", entretanto não a empregavam como um material aglomerante na construção civil. Ainda nesta etapa 3 artigos não foram localizados e por isso não foram incluídos nas análises. Por fim, 31 trabalhos foram selecionados e discutidos, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1- Fluxograma PRISMA de seleção dos estudos



Fonte: O autor

3 ESTADO DA ARTE

3.1 CFB em Compósitos Cimentícios

O primeiro artigo sobre CFB foi publicado em 2006 e foi escrito por pesquisadores indianos (15). Nesta publicação, as cinzas foram caracterizadas por análise da composição química, difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sua reatividade foi avaliada em solução de Ca(OH)_2 e em pastas com auxílio de técnicas de DRX e titulação. Os resultados mostraram um aumento na reatividade ao substituir o cimento por 20% de CFB, onde um maior número de íons reage com a sílica amorfa em uma taxa mais rápida (15). Em 2007, os mesmos autores tiveram outro artigo publicado. Nesta pesquisa, a queima da folha de bambu foi controlada a 600°C e a atividade pozolânica foi avaliada por diferentes métodos. Além disso, foi investigada a resistência à compressão de argamassas cujo cimento foi substituído por 20% de CFB, resultando em valores semelhantes à argamassa controle (16).

As publicações seguintes surgiram em 2011 e 2012 e foram realizadas por um grupo brasileiro em parceria com pesquisadores de Cuba e Espanha (17,18). Nesses artigos, as caracterizações da CFB foram feitas na mesma temperatura da pesquisa anterior, 600°C . Os parâmetros cinéticos das cinzas foram investigados (17,18). Os autores observaram que o CFB é mais reativo que a sílica ativa comercial, sendo que o Ca(OH)_2 foi quase totalmente consumido em apenas três dias, mostrando que a substituição do cimento até 20% de CFB atende às propriedades físicas e mecânicas exigidas pela norma EN 197- 1 (19). Os autores indicaram que mais pesquisas deveriam analisar a influência de diferentes temperaturas de calcinação da CFB (18).

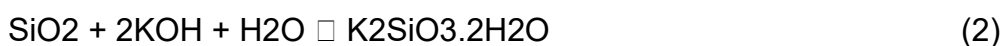
A análise da influência da temperatura de calcinação da CFB nos parâmetros cinéticos foi publicada em 2016, realizada por Cociña et al. (20) que indicaram essa necessidade em 2011 (18). A reatividade do CFB foi medida por um método indireto de condutividade elétrica onde ocorre o consumo de hidróxido de cálcio em solução pelo material pozolânico e a formação de silicato de cálcio hidratado, levando a uma queda na condutividade elétrica, conforme mostrado na Equação 1 (20).



Os resultados dos experimentos mostraram que a cinza produzida a 600°C foi a mais reativa, seguida pelas cinzas produzidas a 500°C e 700°C . A menor reatividade da CFB produzida a 700°C foi explicada pela presença de cristobalita nos resultados

do difratograma de raios X, indicando recristalização da fase amorfa da sílica (20). Este estudo também mostrou que a CFB produzida a 500°C teve maior perda ao fogo e não apresentou desempenho exigido na padronização, ao contrário da cinza produzida a 600°C (20).

Em 2015, houve uma publicação sobre as características microscópicas de folhas e cinzas de bambu (21). As estruturas microscópicas de sílica encontradas em tecidos vegetais calcinados em diferentes temperaturas (350, 450, 550 e 850°C) foram analisadas. As estruturas permaneceram praticamente inalteradas em todas as temperaturas testadas; no entanto, foram observadas modificações na composição química do cloreto de potássio (KCl). A fusão deste sal ocorre a 776°C; portanto, sua concentração é menor a 850°C do que em amostras calcinadas em temperaturas mais baixas. A grande quantidade de KCl inviabiliza o uso do material por induzir um mecanismo de corrosão em estruturas de concreto armado. O mecanismo de corrosão inicia-se nas reações álcali-agregado, onde a sílica do agregado e os íons alcalinos (K⁺, Na⁺) reagem formando géis expansivos (Equação 2) que causam intensa deterioração do concreto, formando meios para a entrada de agentes agressivos que diminuem a vida útil das estruturas (22). O KCl é o fertilizante potássico mais utilizado no Brasil (23), o que explica sua presença nas plantas e na CFB.



Em 2017, foi feita uma comparação da composição química, granulometria das partículas e os efeitos da substituição do cimento por diferentes materiais pozolânicos (metacaulim, cinza volante, cinza de sabugo de milho e CFB). Os resultados mostraram que a CFB apresentou melhores resultados que os demais, comparável ao metacaulim e a cinza volante, quando utilizado na quantidade de 15% de substituição. Os autores também indicaram a necessidade de estudos para analisar o desempenho das pozolanas em idades superiores a 28 dias (24).

Em 2019, foi mencionada a autocombustão da folha como mecanismo para produzir cinzas (12). Este método é semelhante ao processo de aproveitamento de resíduos agrícolas para produção de energia (biomassa). Após a calcinação, as cinzas foram caracterizadas, a quantidade de sílica amorfa medida e a pozolanicidade avaliada pela técnica de condutividade elétrica e potencial de hidrogênio (pH). Foi avaliada a resistência à compressão das argamassas, com substituição de até 30% do cimento por CFB. Até então o valor máximo de substituição testado era de 20%.

Os resultados mostraram que mesmo com as altas taxas de substituição, as argamassas aumentaram a resistência e reduziram a porosidade na matriz (12).

Ainda em 2019, Rodier et al. (22) testaram pastas ternárias e argamassas binárias e ternárias misturando cimento, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e CFB. A sílica amorfa foi quantificada, semelhante aos estudos realizados por Moraes et al. (12); no entanto, outra metodologia foi adotada, o que dificultou a comparação dos resultados. Todos os testes de reatividade realizados (técnica de condutividade elétrica, DRX, termogravimetria/calorimetria exploratória diferencial (TG/DSC) mostraram maior reatividade de pastas de cimento com maiores teores de CFB. O teste de calorimetria resultou em menor calor de hidratação para o cimento binário com cinza de bambu. A redução do calor de hidratação diminuiu as fissuras em grandes massas cimentícias. Além disso, este trabalho destacou a viabilidade econômica de usar MCS onde a substituição parcial de cimento por 20% de CFB e/ou cana-de-açúcar reduziu os custos de produção (22).

Villar-Cociña et al. (25) compararam os parâmetros cinéticos de CFB com a sílica ativa. A reatividade dos materiais foi medida através da condutividade elétrica de soluções do material estudado e hidróxido de cálcio. Esse método também foi utilizado pelo mesmo autor em 2016 (20) e por Moraes et al. (12). Os resultados mostraram que o CFB tem maior reatividade em termos qualitativos, causando uma queda mais rápida da condução elétrica. No entanto, a sílica ativa foi mais eficiente quantitativamente, aumentando o consumo de hidróxido de cálcio. Comparando com dados da literatura, o autor também concluiu que ambos apresentaram maior reatividade que cinza de casca de arroz, bagaço de cana, entre outros.

A produção de concreto usando CFB e resíduo de tijolo cerâmico como ligante foi investigada por Kolawole et al. (26). Os autores destacaram que a CFB tem uma necessidade de água 257% maior para consistência normal do que o cimento. A resistência à compressão é um dos parâmetros mais importantes para compósitos com função estrutural, o que fica evidente através do uso de algumas normas (ASTM C618, BS EN 450-1, NBR 5752) que medem a atividade pozolânica com base na resistência à compressão (27-29). Pela norma Norte Americana a resistência dos compósitos com CFB deve ser de no mínimo 75% da resistência do controle, aos 7 e 28 dias. Os resultados de Kolawole et al. mostraram uma excelente resposta dos concretos mistos, superando inclusive a resistência da mistura de controle na argamassa com 10% de CFB. O autor extrapolou a exigência normativa e avaliou até

90 dias, onde todas as características atingiram o mínimo de 75%. Rodier et al. (22) também analisaram o ganho ambiental e econômico do uso do MCS. No cenário de utilização de 10% de CFB e 10% de resíduos de tijolos cerâmicos, o autor descreveu uma economia de energia de 15%, uma redução de 19% nas emissões de CO₂ e uma redução de custos de 10%.

A maioria dos trabalhos descritos avaliou a reatividade de CFB em misturas binárias. No entanto, Villar-Cociña et al. (30) destaca que os trabalhos com resíduos agroindustriais têm focado em misturas com mais de uma adição na última década. Nesse sentido, o autor avalia a atividade pozolânica de alguns aditivos, incluindo CFB e cinza de bagaço de cana-de-açúcar (SCBA). A avaliação da atividade pozolânica foi realizada por dois métodos diferentes: 1 - Método condutimétrico, utilizado por vários outros autores e 2 - Método químico acelerado. Este último método mede a fixação de hidróxido de cálcio em períodos pré-determinados. Os resultados dos testes de condutividade mostraram as mesmas respostas obtidas pelo autor em 2019 (25), o que significa rápida reatividade do CFB quando comparado ao SCBA. Os achados ganham destaque ao comparar os sistemas binários 60%CFB + 40%SCBA e 50%CFB + 50%SCBA, onde a mistura com mais SCBA tem reatividade mais rápida. Os autores explicaram que o fato da SCBA ter partículas mais finas levou a um aumento na fixação do hidróxido de cálcio.

Dacuan, Abellana e Canseco (31) decidiram avaliar o CFB como reforço na durabilidade de estruturas de concreto armado com base na capacidade de alguns resíduos pozolânicos inibirem a corrosão, como cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, entre outros. Nesta avaliação, após processo corrosivo acelerado, foram realizados diversos ensaios (resistência à compressão do concreto e tração do aço e resistência ao ataque ácido) aos 7, 14, 21 e 28 dias. Os resultados mostraram um desempenho inferior dos concretos com adição de CFB; no entanto, o autor argumenta que outros estudos mostraram que os concretos mistos têm a mesma resistência do controle aos 90 dias, devido à reação pozolânica mais lenta. No teste de resistência ao ataque ácido, a mistura com melhor desempenho foi com 10% de CFB que melhorou a permeabilidade do concreto, evitando a entrada de produtos químicos na mistura.

3.2 Adição de CFB para Estabilização de Solos

Em 2010, uma primeira iniciativa para usar CFB na estabilização do solo foi realizada por Amu e Adetuberu (32). Os pesquisadores adicionaram 2, 4, 6, 8 e 10% de CFB aos solos. Os resultados do teste triaxial mostraram o potencial de estabilização da CFB em solo laterítico, se adicionado no nível ideal, e os valores de CBR aumentaram consideravelmente com a adição da CFB (32). Em 2011, Amu e Babajide (33) determinaram os efeitos da CFB em solo laterítico estabilizado com cal para a construção de rodovias. A adição da CFB causou um aumento considerável nas resistências ao cisalhamento das amostras, acima daquelas obtidas na estabilização ótima com cal (33).

Em 2018, dois estudos propuseram a aplicação de CFB na estabilização de solos. A primeira pesquisa avaliou a resistência ao cisalhamento de solos estabilizados com cimento e CFB. O cimento foi substituído por cinza em quantidades de 5 e 10%. Ao final da publicação o próprio autor cita que não realizou a caracterização química da cinza utilizada e isso poderia trazer explicações mais profundas dos resultados obtidos além disso estudos com variação ampliada da quantidade de CFB para a situação proposta deveriam ser realizados (34). O segundo estudo utilizava cal e CFB, em quantidades de 2, 4, 5, 6, e 8%. Além da avaliação enquanto estabilizador de solo os autores investigaram a viabilidade na produção de tijolos cerâmicos cozidos em diferentes temperaturas (700, 800, 900 e 1000 °C). Para uso em solo os resultados mostraram capacidade estabilizadora se adicionados no nível ideal (5%) atendendo o requisito mínimo da norma nigeriana para a construção de subleito e sub-base da maioria das construções. Quanto aos tijolos, aqueles produzidos a partir de 800°C atenderam aos requisitos de resistência compressão e absorção de água impostos pela ASTM (35).

Wijaya, Ismanti e Rifa'I (36) concentraram-se no Índice de Suporte Califórnia (CBR) para melhorar a capacidade de carga dos solos, conduzindo testes de expansão e densidade de solos estabilizados com cimento e CFB com uma ampla faixa de substituição (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). O uso de até 75% de CFB melhorou o teor de umidade dos solos, reduzindo o potencial de expansão. No teste CBR, a substituição do cimento levou a uma diminuição da compactação; no entanto, ainda foi possível atender aos padrões locais com 25% de substituição (36). Da mesma forma, Nnochiri, Ogundipe e Ola (37) avaliaram a capacidade do CFB e da

CCA em melhorar as características do solo laterítico. Os resultados mostraram que a adição de 6% de cimento e 8% de CFB tornou um solo inicialmente fraco em adequado para uso como sub-base.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A literatura permitiu extrair vários dados importantes dos estudos publicados. O primeiro tópico importante a ser discutido são os parâmetros utilizados no processo de calcinação. A ativação térmica através da calcinação é uma preparação recorrente de resíduos utilizados para substituir o cimento. O processo de queima de resíduos pode influenciar o índice de atividade pozolânica, que pode ser melhorado controlando a temperatura e o tempo de retenção (38,39).

Os estudos revisados usaram 11 diferentes processos de calcinação. A maioria dos artigos (35%) utilizaram temperatura de 600°C e tempo de retenção de 2 horas. Este método foi utilizado no primeiro artigo publicado em 2006 (15) e esta temperatura foi determinada como a mais eficaz em 2016 (20). Recentemente, alguns estudos utilizaram a autocombustão para produzir cinzas e obtiveram bons resultados. A autocombustão está mais próxima do uso atual em que resíduos agrícolas são usados como biomassa para produção de energia. A Tabela 1 mostra a frequência de utilização de cada parâmetro.

Tabela 1- Condições de calcinação utilizadas na preparação de CFB.

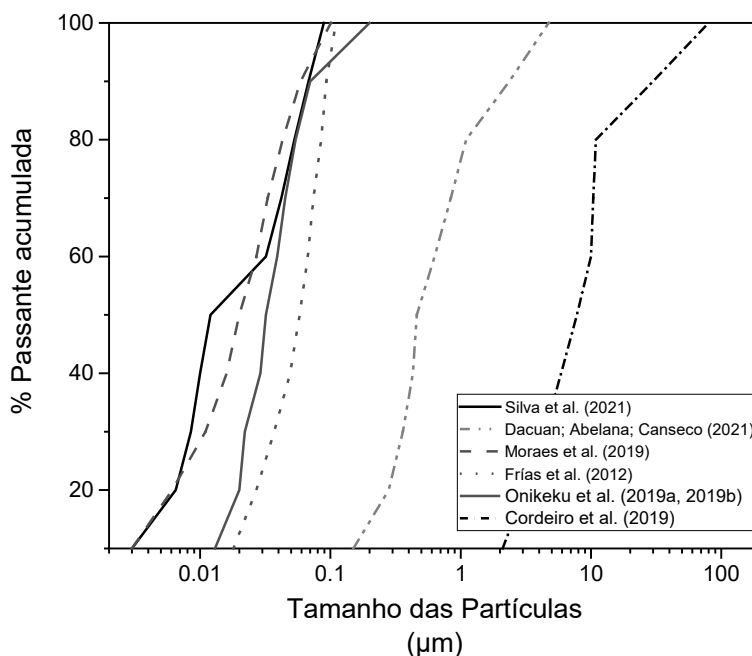
Temperatura (°C)	Tempo de retenção (Horas:minutos)	Frequência (%)	Autores
350	1	3	(21)
450	1	3	(21)
500	2	3	(20)
500	4	3	(40)
550	1	3	(21)
600	1	6	(22,25)
600	1:20	3	(17)
600	2	31	(15,16,18,20,24,32,34,35,37,41,42)
600	3	6	(36,43)
700	2	6	(20,44)
850	1	3	(21)
Autocombustão		14	(12,31,32,45,46)
Não mencionado		19	(26,30,47-51)

4.1 Características Físicas e Químicas da CFB

Após a calcinação, as cinzas usadas como MCS devem ser finamente divididas para melhorar a reatividade. A melhoria produzida pela moagem já foi comprovada

pelo método direto e indireto (52). Apesar da importância do tamanho das partículas, essa informação, assim como a distribuição granulométrica, está presente em apenas 41% dos artigos analisados. Para ASTM C618 (2019), a quantidade retida em 45 μm deve ser no máximo 34%, quando peneirado a úmido. A Figura 2 mostra a granulometria utilizada por todos os pesquisadores que divulgaram os dados. O método usualmente utilizado para as análises é a granulometria a laser e a análise por peneiramento, em menor escala.

Figura 2- Distribuições de tamanho de partícula para CFB.



Fonte: O autor

Pelas curvas granulométricas, o material utilizado por Dacuan, Abellana e Canseco (31) não atendeu ao requisito granulométrico da ASTM C618, o que poderia comprometer a reatividade do material e influenciar nos resultados de resistência à compressão. Entre os dados analisados na Figura 2, todos os autores utilizaram a granulometria a laser, exceto Dacuan, Abellana e Canseco (31), que realizaram a análise por meio do peneiramento. O uso de diferentes técnicas pode ter evidenciado as diferenças granulométricas. Davis, Kelly e Erk (53) criticam a análise por peneiramento, pois os resultados são apresentados em uma distribuição descontínua e com grande intervalo de tamanho.

O tamanho da partícula é importante porque uma maneira que as pozolanas contribuem na resistência mecânica e com o preenchimento, chamado de efeito filler. O efeito filler é o arranjo de partículas menores e a formação de sítios de nucleação, que tornam as pastas mais homogêneas e densas, reduzindo os efeitos na zona de transição entre a pasta e os agregados (54,55). O efeito filler de diferentes materiais pozolânicos já foi estudado, por exemplo, sílica ativa (56) e escória granulada de alto-forno (57). Pesquisas que investigaram o efeito filler na CFB são uma lacuna importante a ser explorada em estudos futuros.

As cinzas calcinadas e moídas estão prontas para serem testadas em compósitos cimentícios se atenderem aos requisitos químicos. Esta análise é importante porque as quantidades mínimas de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ são definidas por normas. Tanto a ASTM C618 quanto a NBR 12653 estabelecem esse valor em 70% para pozolanas naturais ou calcinadas (27,58). Esses compostos reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formado na reação de hidratação do cimento, gerando novos produtos resistentes (27,59). Os produtos de hidratação formados pelo dióxido de silício (SiO_2) são apresentados na Equação 1. Na reação de hidratação do aluminato ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), os principais produtos hidratados formados são $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (CAH10), $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (C2AH8), AH3 ($\text{Al}(\text{OH})_3$), C3AH6 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e AH3 ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (60,61). O óxido de ferro (Fe_2O_3) faz parte da ferrita nos cimentos e sua composição ideal é $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ (C4AF) (62). Compostos de alumínio e ferro produzem uma hidratação rápida, importante para as primeiras idades, e têm sido utilizados principalmente em ambiente marinho, pistas de aeroportos, entre outros. A Tabela 2 apresenta a composição química da CFB nos artigos analisados.

Tabela 2- Constituintes químicos (% do peso) das CFB nos artigos revisados.

SiO ₂	AlO ₃	Fe ₂ O ₃	S+A+F	SO ₃	LOI	Technique	Authors
88.58	0.10	0.13	88.81	-	-	MEV-EDX	(21)
83.56	2.56	2.63	88.75	0.95	9.17	FRX	(45)
80.40	1.22	0.71	82.33	1.07	8.04	FRX	(18,25)
80.27	1.99	1.92	84.18	3.31	-	FRX	(63)
78.71	1.01	0.54	80.26	1.00	3.93	FRX	(17)
78.29	1.21	0.72	80.22	1.87	-	MEV-EDX	(41)
78.00	4.96	2.01	84.97	-	1,58	Não informado	(50)
75.90	4.13	1.22	81.25	1.06	1.29	Não informado	(15,32)
75.10	3.55	1.34	79.99	1.69	5.32	FRX	(46)
74.70	0.15	0.21	75.06	4.18	3.98	FRX	(20)
74.23	2.27	2.34	78.84	0.84	11.34	FRX	(12)
73.90	0.13	0.11	74.14	4.23	4.14	FRX	(20)
72.81	3.49	2.00	78.30	0.15	5.71	FRX	(44)
72.75	5.90	1.85	80.50	0.00	0.00	Método gravimétrico	(37)
71.77	0.10	0.92	72.79	4.21	8.55	FRX	(20)
70.50	0.63	0.47	71.60	2.87	7.79	FRX	(22,30)
69.11	2.52	1.74	73.37	0.41	8.15	DRX	(48,49)
67.52	2.55	1.55	71.62	0.42	0.52	EAA	(24)
65.66	6.41	4.28	76.35	-	9.65	Não informado	(42)
49.44	20.20	0.59	70.23	0.43	6.70	FRX	(47)

As quantidades máximas de trióxido de enxofre (SO₃) e perda ao fogo também são definidas em norma. O trióxido de enxofre causa danos ao concreto, como expansão, degradação das propriedades mecânicas e maior suscetibilidade à corrosão (64). O teor máximo de SO₃ é de 4% e a perda ao fogo para este tipo de pozolana é de 10%. A Tabela 2 mostra os constituintes químicos do CFB e a técnica utilizada nas análises. A análise das características químicas está presente na grande maioria dos artigos (71%).

4.2 Atividade Pozolânica da CFB

Muitas metodologias experimentais têm sido desenvolvidas para determinar a atividade pozolânica. Esta avaliação pode ocorrer diretamente quando o consumo de Ca(OH)₂ é medido ou indiretamente quando outros parâmetros são analisados para

inferir a reatividade das cinzas, um exemplo de método indireto são os testes de resistência à compressão. O método químico acelerado é o método mais comumente usado para avaliação direta.

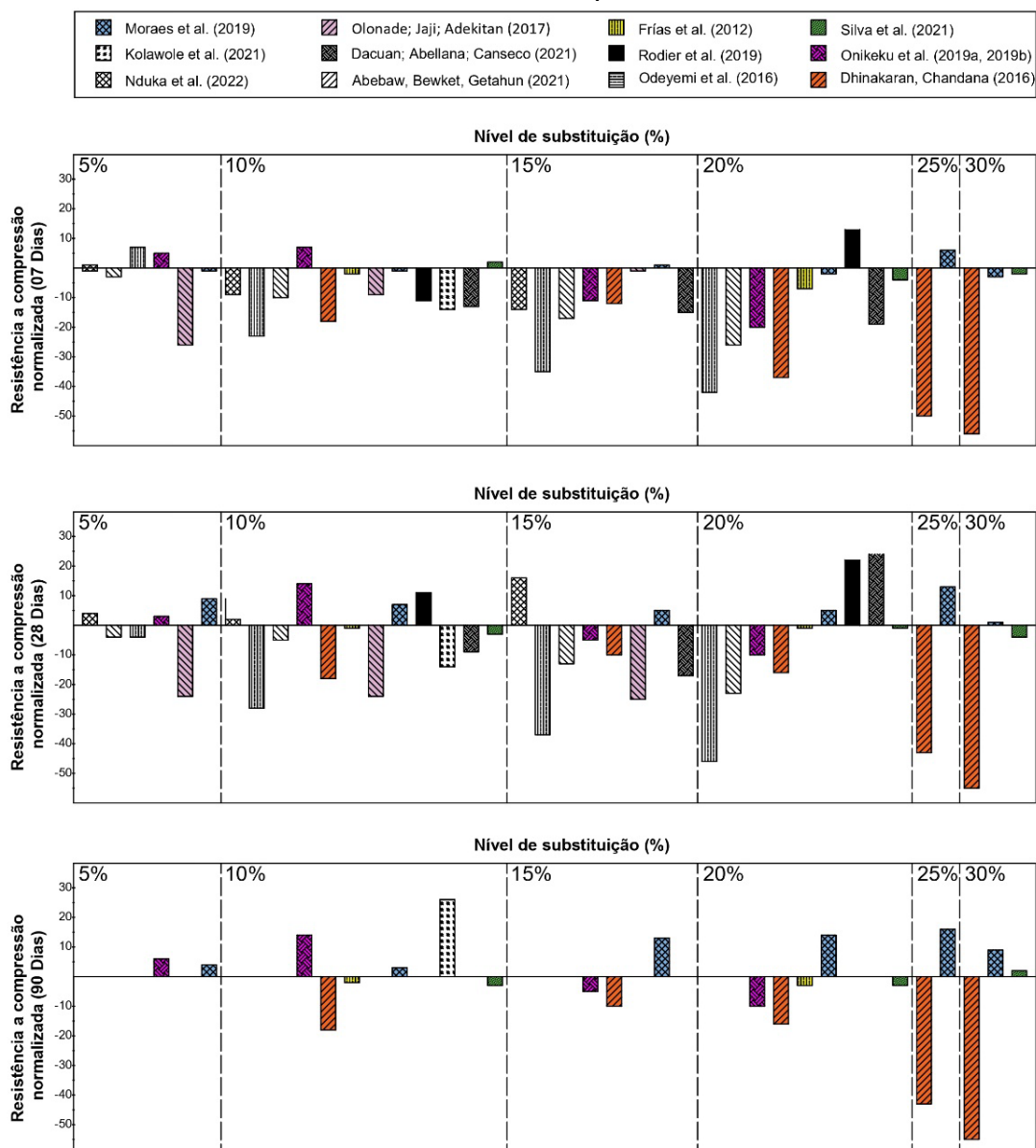
O Método Chapelle e o Teste Frattini são alguns dos procedimentos padronizados que utilizam a técnica do método químico acelerado. Em ambos os testes, a reatividade do material pozolânico é medida pelo consumo de Ca(OH)_2 por titulação com HCl diluído. As especificidades adotadas em cada ensaio, como temperatura, massa dos materiais e duração, não permitem estabelecer relação entre eles, dificultando a comparação dos resultados. Exemplo disso são os dados obtidos por Silva et al. (45) por meio do teste de Chapelle e os resultados obtidos por Moraes et al. (12) que realizaram o teste de Frattini. Embora a comparação dos dados não tenha sido possível, ambos os autores chegaram à mesma conclusão e classificaram o CFB como um material com alta reatividade pozolânica.

Dentre os métodos condutimétricos, a determinação da condutividade elétrica e do pH têm sido amplamente utilizados em diferentes estudos sobre CFB e outros materiais (12,20,25,30). Neste método, 100 mL de solução saturada de hidróxido de cálcio são preparados e misturados com 2,10 g de cinzas. Após a adição das cinzas, a solução é mantida à temperatura de 40°C sob agitação constante, em seguida, o pH e a condutividade elétrica são monitorados. O consumo de hidróxido de cálcio pela pozolana reduz o pH e a condutividade elétrica da suspensão. Os detalhes deste método são descritos por alguns autores, como McCarter e Tran (65) e Tashima et al. (66); no entanto, os autores utilizam diferentes adaptações, como a duração do monitoramento, em que os autores sugerem realizar por 7 dias, enquanto Villar-Cociña et al. (18) recomenda por 50 horas. Os resultados encontrados por esses autores para monitoramento da condutividade elétrica mostraram que o CFB apresentou alta reatividade inicial.

4.3 Influência da CFB na Resistência a Compressão

A Figura 3 apresenta a mudança nos valores de resistência relativa de misturas à base de CFB em diferentes níveis de substituição em relação aos compósitos de controle correspondentes em 7, 28 e 90 dias de cura.

Figura 3- Valores de resistência relativa de compósitos com CFB.



Fonte: O autor

Os dados mostram que as maiores perdas de resistência ocorreram nas idades iniciais, aos 7 e 28 dias. A maior diferença negativa da resistência da argamassa (56%) ocorreu aos 7 dias, com 30% CFB (40). Neste trabalho, o autor atribuiu a queda acentuada ao maior teor de água na mistura para manter a trabalhabilidade semelhante. A perda de resistência em idades precoces é esperada ao substituir o cimento por materiais pozolânicos, uma vez que as reações pozolânicas requerem a portlandita como produto das reações de hidratação produzidas em uma taxa mais lenta (67).

Aos 28 dias de cura, observa-se perda e ganho de resistência. Nesta idade, a maior perda (55%) ocorreu com 30% de cimento substituído por CFB (40). O ganho de resistência (22%) ocorreu quando 20% do cimento foi substituído por CFB (22).

Aos 91 dias de cura, vários autores obtiveram maior resistência em argamassas compostas com CFB, em todos os níveis de substituição (12,26,45). Kolawole et al. (26) obtiveram resistência 26% maior que o controle quando substituído 10% de cimento por CFB em argamassas. A Figura 3 demonstra claramente que a reatividade da CFB é maior com idades de cura maiores, apesar da rápida reatividade do resíduo (25), exigindo um tempo de reação relativamente longo, uma característica comum em materiais pozolânicos (68).

Correlacionando resistência à compressão e granulometria mostra que as argamassas moldadas por Dacuan, Abellana e Canseco (31) apresentaram grande desvio em relação às argamassas controle e a CFB utilizada teve granulometria superior às demais analisadas por outros autores (12,17,45) e acima da exigência normativa (26), o que ajuda a entender o resultado apresentado na resistência à compressão.

4.4 Análises de Durabilidade

A durabilidade dos materiais cimentícios (argamassa e concreto) é afetada por propriedades físicas, como adsorção e difusão, que determinam a entrada de substâncias agressivas externas (54). Dacuan, Abellana e Canseco (31) avaliaram a corrosão acelerada do concreto imerso em ácido sulfúrico a 5% (H_2SO_4) por um mês. Os resultados mostraram que a substituição de até 10% do cimento por CFB reduz a perda de massa devido ao ataque ácido e a entrada de produtos químicos ácidos. A avaliação da resistência à compressão das amostras após imersão em H_2SO_4 mostrou que 10% de substituição obteve resistência mecânica semelhante ao controle, enquanto 15 e 20% de substituição reduziram em 13,66% e 14,22%, respectivamente.

Moraes et al. (12) avaliaram a durabilidade de pastas com 10, 20 e 30% de substituição de cimento por CFB por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados mostram que a substituição de 20% apresentou a menor porosidade total. O efeito pozolânico do CFB contribuiu para a redução da porcentagem de poros capilares (10 nm – 1 μ m).

No entanto, existem poucas avaliações sobre a durabilidade de materiais cimentícios com CFB e, portanto, são necessários mais estudos com diferentes ensaios para aplicação na construção civil. Alguns testes renomados costumam ser realizados com materiais de construção para avaliar durabilidade e resistência a meios agressivos. Alguns dos testes são a determinação do coeficiente de migração de cloretos (54), a determinação da mudança de comprimento de barras de argamassa imersas em solução de sulfato (69) e a penetração de cloretos (70,71).

4.5 Custo e eficiência ambiental

Artigos mais recentes avaliaram a emissão de CO₂, energia incorporada e reduções de custo para constituintes e processamento de concretos e argamassas (22,45). Segundo Rodier et al. (22), cada tonelada de cimento produzida gera 1 tonelada de CO₂. Por outro lado, a queima de biomassa de CFB não aumenta as emissões de gases efeito estufa, uma vez que o CFB atua como um sequestrador de carbono durante seu ciclo de vida. A energia necessária para a produção de cimento é de 112 kWh/t, enquanto a CFB requer 0 kWh/t, devido à possibilidade de queima por autocombustão. Além disso, a energia necessária para obter o tamanho de partícula CFB necessário é cerca de 40% da energia total necessária para produzir cimento (22,45). Silva et al. (45) obtiveram substituições viáveis de até 30% do cimento por CFB, concluindo que ele pode reduzir as emissões de CO₂ (kgCO₂e) e a energia incorporada (MJ/m³) em até 28%, enquanto reduz o custo de produção do concreto em 23%.

Os resultados da Figura 3 mostram que a produção de materiais cimentícios por autocombustão apresenta propriedades mecânicas satisfatórias. Essa metodologia apresenta menor impacto ambiental e menor custo para a produção de argamassas e concretos pozolânicos mais sustentáveis.

5 CONCLUSÕES

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre a aplicação da CFB em materiais cimentícios. Com base na literatura publicada, pode-se concluir que:

1) A condição de calcinação de 600°C por 2 horas resulta em maior atividade pozolânica;

2) A quantidade de sílica amorfa foi medida por alguns autores que concluíram que temperaturas acima de 600°C causou a recristalização da sílica, diminuindo a reatividade pozolânica;

3) Em idades mais elevadas (28 e 90 dias) de cura, os compósitos moldados com CFB apresentaram maior resistência mecânica à compressão do que o controle e outros MCS, devido à reatividade pozolânica;

4) A correlação do tamanho de partículas com os resultados mecânicos sugere que granulometria menor resulta em maior atividade pozolânica e conseqüentemente maior resistência mecânica;

5) Argamassas e concretos com CFB são menos porosos e apresentaram melhores resultados na análise de durabilidade;

6) A substituição do cimento e o uso de CFB em compósitos se mostra uma ótima alternativa para economizar energia e diminuir as emissões de CO₂;

Os estudos sobre o CFB são recentes e poucos grupos de pesquisa avaliaram esse material. Além disso, a literatura cita poucas avaliações de durabilidade para permitir a aplicação em larga escala de CFB com grande potencial como material pozolânico na construção civil.

REFERENCIAS

1. Wei J, Cen K. Empirical assessing cement CO₂ emissions based on China's economic and social development during 2001–2030. *Sci Total Environ* [Internet]. 2019 Feb;653:200–11. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718342712>
2. Ruan S, Unluer C. Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. *J Clean Prod* [Internet]. 2016 Nov;137:258–73. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616309581>
3. Hasanbeigi A, Price L, Lin E. Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2012 Oct;16(8):6220–38. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112004601>
4. Thomas BS. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – A comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2018 Feb;82:3913–23. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117314661>
5. Chandra Paul S, Mbewe P, Kong S, Šavija B. Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries. *Materials (Basel)* [Internet]. 2019 Apr 3;12(7):1112. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1112>
6. Özbay EE, Erdemir M, Durmuş Hİ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Constr Build Mater* [Internet]. 2016 Feb;105:423–34. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308254>
7. UNE. BS EN 197-1: Cement. Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brazil: European Committee for Standardization; 2011. 38 p.
8. Wordsteel Association. Steel - the permanent material in the circular economy. Brussels; 2023.
9. Wordsteel Association. 2023 World Steel in Figures. Belgium; 17AD.
10. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2023 [Internet]. 2023. Available from: <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2023>
11. Charitha V, Athira VS, Jittin V, Bahurudeen A, Nanthagopalan P. Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. *Constr Build Mater* [Internet]. 2021 May;285:122851. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821006115>
12. Moraes MJB, Moraes JC, Tashima MMM, Akasaki JLL, Soriano L, Borrachero MV V., et al. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. *Constr Build Mater* [Internet]. 2019 May;208:369–80. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819304805>
13. Paré G, Trudel M-C, Jaana M, Kitsiou S. Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. *Inf Manag* [Internet]. 2015 Mar;52(2):183–99. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.im.2015.02.005>

from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378720614001116>

14. Galvão TF, Pereira MG. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiol e Serviços Saúde* [Internet]. 2014 Mar;23(1):183–4. Available from: http://scielo.iec.pa.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742014000100018&lng=en&nrm=iso&tlng=en
15. Dwivedi VN, Singh NP, Das SS, Singh NB. A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. *Int J Phys Sci*. 2006;1(3):106–11.
16. Singh NPBP, Das SS, Singh NPBP, Dwivedi VN. Hydration of bamboo leaf ash blended Portland cement. *Indian J Eng Mater Sci*. 2007;14(1):69–76.
17. Frías M, Savastano H, Villar E, Sánchez De Rojas MI, Santos S. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cem Concr Compos* [Internet]. 2012 Oct;34(9):1019–23. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946512001151>
18. Villar-Cociña E, Morales EV, Santos SF, Savastano H, Frías M. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cem Concr Compos*. 2011;33(1):68–73.
19. UNE. UNE-EN 197-1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: Comité Europeo de Normalización; 2011. 38 p.
20. Villar Cociña E, Savastano H, Rodier L, Lefran M, Frías M. Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters. *Waste and Biomass Valorization* [Internet]. 2016 Apr 15;9(4):691–9. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-016-9741-8>
21. Roselló J, Soriano L, Santamarina MP, Akasaki JL, Melges JLP, Payá J. Microscopy Characterization of Silica-Rich Agrowastes to be used in Cement Binders: Bamboo and Sugarcane Leaves. *Microsc Microanal* [Internet]. 2015 Oct 7;21(5):1314–26. Available from: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1431927615015019/type/journal_article
22. Rodier L, Villar-Cociña E, Ballesteros JM, Junior HS. Potential use of sugarcane bagasse and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. *J Clean Prod* [Internet]. 2019 Sep;231:54–63. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619317421>
23. Rodrigues MA de C, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Garcia CMP, Andreotti M. Adubação com KCl revestido na cultura do milho no Cerrado. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* [Internet]. 2014 Feb;18(2):127–33. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662014000200001&lng=pt&tlng=pt
24. Olonade KA, Jaji MB, Adekitan OA. Experimental comparison of selected pozzolanic materials. *African J Sci Technol Innov Dev* [Internet]. 2017 Jul 4;9(4):381–5. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20421338.2017.1327931>
25. Villar-Cociña E, Rodier L, Savastano H, Lefrán M, Rojas MF. A Comparative Study on the Pozzolanic Activity Between Bamboo Leaves Ash and Silica Fume: Kinetic Parameters. *Waste and Biomass Valorization* [Internet]. 2019;0(0):0. Available from:

<http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-00556-y>

26. Kolawole JT, Olusola KO, Babafemi AJ, Olalusi OB, Fanijo E. Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete. *Materialia* [Internet]. 2021 Mar;15:101045. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S258915292100048X>
27. ASTM. ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019. 5 p.
28. BS. BS EN 450-1: Fly ash for concrete Definition, specifications and conformity criteria. Comité Europeo de Normalización; 2012. 34 p.
29. ABNT. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas; 2014. 4 p.
30. Villar-Cociña E, Frías M, Savastano H, Rodier L, Sánchez de Rojas MI, Sáez del Bosque IF, et al. Quantitative Comparison of Binary Mix of Agro-Industrial Pozzolan Additions for Elaborating Ternary Cements: Kinetic Parameters. *Materials (Basel)* [Internet]. 2021 May 29;14(11):2944. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/11/2944>
31. Dacuan CN, Abellana VY, Canseco HAR. Assessment and Evaluation of Blended Cement Using Bamboo Leaf Ash BLASH Against Corrosion. *Civ Eng J* [Internet]. 2021 Jun 1;7(6):1015–35. Available from: <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/2841>
32. Amu OO, Adetuberu AA. Characteristics of bamboo leaf ash stabilization on lateritic soil in highway construction. *Int J Eng Technol*. 2010;2(4):212–9.
33. Amu OO, Babajide SS. Effects of Bamboo Leaf Ash on Lime Stabilized Lateritic Soil for Highway Construction. *Res J Appl Sci Eng Technol*. 2011;3(4):278–83.
34. Rahman ASA, Jais IBM, Sidek N, Ahmad J, Rosli MIF. Bamboo leaf ash as the stabilizer for soft soil treatment. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* [Internet]. 2018 Apr;140:012068. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/140/1/012068>
35. Inim IJ, Affiah UE, Eminue OO. Assessment of bamboo leaf ash/lime-stabilized lateritic soils as construction materials. *Innov Infrastruct Solut* [Internet]. 2018 Dec 20;3(1):32. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s41062-018-0134-7>
36. Wijaya W, Ismanti S, Rifa'i A. Soft Clay Improvement Using Bamboo Leaf Ash on CBR Values. *J Phys Conf Ser* [Internet]. 2020 Sep 1;1625(1):012007. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1625/1/012007>
37. Nnochiri ES, Ogundipe OM, Ola SA. Geotechnical and microstructural properties of cement-treated laterites stabilized with rice husk ash and bamboo leaf ash. *Acta Polytech* [Internet]. 2021 Dec 31;61(6):722–32. Available from: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/5791>
38. Cordeiro L de NP, Masuero AB, Molin DCCD, Souza PSL, Paes INL. Influence of the mixing processes in concrete with aggregates coarse recycled concrete. *Ambient Construído*. 2017;17(3):255–65.

39. Carpenter JS, Bai C, Hwang J-Y, Ikhmayies S, Li B, Monteiro SN, et al., editors. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2014* [Internet]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2014. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118888056>
40. Dhinakaran G, Chandana GH. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. *Jordan J Civ Eng*. 2016 Jul;10(3):279–89.
41. Ismanti S, Yasufuku N. Effect of bamboo leaf ash addition in cemented bamboo chips-sand soil mixture. *Low Technol Int*. 2017;19(1):13–26.
42. Abebaw G, Bewket B, Getahun S. Experimental Investigation on Effect of Partial Replacement of Cement with Bamboo Leaf Ash on Concrete Property. Lee BY, editor. *Adv Civ Eng* [Internet]. 2021 Dec 28;2021:1–9. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2021/6468444/>
43. Cordeiro GC, Lemos MN, Xavier KV, Lima CPF de. Production of agroindustrial ashes with pozzolanic activity via acid leaching, conjugated burning and ultrafine grinding. *Ambient Construído* [Internet]. 2020 Dec;20(4):189–203. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212020000400189&tIng=en
44. Odeyemi SO, Atoyebi OD, Kegbeyale OS, Anifowose MA, Odeyemi OT, Adeniyi AG, et al. Mechanical properties and microstructure of High-Performance Concrete with bamboo leaf ash as additive. *Clean Eng Technol* [Internet]. 2022 Feb;6:100352. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666790821003128>
45. Silva LHP, Tamashiro JR, Guedes de Paiva FF, Fernando dos Santos L, Teixeira SR, Kinoshita A, et al. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. *J Build Eng* [Internet]. 2021 Oct;42(May):102769. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221006276>
46. Nduka DO, Olawuyi BJ, Ajao AM, Okoye VC, Okigbo OM. Mechanical and durability property dimensions of sustainable bamboo leaf ash in high-performance concrete. *Clean Eng Technol* [Internet]. 2022 Dec;11:100583. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666790822001884>
47. Odeyemi SO, Adisa MO, Atoyebi OD, Wilson UN, Odeyemi OT. Optimal water-cement ratio and volume of superplasticizers for blended cement-bamboo leaf ash high-performance concrete. *Res Eng Struct Mater* [Internet]. 2022; Available from: <http://www.jresm.org/archive/resm2022.382ma0108.html>
48. Onikeku O, Shitote SM, Mwero J, Adedeji AA, Kanali C. Compressive Strength and Slump Prediction of Two Blended Agro Waste Materials Concretes. *Open Civ Eng J*. 2019;13(1):118–28.
49. Onikeku O, Shitote SM, Mwero J, Adedeji AA. Evaluation of Characteristics of Concrete Mixed with Bamboo Leaf Ash. *Open Constr Build Technol J* [Internet]. 2019 May 31;13(1):67–80. Available from: <https://openconstructionbuildingtechnologyjournal.com/VOLUME/13/PAGE/67/>
50. Umoh AA, Jonah UM. Use of coconut fiber as reinforcement in bamboo leaf ash blended cement- based composite panels. *Jordan J Civ Eng*. 2015;9(4):435–44.
51. Bello AA, Ige JA, Ibitoye GI. Geotechnical properties of lateritic soils stabilized with

- cement-bamboo leaf ash admixtures. *Int J Appl Eng Res.* 2014;9(21):9655–66.
52. Donatello S, Freeman-Pask A, Tyrer M, Cheeseman CR. Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. *Cem Concr Compos* [Internet]. 2010 Jan;32(1):54–61. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946509001449>
 53. Davis CR, Kelly SL, Erk KA. Comparing laser diffraction and optical microscopy for characterizing superabsorbent polymer particle morphology, size, and swelling capacity. *J Appl Polym Sci* [Internet]. 2018 Apr 14;135(14):46055. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.46055>
 54. Reyes E, Massana J, Alonso F, León N, Moragues A. Behaviour of a high-performance self-compacting concrete (HPSCC) with ternary mixtures of nano- and microsilica in the presence of chlorides. *Mater Construcción* [Internet]. 2020 May 18;70(339):221. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946501000579>
 55. Khan MNN, Jamil M, Karim MR, Zain MFM, Kaish ABMA. Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. *KSCE J Civ Eng* [Internet]. 2017 Jan 31;21(1):274–84. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12205-016-0737-5>
 56. Sounthararajan VM, Srinivasan K, Sivakumar A. Micro Filler Effects of Silica-Fume on the Setting and Hardened Properties of Concrete. *Res J Appl Sci Eng Technol* [Internet]. 2013 Aug 10;6(14):2649–54. Available from: <http://maxwellsci.com/jp/mspabstract.php?jid=RJASET&doi=rjaset.6.3753>
 57. Chegenizadeh A, Hanson SW, Nikraz H, Scott Kress C. Effects of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Used as Filler in Dense Graded Asphalt. *Appl Sci* [Internet]. 2022 Mar 8;12(6):2769. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/6/2769>
 58. ABNT. NBR 12653 - Pozzolanic materials — Requirements. Rio de Janeiro: ABNT; 2015. 6 p.
 59. ABNT. NBR 12653: Pozzolanic Material - Requirements. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas; 2015. 10 p.
 60. Heikal M, Radwan MM, Al-Duaij OK. Physico-mechanical characteristics and durability of calcium aluminate blended cement subject to different aggressive media. *Constr Build Mater* [Internet]. 2015 Mar;78:379–85. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815000537>
 61. Raab B, Pöllmann H. “C 2 AH 8 “ – $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot(8\pm n)\text{H}_2\text{O}$ – main hydration products of CAC. In: *European Powder Diffraction Conference; August 2010, Darmstadt, Germany* [Internet]. OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG; 2011. p. 349–54. Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1524/9783486991321-058/html>
 62. Emanuelson A, Henderson E, Hansen S. Hydration of ferrite $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ in the presence of sulphates and bases. *Cem Concr Res.* 1996;26(11):1689–94.
 63. G. D, Chandana GH. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. *Jordan J Civ Eng* [Internet]. 2016 Jul 1;10(3):279–89. Available from: https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/show_paper.php?pid=3601
 64. Capraro APB, Hoppe Filho J, Medeiros MH. Influence of internal sulfate attack on

- cement paste properties: contamination by pyrite. Rev IBRACON Estruturas e Mater [Internet]. 2021;14(6). Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952021000600203&tIng=en
65. McCarter WJ, Tran D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide. Constr Build Mater [Internet]. 1996 Apr;10(3):179–84. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0950061895000895>
 66. Tashima MM, Soriano L, Monzó J, Borrachero M V., Akasaki JL, Payá J. New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions. Mater Construcción [Internet]. 2014 Dec 30;64(316):e032. Available from: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1563/1888>
 67. Ince C, Shehata BMH, Derogar S, Ball RJ. Towards the development of sustainable concrete incorporating waste tyre rubbers: A long-term study of physical, mechanical & durability properties and environmental impact. J Clean Prod [Internet]. 2022 Feb;334:130223. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652621043882>
 68. Khan RI, Ashraf W. Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development. Constr Build Mater [Internet]. 2019 Sep;218:150–61. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181931222X>
 69. ASTM. ASTM C1012-04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2004. 6 p.
 70. CEN/TS S-T. CEN/TS 12390-11: Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion. European Committee for Standardization; 2010. 23 p.
 71. UNE. UNE-EN 14629: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of chloride content in hardened concrete. Brussels: European Committee for Standardization; 2007. 11 p.

CAPÍTULO 4: EFICIÊNCIA DA CURA INTERNA POR MEIO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES EM ARGAMASSAS COMPOSTAS COM CINZA DE FOLHA DE BAMBU.

RESUMO

O cimento é um ligante hidráulico por isso a presença adequada de água durante a fase de cura pode aumentar até 30% da resistência a compressão do concreto. A cura pode ser realizada de diferentes maneiras e mais recentemente foi proposto um método que utiliza polímeros superabsorventes (PSA) chamado cura interna. Este trabalho investigou o uso de um PSA comercial – Carbopol 940 (C940) – na cura interna de argamassas compostas com 12,50% e 25% de cinza de folha de bambu (CFB). A caracterização do C940 evidenciou que o material não apresentava todas as características desejadas para aplicação enquanto agente de cura interna em materiais cimentícios. A granulometria e cinética de absorção/dessorção apresentada pelo C940 não se mostrou adequada para tal aplicação. A caracterização da CFB mostrou um material com composição química, granulometria e mineralogia adequada para seu emprego enquanto material pozolânico. Os ensaios em argamassa, com substituição parcial do cimento por CFB e adição do C940 para realização da cura interna não retornou resultados positivos. A resistência a compressão das argamassas foi comprometida devido as grandes partículas do C940 que deixaram vazios na estrutura cimentícia e a rápida dessorção do PSA causou uma hidratação deficiente da pasta.

Palavras-chave: Cura interna, carbopol 940, cinza de folha de bambu, resistência a compressão.

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um ligante hidráulico por isso necessita de água para produzir produtos resistentes. Na matriz cimentícia a água tem, basicamente, duas funções. A primeira é participar da reação química de hidratação do cimento e a segunda é proporcionar a trabalhabilidade necessária para moldagem das estruturas (Hover, 2011; Mu et al., 2017).

Após a moldagem das estruturas alguns cuidados para manutenção da temperatura e umidade do compósito cimentício devem ser tomados para atingir as propriedades desejadas, este procedimento é chamado de cura (Bediako; Kevern; Amankwah, 2015; Ma; Liu; Shi, 2019).

O processo de hidratação do cimento ocorre mediante a liberação de calor, em uma reação exotérmica, o que torna ainda mais importante os cuidados com o processo de cura. Estes cuidados são importantes para assegurar que não haja a perda acelerada de água da matriz cimentícia, prejudicando a eficiência do compósito. A perda acelerada de água impede a hidratação das partículas de cimento além de criar poros que reduzem a resistência e formam vias para entrada de agentes nocivos que reduzem a vida útil da estrutura (Ma; Liu; Shi, 2019).

A cura apropriada pode aumentar entre 14% e 30% a resistência a compressão do concreto, além de evitar fissuras, retração por auto dessecação, aumento da absorção etc (Ramos; Monterio; Marzano Junior, 2021; Souza et al., 2019).

A literatura apresenta diferentes maneiras para realização da cura adequada: cobertura de superfícies de concreto com juta ou serapilheira, aspersão de água, método de lagoas, cura por membrana, cura por imersão, cura a vapor etc (Bediako; Kevern; Amankwah, 2015). Em pequenas e médias construções usualmente é utilizado o método de aspersão algumas vezes ao dia, entretanto, dificilmente isso é realizado de maneira uniforme e ideal.

Além dos métodos tradicionais de cura, em 2001, um processo chamado cura interna foi proposto por Jensen e Hansen para evitar a auto dessecação em concretos de alto desempenho (Jensen; Hansen, 2001). O método proposto consiste em usar polímeros superabsorventes (PSA) para formar macro poros cheios de água no concreto fresco.

Para o uso de PSAs no processo de cura interna, Esteves (Esteves, 2011) recomenda atenção especial na capacidade de absorção deste material. Esta

característica é importante principalmente pelos vazios deixados pelo PSA após o processo de dessorção. Estes vazios podem ser prejudiciais a resistência mecânica dos compostos em curto prazo e propiciar o aparecimento de patologias e diminuir a vida útil das estruturas em períodos maiores.

O uso de materiais pozolânicos como materiais cimentícios suplementares (MCS) já é uma prática comum na indústria cimentícia. Os MCS promovem ganhos ambientais e técnicos (Silva et al., 2021). Entre as diversas vantagens podemos citar o efeito filler, definido como a capacidade de preencher vazios, aumentar a densidade e a resistência a compressão dos compósitos. Diferentes materiais têm sido estudados para este fim entretanto nos últimos anos a cinza da folha de bambu (CFB) tem se destacado enquanto material pozolânico (Paiva et al., 2021; Bamboo as a Sustainable Building Material Silva et al., 2023).

Assim, este trabalho buscou avaliar a utilização de um PSA comercial na realização de cura interna e a influência da incorporação de cinza de folha de bambu em compósitos cimentícios curados da mesma forma.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Matrizes de Cimento Portland

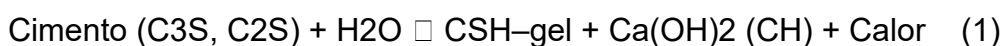
Diferentes tipos de aglomerantes foram utilizados desde o Egito antigo e impérios gregos e romanos onde se desenvolveu o primeiro concreto da história (Neville, 2016). Já o cimento Portland mais próximo de como conhecemos hoje teve sua patente depositada em 1824 pelo construtor Joseph Aspdin, entretanto, o processo de clinquerização foi descoberto mais tarde, em 1845 por Isaac Johnson (Igliński; Buczkowski, 2017).

Desde então o cimento Portland se tornou o material de construção mais importante da história e o consumo no Brasil e no mundo vem crescendo ano após ano. Em 2022, a produção brasileira de cimento foi de 65 milhões de toneladas (U.S. Geological Survey, 2023); na construção civil é o principal insumo das natas, pastas, argamassas e concretos, variando em quantidade e tipo conforme as necessidades de cada projeto.

No Brasil, o cimento Portland foi dividido em 5 categorias principais, denominadas CPI, CPII, CPIII, CPIV e CPV. O cimento CPI, também conhecido como Cimento Portland Comum são aqueles produzidos sem qualquer adição além de gesso, que é utilizado para ajustar o tempo de pega (ABNT, 2018). Estes cimentos por sua pureza e valor dificilmente são encontrados no mercado brasileiro sendo produzidos apenas para demandas específicas; O cimento CPII é chamado de cimento composto e correspondem a 70% da produção brasileira (Ambrozewicz, 2012). De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento CPII apresenta entre 6 e 34% de adições (material pozolânico ou escória de alto-forno ou filler). Os cimentos CPIII e CPIV são chamados de Cimento Portland de alto-forno e Cimento Portland Pozolânico, respectivamente, isto porque eles apresentam altas quantidades de escória de alto-forno e de material pozolânico em sua composição. Por fim, o Cimento CPV ou Cimento de Alta Resistencia Inicial, mais conhecido por ARI, apresenta uma moagem mais fina e uma dosagem que permite atingir altas resistências já nos primeiros dias de cura (ABNT, 2018).

Independentemente do tipo de cimento, o processo de hidratação e formação das matrizes cimentícias ocorre basicamente da mesma forma. Por ser um aglomerante hidráulico, ao entrar em contato com a água os compostos presente no cimento se hidratam formando produtos resistentes. Os principais compostos

presentes no cimento são C3S (silicato tricálcico – alita), C2S (silicato dicálcico – belita), C3A (aluminato tricálcico – aluminato) e C4AF (ferroaluminato tetracálcico – ferrita) e são eles que em diferentes velocidades e calor de hidratação serão responsáveis pelo endurecimento e resistência mecânica conforme Equação 1.



O processo de hidratação do cimento ocorre mediante geração de calor, em uma reação exotérmica, perfazendo de maneira mais rápida com o aumento da finura do cimento, o que também exige maiores cuidados no processo de cura das estruturas. Com o surgimento do processo de cura interna a pesquisa, caracterização e o conhecimento de diferentes polímeros superabsorventes (PSA) ganharam maior importância visto que eles podem contribuir no processo de cura, entretanto quando não utilizados corretamente podem também prejudicar as propriedades mecânicas dos compósitos.

2.2 Polímeros Superabsorventes

Os PSA, também chamados de hidrogéis, podem ser definidos como redes macromoleculares de materiais poliméricos sintéticos ou naturais, hidrofílicos, que têm a capacidade de absorver uma grande quantidade de líquido do ambiente e de retê-lo dentro da sua estrutura, sem dissolução (Esteves, 2011; Ma; Wen, 2020; Zohuriaan-Mehr et al., 2010).

A cura interna só surgiu 63 anos após a preparação do primeiro PSA. Os primeiros hidrogéis foram preparados em 1938, porém o seu uso comercial só foi possível cerca de 10 anos depois em lentes de contato, marcando uma revolução na oftalmologia (Zohuriaan-Mehr et al., 2010). Hoje cerca de 95% dos PSAs produzidos são utilizados em fraldas descartáveis e absorventes femininos, mas existe uma gama variada de aplicações destes produtos (Jensen; Hansen, 2001; Manzano et al., 2015).

Na agricultura os PSAs vem sendo utilizados desde a década de 70 no manejo de áreas secas afim de reter e garantir um reservatório de água ao redor das raízes das plantas (Amulya; Ravi Shankar, 2020) e, mais recentemente, na liberação controlada de agroquímicos, evitando problemas ambientais de volatilização, lixiviação e escoamento destes produtos no ambiente (Zheng et al., 2020). A medicina, pioneira no uso comercial, faz uso destes materiais em diferentes procedimentos, alguns exemplos são o transporte de medicamentos e de células no reparo de tecidos,

a remoção de fluidos corporais durante cirurgias (Zohuriaan-Mehr; Kabiri, 2008) e eliminação de água corporal no tratamento de edemas (Sannino et al., 2003). No tratamento de água os PSAs são capazes de absorver e remover corantes sintéticos e metais pesados (Sinha; Chakma, 2019); Outras aplicações onde os PSAs estão presentes hoje são na indústria têxtil (Bhuiyan et al., 2019) e nos purificadores de ar (Li et al., 2020).

A síntese dos PSAs pode ocorrer de duas formas principais: polimerização por suspensão ou polimerização por solução (Jensen; Hansen, 2001; Manzano et al., 2015; Mechtcherine, 2016). Com o auxílio de um microscópio é possível observar que a polimerização por solução produz polímeros de forma irregular e com superfícies fraturadas, isso devido ao processo de moagem empregado no método. Já a polimerização por suspensão produz polímeros com formato esférico, podendo ser individuais ou aglomerados como framboesas. O primeiro método é mais comum na produção industrial de PSAs enquanto o segundo, pela facilidade de controle das condições de polimerizações, é mais usado em laboratórios de pesquisa (Omidian et al., 1999). A polimerização por suspensão apresenta ainda como vantagem o maior controle no tamanho das partículas (Davis; Kelly; Erk, 2018).

A caracterização dos PSAs é usualmente focada em outras aplicações industriais que não o uso deste material enquanto agente de cura interna para compósitos cimentícios uma vez que esta não é uma aplicação consolidada e comum no mercado. Ensaio e metodologias para este fim ainda vem sendo construídas (Esteves, 2011).

O uso de PSA em matrizes cimentícias deve ser precedido por testes de absorvidade, cinética de absorção e dessorção. Os principais fatores que influenciam nestas propriedades são a composição molecular, o tamanho das partículas do PSA e a composição iônica da solução aquosa (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017). Outros autores também descrevem a capacidade de absorção e o tamanho de partículas do PSA como sendo caracterizações chave para a sua aplicação na cura interna (Esteves, 2011; Palma e Silva et al., 2022). O destaque desta característica se deve principalmente pelos vazios deixados pelas partículas do PSA após o processo de disponibilização da água para a matriz cimentícia prejudicando as propriedades mecânicas a curto prazo e a vida útil das estruturas de maneira mais prolongada.

2.2.1 Carbopol 940

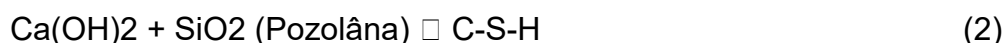
O carbopol 940 (C940) é um polímero sintético, de alto peso molecular, apresentado na forma de um pó muito fino e branco, com alta viscosidade quando entumecido e usados frequentemente em produtos de higiene pessoal, cosméticos e na medicina como componente de sistema de liberação de drogas (Chen et al., 2013; Ismail et al., 2021). O carbopol 940 é o nome comercial do PSA cujo grupo funcional hidrofílico é o ácido poliacrílico, com fórmula estrutural $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_n\text{-COOH}$. Os principais PSAs utilizados em matrizes cimentícias utilizam o ácido poliacrílico ou a acrilamida como monômero (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017). A vantagem do carbopol em relação a outros PSA, como o hidroxipropílico de metilcelulose, é que ele funciona com água a temperatura ambiente, diferente dos outros que necessitam de temperaturas elevadas (Safitri; Nawangsari; Febrina, 2021).

O C940 tem bastante disponibilidade e preço baixo, quando comparado a outros PSA, razões pelo qual foi um dos principais gelificantes utilizados na produção de álcool em gel, importante sobretudo durante a pandemia causada pelo corona vírus (SAR-CoV-2). Uma das maneiras eficazes de prevenir o covid-19 foi com a higienização das mãos que quando não era possível fazer com água e sabão acontecia com o uso de álcool em gel.

Além do C940, utilizado neste trabalho, é possível encontrar carbopol com os seguintes códigos 910, 934, 941 e 934P. Estes valores são indicativos do peso molecular e dos componentes específicos do polímero (Ismail et al., 2021).

2.3 Materiais pozolânicos

Pozolanas são materiais silicosos ou sílico aluminosos que por si só apresentam pouca ou nenhuma reatividade, porém quando finamente divididos, na presença de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e água reagem para formar produtos resistentes semelhantes aos encontrados pela hidratação do cimento (Equação 2) (HEWLETT, 2008).



O dióxido de silício representa entre 50-70% da massa do solo. O que explica sua presença, em diferentes quantidades, em todas as vegetais que tem como substrato o solo (Ma; Yamaji, 2006). A dissolução do dióxido de silício em água forma o ácido silícico (Equação 3) que é absorvido pelas plantas e o depositam na parte aérea na forma de sílica amorfa. Como a entrada do silício ocorre com a entrada de

seiva bruta a deposição aumenta com a transpiração da planta (Norsuraya; Fazlena; Norhasyimi, 2016).



O uso dos materiais pozolânicos na construção civil ocorreu muito antes do cimento Portland, civilizações minoicas, gregas e romanas já utilizavam este material antes de Cristo. O nome do material se deu em função das cinzas do vulcão Vesúvio na região de Puzzuoli, na Itália que apresentavam propriedade pozolânica (ABNT, 2018; Maciel (transl), 2009). Edificações como o Patheon e a Ponte do Gard são algumas das edificações históricas construídas com material pozolânico, o que demonstra as propriedades duráveis deste material (Becerra-Duitama; Rojas-Avellaneda, 2023; Snellings; Mertens; Elsen, 2012).

Com a invenção do cimento, em 1824, e seu aperfeiçoamento em 1845, por Joseph Aspdin e Isaac Johnson, respectivamente, as pozolanas foram gradativamente substituídas e a partir da segunda metade do século 19, impulsionados também pelas consequências da 2ª Guerra Mundial, a produção de cimento teve um salto de mais 620% entre os anos 1950 e 1980 (Igliński; Buczkowski, 2017).

As pozolanas podem ser classificadas em naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são aquelas que podem ser encontradas na natureza e na maioria dos casos necessita apenas de cuidados com moagem e peneiramento. Alguns exemplos de pozolanas naturais são os materiais de origem vulcânica (escórias e cinzas), pedrapomes, argilas calcinas naturalmente pelo fluxo de lavas, terra de diatomáceas etc (Becerra-Duitama; Rojas-Avellaneda, 2023; Snellings; Mertens; Elsen, 2012). Já as pozolanas artificiais, adquirem essa propriedade a partir de um processo industrial e em muitos casos são resíduos ou co-produtos de processos de produção de outros materiais. Alguns exemplos de pozolanas artificiais que são resíduos industriais são as cinzas volantes, a escória de alto forno, a sílica ativa. As cinzas da casca de arroz, do bagaço da cana-de-açúcar são pozolanas formadas na queima de materiais quando utilizados como biomassa na agroindústria. Por fim, outra possibilidade de obtenção artificialmente das pozolanas é calcinando argilas, um exemplo destas pozolanas é o metaulim (Becerra-Duitama; Rojas-Avellaneda, 2023; Massazza, 1993; Snellings; Mertens; Elsen, 2012).

O uso das pozolanas naturais está limitado as regiões onde estes materiais estão disponíveis, daí a importância de conhecer e caracterizar diferentes materiais,

com disponibilidade local a fim de minimizar custos e impactos ambientais do transporte.

3 METODOLOGIA

3.1 Material

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para produção das argamassas foi do tipo CPV-ARI. Este cimento não apresenta adições além de material carbonático em até 10% (ABNT, 2018), permitindo que se faça uma avaliação mais clara da influência da incorporação da CFB e do PSA.

3.1.2 Cinza da Folha de Bambu (CFB)

A produção da cinza de bambu se deu inicialmente pela coleta das folhas secas, da espécie *Babusa vulgaris*, nas proximidades da Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, Campus II em Presidente Prudente, SP. A espécie foi escolhida por se tratar das mais comuns e abundantes no Brasil, além de ser recomendada pelo International Network For Bamboo And Rattan (INBAR) por apresentar propriedades mecânicas que permitem seu emprego na construção civil (PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, 2008).

O processo de queima ocorreu por autocombustão. Neste método é fornecido energia térmica somente até que as folhas comecem a queimar. Este método não consome energia e se aproxima daquele utilizado por indústrias que usam biomassa para produção de energia. A Figura 1a mostra a realização da queima. Neste processo não há controle de temperatura, entretanto, o monitoramento desta foi realizado com a utilização de um multímetro Minipa, modelo ET-2507A e um termopar (Figura 1b).

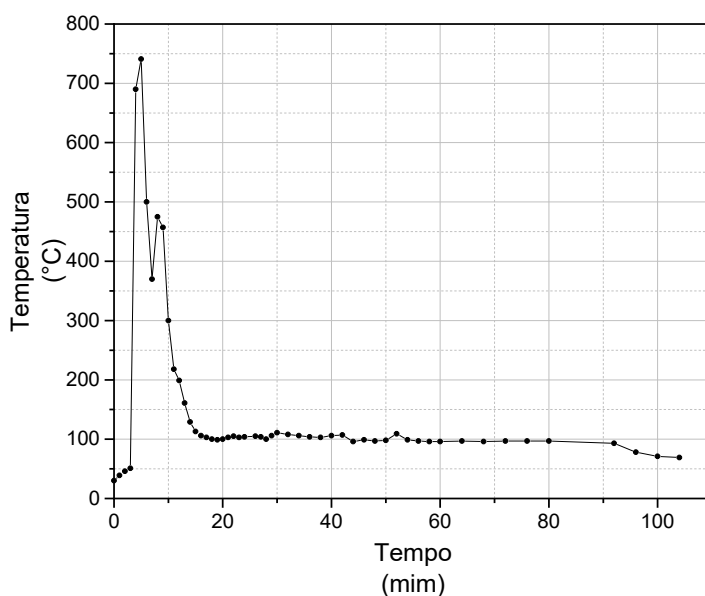
Figura 1- a) Queima da folha de bambu. b) Monitoramento da temperatura



Fonte: O autor

A Figura 2 mostra o controle da temperatura realizado durante os primeiros 100 minutos. Após o processo de queima a cinza passou por um processo de moagem em um moinho de bolas, da marca solab, modelo SL-34/2-DT pelo período de uma hora, cada 5 quilos do material.

Figura 2- Controle de temperatura na queima da CFB.



Fonte: O autor

3.1.3 Carbopol

O carbopol utilizado foi produzido pela OM Química Industria e Comercio de Produtos Químicos Ltda. A embalagem do produto ou a empresa não disponibiliza nenhuma informação sobre sua caracterização.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização da CFB

A caracterização da CFB se iniciou pela determinação da composição química, realizada com auxílio do espectrômetro de fluorescência de raios x (FRX) da marca Shimadzu, modelo XRF 180. A granulometria das partículas foi analisada por espalhamento dinâmico de luz (DSL) no ZetaSizer Nano ZS (Malvern). Para determinação da mineralogia da cinza a difração de raios X (DRX) foi realizada no RX Diffractometer Seifert TT 3003. Os picos constatados tiveram as fases identificadas a partir do software Crystallographica Search-Match, versão 2.1, a partir de método comparativo direto entre os difratogramas obtidos e fichas do banco de dados cristalográficos JCPDS-ICDD (Joint Committee on Powder Diffraction Standards – International Center for Diffraction Data).

3.2.2 Caracterização do Carbopol 940

Formato das partículas

A caracterização do formato das partículas foi realizada através de imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo JSM7500F da Jeol. A morfologia das partículas permite determinar o método de polimerização utilizado na síntese. O microscópio ótico é descrito por Schröfl; Snoeck; Mechtcherine (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017) como a forma mais relevante para este tipo de análise entretanto, com aumento de 1500x, que é o máximo possível no equipamento que tive acesso, não foi possível visualizar com clareza as partículas, devido ao seu pequeno tamanho, o que levou a escolha do MEV como alternativa.

Davis, Kelly e Erk (Davis; Kelly; Erk, 2018) argumentam que a caracterização morfológica do PSA é necessária para escolha da técnica correta de determinação do tamanho das partículas e da capacidade de entumescimento. Além disso, a morfologia determinará o formato e o tamanho dos vazios deixados no polímero cimentício podendo alterar a resistência após curado.

Difração de Raios X

A caracterização mineralógica do carbopol foi obtida com equipamento de difração de raios x modelo XRD-6000, LabX. O difratograma foi realizado com ângulo de varredura entre 5° a 40°.

Distribuição Granulométrica

Para determinação da distribuição granulométrica do C940, foram utilizadas duas técnicas. Primeiramente, por sua simplicidade e baixo custo foi utilizado o peneiramento. Neste método Schröfl; Snoeck; Mechtcherine (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017) sugere o uso das peneiras com abertura de malha de 63, 125, 250, 500 e 1000 μm , entretanto, essas medidas não são usuais no Brasil, por isso as aberturas de malhas utilizadas foram 53, 74, 150, 250, 297, 590 e 1190 μm . Estas peneiras foram escolhidas pois extrapolavam a sugestão da bibliografia de referência. Além disso, Davis, Kelly e Erk (Davis; Kelly; Erk, 2018) criticam o fato da técnica resultar em uma distribuição descontínua e com grande intervalo de tamanho entre as peneiras assim aumentando o número de peneiras este problema é minimizado.

Além da técnica de peneiramento também foi utilizado o espalhamento dinâmico de luz (DSL) no equipamento ZetaSizer Nano ZS (Malvern), em solução de isopropanol para evitar absorção.

Espectroscopia de Infravermelho - FTIR

Os espectros FTIR do carbopol foram registrados no equipamento da marca Bruker, modelo Ivenio, de acordo com a metodologia de refletância total atenuada (ATR). Os espectros das amostras foram registrados na resolução de 2 cm^{-1} e a faixa de varredura foi de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} .

Análise térmica

A análise termogravimétrica (TG) e de calorimetria exploratória diferencial do carbopol foram realizadas utilizando o equipamento modelo SDT Q600 da TA Instruments.

Avaliação da cinética de absorção e dessorção

A capacidade de absorção do PSA foi medida através do método do saquinho de chá (Tea-bag Method). A técnica consiste em pesar aproximadamente 20 g de PSA, acondicionar em um saquinho de chá e inserir o saquinho com o hidrogel em um béquer com água destilada. Em tempos pré-determinados o saquinho é retirado da água e pesado para determinar a absorção do hidrogel. Este método é descrito por

diferentes normas internacionais (JSA, 1996, 2021), porém uma distinção foi recomendada por Mechtcherine et al. (Mechtcherine et al., 2018) e seguida neste trabalho.

Esteves (Esteves, 2011) destaca positivamente a rapidez com que este ensaio pode ser realizado. No entanto, ressalta que a precisão obtida pode ser um problema, uma vez que não leva em consideração o espaço intersticial preenchido pela fase líquida que fica presa por forças físicas. Schröfl, Snoeck e Mechtcherine (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017) também mencionam esta desvantagem sistemática, mas destacam que o método é muito comum e amplamente aceito.

A fim de quantificar a capacidade de dessorção Schröfl, Snoeck e Mechtcherine (Schröfl; Snoeck; Mechtcherine, 2017) orientam que uma quantidade de PSA seco deve ser pesado e posteriormente imerso no líquido de teste até a estabilidade de inchamento. Após este período, o hidrogel deve ser seco nas mesmas condições iniciais até a constância da massa. A capacidade de dessorção será dada pela porcentagem de água liberada pelo polímero após o estado turgido.

3.2.3 Experimentação com Argamassas

Para experimentação com argamassas e análise da eficiência do PSA na cura do compósito o traço utilizado foi 1:2,75 (cimento : areia) e fator água : cimento de 0,485 (ASTM C109 / C109M-20b, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)ASTM, 2020). A proporção para incorporação de PSA se deu da Equação 4, descrita pelo método de Bentz and Snyder (Bentz; Snyder, 1999).

$$M_{PSA} = \frac{C_c \cdot R_q \cdot \alpha_{m\acute{a}x}}{S \cdot \Phi_{PSA}} \quad (4)$$

Onde:

M_{PSA} = Massa de PSA (em kg/m³)

C_c = Consumo de cimento (em kg/m³)

R_q = Retração química (g/água/g)

$\alpha_{m\acute{a}x}$ = Grau de hidratação do PSA

S = Grau de saturação do PSA

Φ_{PSA} = Absorção do PSA (em g/g)

O método adotado indicou que a quantidade ideal de PSA a ser utilizado para cura interna seria de 0,20% de PSA em relação a massa de cimento. Buscando

realizar uma investigação mais abrangente foram moldadas, além da argamassa com 0,20% de PSA, também argamassas com 0,10% e 0,30% de PSA. O carbopol foi inserido pré-saturado nas argamassas. Isto é necessário para impedir que o PSA absorva água necessária a hidratação do cimento. Gomes (Gomes, 2014) menciona que polímeros superabsorventes tem melhores desempenho em soluções de pH menores e como a água de amassamento tem pH maior que água é necessário já inseri-lo previamente entumecido.

Para comparar a eficiência da cura interna também foram produzidas argamassas curadas por imersão e uma argamassa sem o PSA (0CFB-SC) mas que foi mantida nas mesmas condições da argamassa com PSA. As argamassas curadas com PSA foram mantidas a $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 55%.

A fim de avaliar a influência da CFB na cura interna foram produzidas argamassas cujo cimento foi substituído em 12,50% e 25% por CFB, curados das duas maneiras, por imersão e por cura interna com C940. A Tabela 1 apresenta a composição das misturas produzidas.

O preparo do compósito seguiu as recomendações da norma C305 (ASTM C305-20, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency ASTM, 2020), utilizando uma argamassadeira planetária (EMIC, AG5). As argamassas produzidas foram usadas para moldar corpos de prova prismáticos (4x4x16 cm) que foram ensaiados a compressão, de acordo com a norma C349-18 (ASTM, 2018).

Tabela 1- Proporções da mistura das argamassas

	Traços	Cimento (%)	CFB (%)	Água/Cimento	Carbopol (%)	Plastificante (%)
Cura úmida	0CFB-CU	100	0	0,485	0	0
	12,5CFB-CU	87,50	12,50	0,485*	0	0,43
	25CFB-CU	75	25	0,485*	0	0,86
Sem cura	0CFB-SC	100	0	0,485	0	0
0,10% C940	0CFB-0,1PSA	100	0	0,485 ⁺	0,10	0
	12,5CFB-0,1PSA	87,50	12,50	0,485 ⁺	0,10	0
	25CFB-0,1PSA	75	25	0,485 ⁺	0,10	0
0,20% C940	0CFB-0,2PSA	100	0	0,485 ⁺	0,20	0
	12,5CFB-0,2PSA	87,50	12,50	0,485 ⁺	0,20	0
	25CFB-0,2PSA	75	25	0,485 ⁺	0,20	0
0,30% C940	0CFB-0,3PSA	100	0	0,485 ⁺	0,30	0
	12,5CFB-0,3PSA	87,50	12,50	0,485 ⁺	0,30	0
	25CFB-0,3PSA	75	25	0,485 ⁺	0,30	0

* Plastificante

+ 36,24 g de água por grama de carbopol seco

Fonte: O autor

Antes da moldagem realizou-se o controle da consistência do compósito seguindo o método descrito pela norma C1437 (ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar ASTM, 2020), esta norma é similar a NBR 13267 empregada no Brasil (ABNT, 2016). As argamassas ensaiadas para consistência não tiveram superplastificante adicionados para possibilitar avaliar a influência da CFB e do PSA na mistura.

Após o processo de cura, a resistência a compressão foi medida aos 7, 28 dias usando uma prensa universal modelo 23-100 da Instron Emic.

3.2.4 Análise Estatística

Os dados de resistência a compressão foram analisados usando o software Origin (OriginLab Corporation, Northampton, USA). A normalidade dos dados foi confirmada com o teste de Shapiro Wilk e o teste one way ANOVA usado na análise da resistência a compressão. Foram consideradas diferenças estatisticamente significativas quando $p < 0,05$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da CFB

4.1.1 Composição Química

A Tabela 2 apresenta a composição química da CFB, obtida por fluorescência de raios X, e do cimento, fornecida pelo fabricante. Com relação a composição da cinza é importante analisar os valores mínimos de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$. No Brasil, a NBR 12653 (ABNT, 2015) é que estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concretos, argamassas e pastas. Esta norma é semelhante a americana C618 (ASTM, 2019). Ambas as normas estabelecem que a quantidade mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$, em pozolanas classe N deve ser de 70%.

Tabela 2- Composição química da CFB e do cimento utilizado

	SiO_2	CaO	K_2O	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	P_2O_5	SO_3	TiO_2	PF
CFB	70,99	8,31	5,98	4,04	2,83	2,56	2,14	2,14	0,60	8,34
Cimento	18,30	58,8	0,91	3,20	6,00	4,60	-	2,30	-	6,10

Fonte: O autor

Os principais constituintes da CFB são SiO_2 , CaO e o K_2O . A somatória de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ é de 77,59%. Este valor atende ao mínimo estabelecido nas normativas vigentes e encontra-se de acordo com os dados da literatura. Paiva et al. (2021) revisou os artigos dos últimos 5 anos que tratavam do emprego da CFB em materiais cimentícios, sumarizou a composição química investigada por estes autores e encontrou valores de $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ entre 71,6% e 84,81. Ma e Yamaji (2006) relatam que o silício é acumulado nos tecidos vegetais durante toda a vida e por isso estão presentes em maiores quantidades nos vegetais mais velhos.

Charitha *et al.* (2021) também revisaram artigos que estudaram agro resíduos utilizados em compósitos cimentícios e a partir da análise da quantidade de sílica descreveu a cinza da casca de arroz como sendo o melhor substituto parcial para o cimento, uma vez que apresenta valores entre 82,9% e 98,6%. A CFB, estudada por Chandana (2016), apresenta 80,2% de sílica e a estudada por Silva *et al.* (2021) 83,56%, o que a torna muito parecida com a casca de arroz. Analisando o conjunto de sílica, alumínio e ferro, nos dados apresentados por Charitha *et al.* (2021), a CFB apresenta valores muito próximos de outros resíduos que também vem sendo investigados para uso como MCS, alguns exemplos são a cinza da palha e da casca

de arroz, a cinza do bagaço da cana de açúcar, a cinza do capim elefante, entre outros.

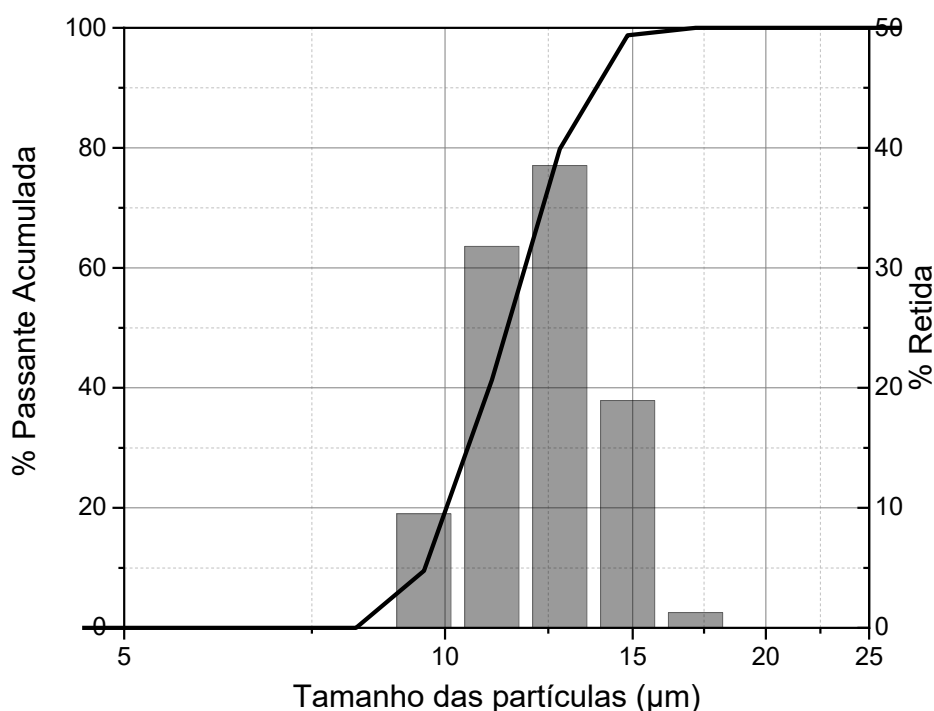
Outro importante parâmetro normalizado é a quantidade máxima de SO₃ (5%). As altas concentrações de SO₃ aumentam a expansão e tem sido extensivamente estudado e descrito na literatura (Chaney et al., 1996).

4.1.2 Tamanho de partículas

Além dos requisitos químicos, uma importante e desejável característica das pozolanas está relacionada a finura.

As normativas determinam que no ensaio de finura por meio da peneira com abertura de malha de 45 μm (N° 325) menos de 34% fique retido (ABNT, 2015; ASTM, 2019). A Figura 3 apresenta a curva de distribuição granulométrica, por DSL, para a CFB.

Figura 3- Distribuição granulométrica do CFB realizada por DSL.



Fonte: O autor

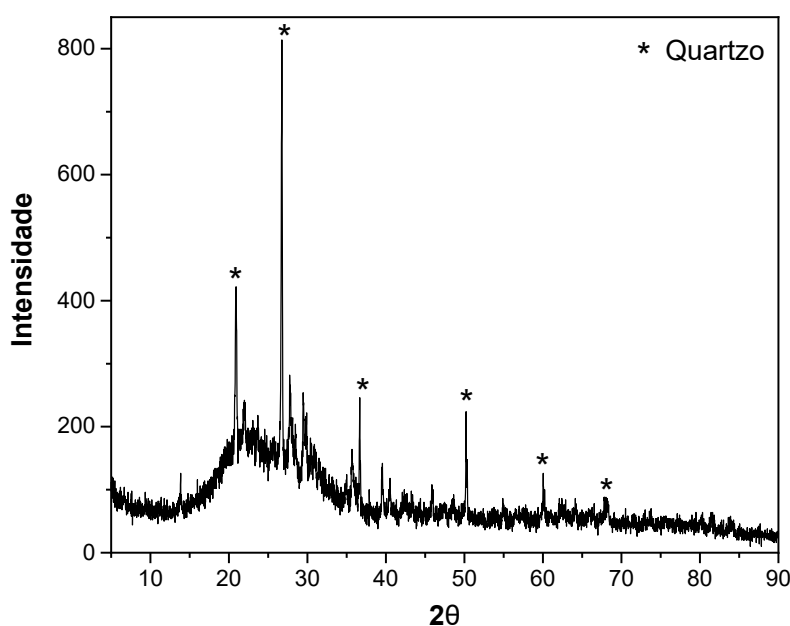
A Figura 3 mostra que as partículas de CFB apresentam tamanho entre 9,55 μm e 17,18 μm . Este tamanho está abaixo de 45 μm , por isso nenhuma partícula

ficaria presa nessa peneira, sendo aprovado no teste recomendado pelas normas de requisitos para materiais pozolânicos. O pequeno tamanho de partículas pode ter influência positiva no comportamento mecânico do compósito cimentício ao preencher vazios, através do efeito filler, e reagir quimicamente formando novos produtos hidratados.

4.1.3 Mineralogia

As condições de calcinação podem influenciar a reatividade dos materiais pozolânicos modificando a composição mineralógica, morfologia das partículas (Morales et al., 2009; Villar Cociña et al., 2016). A Figura 4 apresenta o difratograma de raios X da CFB.

Figura 4- Difratograma da CFB.



Fonte: O autor

Na Figura 4 é possível identificar um halo presente entre 15° e 35°. Este halo é característico dos materiais amorfos e essenciais para se obter um alto grau de pozolanicidade. Os picos cristalinos foram identificados pertencentes ao quartzo (PDF Card # 0000789).

A calcinação sob temperatura controlada de 600°C e tempo de retenção de 2 horas é descrito como a condição ideal para produção de um material mais reativo

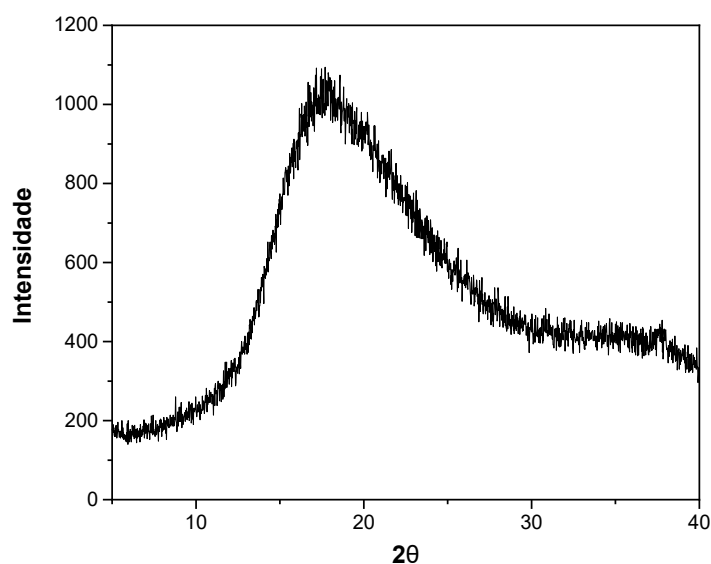
(Villar Cociña et al., 2016). A cinza utilizada nesta pesquisa passou pelo processo de queima não controlada, houve apenas o monitoramento da temperatura (Figuras 1 e 2) que mostrou atingir picos superiores a 700°C e, apesar disso, apresenta uma mineralogia satisfatória. O método empregado aqui é mais próximo do utilizado industrialmente para gerar calor/energia.

4.2 Caracterização do Carbopol

4.2.1 Mineralogia

A Figura 5 apresenta o difratograma de raios X do carbopol.

Figura 5- DRX do Carbopol.

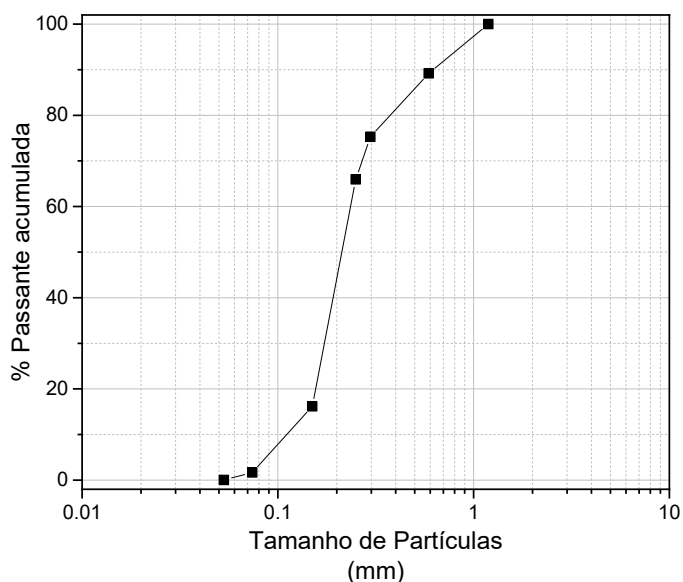


Fonte: O autor

Carbopol exibiu um halo amorfo típico dos polímeros, com um pico máximo em 2θ 17,7° (Al-Asady; Hassan; Abdulqader, 2022). O halo entre 5° e 27° é típico da estrutura estática do grupo carboxílico presente no carbopol (Haddadine et al., 2014).

4.2.2 Tamanho de partículas

O tamanho das partículas do PSA tem grande influência na taxa de absorção do fluido. Quanto menor o tamanho da partícula mais rápido ela absorve água e atinge a estabilidade volumétrica. A Figura 6 apresenta a curva granulométrica do carbopol.

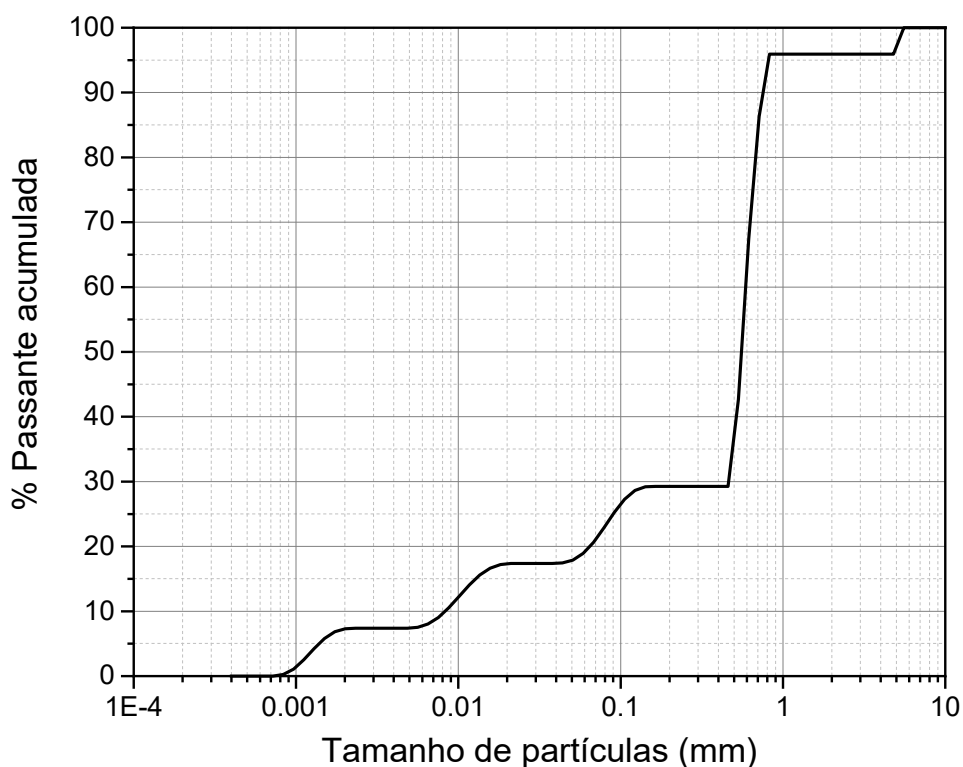
Figura 6- Distribuição granulométrica do carbopol realizada por peneiramento

Fonte: O autor

De acordo com a análise do peneiramento é possível identificar que as partículas do C940 têm que tamanho entre 0,053 mm e 1,19 mm. A grande amplitude no tamanho das partículas é uma característica comum da polimerização por solução. Davis, Kelly e Erk (Davis; Kelly; Erk, 2018) sintetizaram por polimerização por suspensão e caracterizaram o PSA, obtendo uma faixa mais estreita, de 0,01 mm a 0,12 mm. No C940 analisado, apenas 16,20% das partículas têm tamanho inferior a 0,15 mm e Tan et al. (Tan et al., 2021) comparou pastas com cura interna com PSA de diferentes granulometrias e as maiores resistências a compressão foram alcançadas nas pastas cujos PSA tinha diâmetro entre 0,074 mm e 0,105 μ m.

A Figura 7 apresenta a curva granulométrica do PSA realizada por espalhamento dinâmico de luz.

Figura 7- Distribuição granulométrica do carbopol realizada por DSL

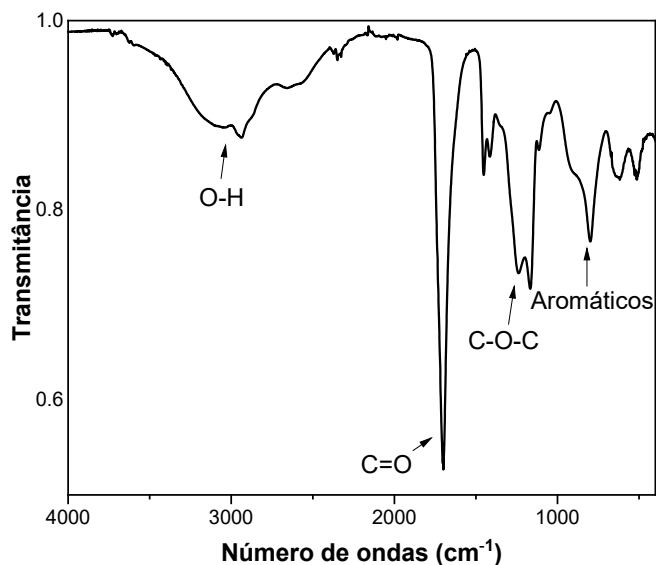


Fonte: O autor

A técnica de espalhamento dinâmico da luz apresenta maior precisão, sobretudo em partículas menores que foi exatamente onde pode-se notar as maiores diferenças entre os métodos utilizados. A curva granulométrica por DSL detalhou a faixa granulométrica em que se encontram os quase 30% das partículas menores que 0,2 mm. O resultado das partículas maiores foi muito próximo aos obtidos por peneiramento, mostrando mais de 65% das partículas entre 0,40 mm e 0,90 mm. O tamanho das partículas pode prejudicar as propriedades mecânicas das argamassas produzidas, uma vez que não estão na faixa recomendada por Tan et al. (Tan et al., 2021) e, após entumecido, as partículas aumentam de volume e deixam vazios no compósito endurecido.

4.2.3 Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A Figura 8 mostra o espectro FTIR do Carbopol, nele é possível observar todos os picos característicos do C940.

Figura 8- Espectro FTIR do Carbopol 940

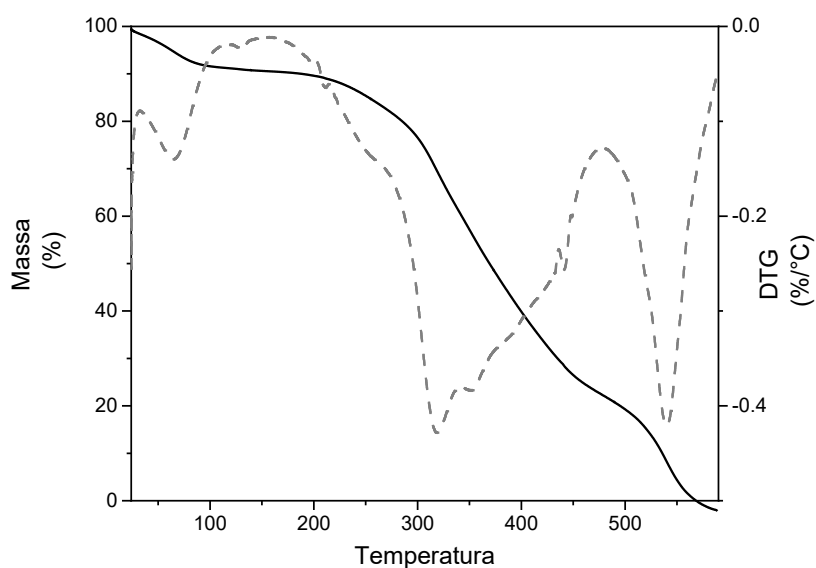
Fonte: O autor

Na faixa entre 3000-2950 cm^{-1} , nota-se o pico atribuído ao grupo O-H e a ligação de hidrogênio intramolecular. O pico entre 1750-1700 cm^{-1} é relativo a carbonila (C=O). Os picos na faixa entre 1450-1400 cm^{-1} representam as vibrações entre -C-O e -O-H. A banda entre 1250-1200 cm^{-1} indica os acrilatos (C-O-C). Por fim, entre 850-800 cm^{-1} apresenta-se as bandas relativas a compostos aromáticos e benzenos (Sahoo et al., 2011; Sahoo; Chakraborti; Behera, 2012; Sarfraz et al., 2022).

4.2.4 Análise térmica

A Figura 9 mostra a análise termogravimétrica e diferencial do C940.

Figura 9- TG e DTG do Carbopol (Linha contínua corresponde ao TG e tracejada ao DTG)



Fonte: O autor

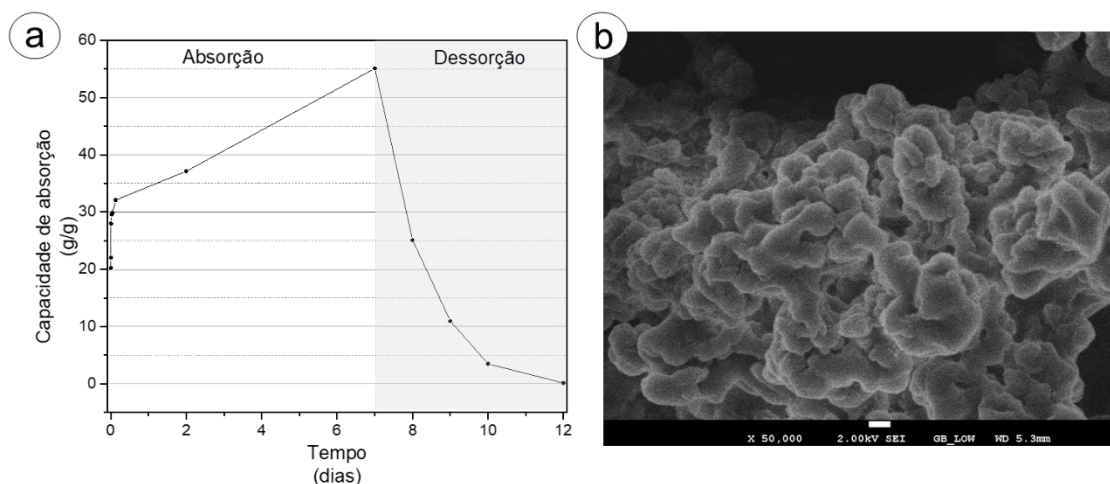
É possível observar no gráfico de TG que inicialmente cerca de 10% da massa é perdida até 200°C. Esta perda pode ser atribuída a evaporação de água não ligada e devido à perda de água por condensação (Suhail; Wu; Minhas, 2020).

Com o aumento da temperatura ocorre a perda de massa até a completa degradação do C940 em 568°C. A perda de massa é atribuída à descarboxilação, ao desenvolvimento de estruturas insaturadas e à despolimerização do carbopol (Suhail; Wu; Minhas, 2020). A DTG do C940 foi compatível com dados reportados na literatura (Lin; Yu, 1999; Pramod et al., 2015; Suhail; Wu; Minhas, 2020).

4.2.5 Cinética de absorção / Dessorção

A Figura 10a apresenta os parâmetros de absorção e desorção do PSA, obtidos pelo método do saquinho de chá, realizado com água destilada. E a Figura 10b apresenta a morfologia das partículas do C940.

Figura 10- a) Capacidade de absorção e dessorção do PSA (g/g PSA) b) Imagem de microscopia eletrônica de varredura do formato do PSA seco.



Fonte: O autor

A Figura 10a mostra que o PSA exibiu uma capacidade de entumescimento crescente até o tempo final da primeira parte do ensaio – 7 dias. Já a etapa de dessorção é realizada pelo polímero em apenas 5 dias. Para um processo de cura apropriado esta etapa deveria levar mais tempo fornecendo água, mantendo a umidade do compósito cimentício e favorecendo o ganho de resistência (García et al., 2013). O resultado de dessorção está em conformidade com dados da literatura que relatam que 99% da água absorvida pelo PSA já foi totalmente liberada quando a umidade relativa interna do compósito atinge 95% e que esta etapa levaria em torno de 20,5 horas (Agostinho, 2021; Trtik et al., 2010). Trtik et. al (Trtik et al., 2011) destacam que duas informações são essenciais no uso do PSA para cura interna: a quantidade e quando a água é disponibilizada para o compósito.

O comportamento de dessorção dos polímeros é regido principalmente pela difusão e durante a maior parte do processo de secagem, a taxa de distribuição de água é constante e depende da umidade relativa do meio (Mönnig, 2005). Uma vez que o ensaio foi realizado com umidade relativa do ambiente de 55% e quando incorporado a argamassa o meio terá umidade muito superior a perda de água também ocorrerá de maneira mais lenta. No entanto, à medida que o compósito perder água a velocidade de dessorção também aumentará.

Estudos futuros devem investigar se o fato deste C940 liberar a água no período de 5 dias permite sua aplicação em estruturas de concreto (por exemplo, laje) realizando a cura úmida em intervalos de tempo maiores.

A Figura 10b mostra uma imagem de MEV do C940 seco. O formato das partículas indicam que a síntese foi realizada por polimerização por suspensão inversa (Mechtcherine, 2016). O formato esférico da microestrutura pode contribuir com a fluidez dos compósitos (Hemalatha; Ramaswamy, 2017).

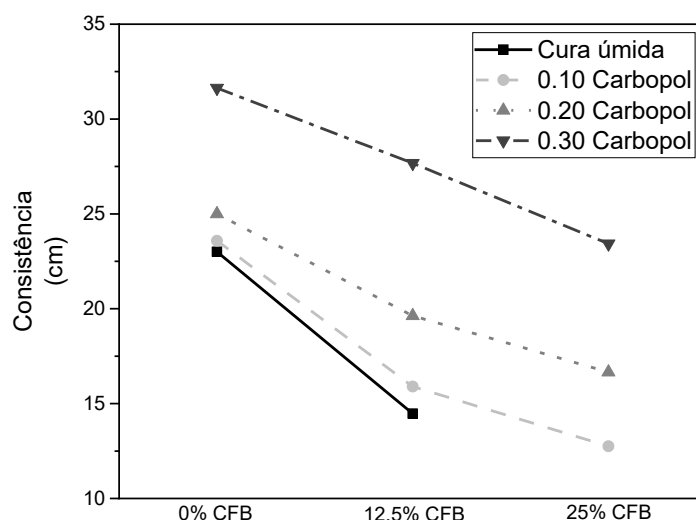
4.3 Experimentação com argamassa

4.3.1 Consistência

O ensaio para determinação do índice de consistência foi utilizado para medir a influência da substituição do cimento por CFB, assim como a incorporação de PSA na mistura. A Figura 11 apresenta os dados obtidos neste teste.

A linha sólida representa a argamassa sem PSA e as outras linhas o aumento gradual na quantidade de PSA. Em nenhuma das argamassas testadas, para consistência, foi utilizado aditivo plastificante e, por causa disso, não foi possível medir a consistência do último ponto da linha sólida. A consistência da argamassa 25CFB era muito dura/seca, impossibilitando a mistura sem o uso do aditivo.

Figura 11- Consistência das argamassas



Fonte: O autor

É possível observar que o aumento na quantidade de PSA provoca um aumento da trabalhabilidade, isso acontece porque a adição de PSA foi feito no estado entumecido, levando a um aumento do teor de água. Senff *et al.* (2005) relatam que

esta ação induzirá efeitos deletérios na resistência mecânica, mas outros autores recomendam a inserção do PSA entumecido a fim de evitar a absorção da água calculada para o traço e necessária para hidratação do cimento.

Ainda observando a Figura 11 é possível notar uma diminuição da trabalhabilidade quando parte do cimento é substituído pela CFB. O aumento da demanda de água é uma característica de alguns materiais pozolânicos como é o caso da sílica ativa, metacaulim, areia descartada de fundição, cinza de cana de açúcar, de casca de mandioca, de espiga de milho, CFB etc (Charitha et al., 2021; Kaminsky et al., 2020; Paiva et al., 2021). O uso do PSA pode representar uma alternativa aos caros aditivos plastificantes quando usados para cura interna, sendo necessário pesquisas futuras a fim de avaliar a possibilidade.

Nas argamassas testadas a compressão, a queda da trabalhabilidade motivou o uso do aditivo superplastificante na mistura das argamassas com adição de cinza, identificadas com o asterisco na Tabela 1. Nas argamassas com PSA não foi necessário o uso deste aditivo uma vez que o PSA cumpriu esta função.

4.3.2 Resistência Mecânica

A Tabela 3 apresenta a média e o desvio padrão (dp) das argamassas estudadas, aos 7 e 28 dias de cura. A primeira seção mostra os resultados das argamassas curadas por imersão. A segunda mostra a argamassa mantida no ambiente laboratorial, sem cura interna. As três últimas seções mostram a resistência a compressão das argamassas curadas com quantidades crescentes de C940 (0,10%, 0,20% e 0,30% em relação a quantidade de aglomerante) curadas em cura interna.

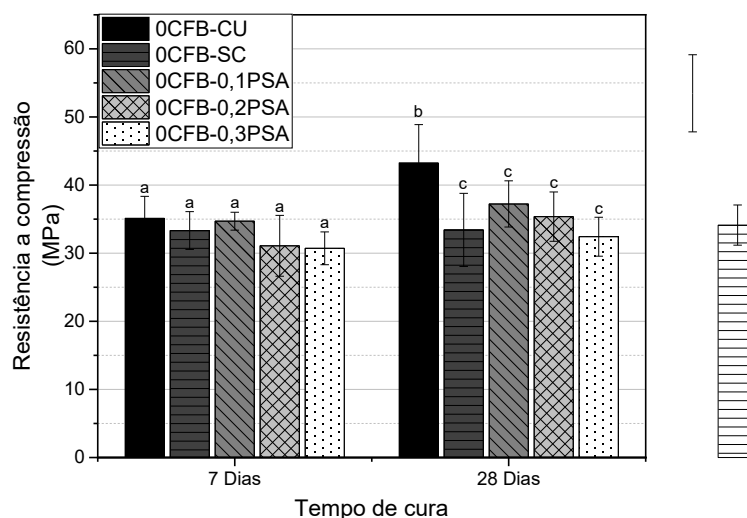
Tabela 3- Resistência a compressão, de acordo com o tempo de cura.

Amostras		Resistência a compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
Cura úmida	0CFB-CU	35,13 ± 3,22	43,28 ± 5,60
	12,5CFB-CU	29,09 ± 5,46	42,57 ± 5,13
	25CFB-CU	30,96 ± 2,44	40,61 ± 5,72
Sem Cura	0CFB-SC	33,33 ± 2,78	33,42 ± 5,37
0,10 CARBOPOL	0CFB-0,1PSA	34,70 ± 2,41	37,23 ± 2,86
	12,5CFB-0,1PSA	33,92 ± 1,43	31,41 ± 2,50
	25CFB-0,1PSA	29,59 ± 5,63	29,69 ± 6,70
0,2 CARBOPOL	0CFB-0,2PSA	31,08 ± 4,47	35,37 ± 3,62
	12,5CFB-0,2PSA	27,88 ± 2,20	32,84 ± 4,72
	25CFB-0,2PSA	27,63 ± 2,01	29,30 ± 0,84
0,30 CARBOPOL	0CFB-0,3PSA	30,71 ± 1,31	31,08 ± 0,98
	12,5CFB-0,3PSA	29,37 ± 1,39	31,05 ± 1,27
	25CFB-0,3PSA	25,17 ± 2,81	27,94 ± 3,00

Fonte: O autor

A Figura 12 mostra a resistência a compressão das argamassas sem CFB. É possível comparar a variação da resistência ao alterar o sistema de cura e a influência da variação da quantidade de PSA.

Figura 12- Resistência a compressão das argamassas sem CFB; CU = Cura úmida, SC – Sem processo de cura, PSA – quantidade de carbopol utilizado; (Letras diferentes no mesmo período de cura indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test)).



Fonte: O autor

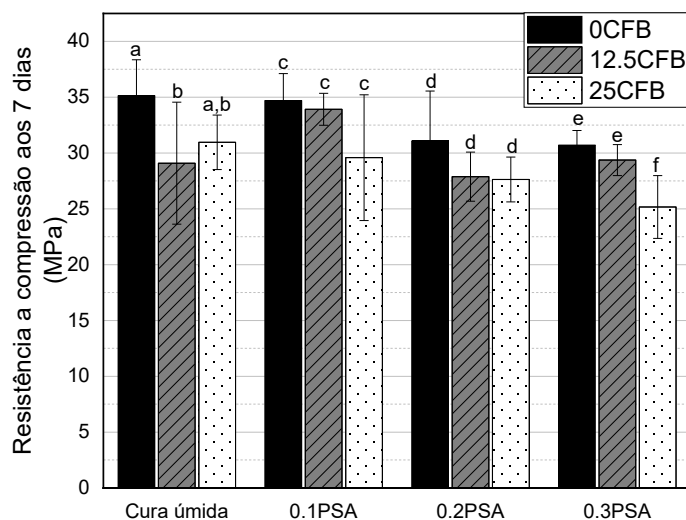
É possível observar que todas as argamassas tiveram a resistência a compressão aumentada com o passar do tempo de cura, porém o aumento na argamassa curada por imersão é muito maior que nas curadas com C940, por cura interna ou na argamassa que não foi submetida a nenhum processo de cura. O aumento na resistência a compressão dos corpos de prova curados imersos entre 7 e 28 dias é de 23,20% enquanto nas amostras com 0,10% 0,20% e 0,30% de PSA foram 7,29%, 13,80% e 1,20%, respectivamente.

Quando comparamos a resistência das argamassas, aos 7 dias de idade, que foram mantidas de diferentes formas notamos que o processo de cura não influenciou na resistência uma vez que todas as argamassas apresentam resistência estatisticamente igual. Até os 7 dias é provável que a água de amassamento tenha sido suficiente para promover a hidratação do aglomerante.

Aos 28 dias, a argamassa que foi mantida no ambiente laboratorial, sem nenhum processo de cura, e as argamassas curadas com C940 também apresentam resistência estatisticamente iguais, indicando que o carbopol não contribuiu para a cura interna dos compósitos. Ainda aos 28 dias, ao comparar a argamassa curada submersa com a demais notamos que ela obteve resistência 16,25% maior que a argamassa com segundo melhor desempenho (0CFB-0,1PSA), evidenciando a ineficácia da cura interna com o C940 usado, devido à falta de água para completar a hidratação do ligante ao longo do tempo. Este resultado está em consonância com a literatura, uma vez que é indicado que a cura adequada pode aumentar a resistência a compressão entre 14% e 30% (Ramos; Monterio; Marzano Junior, 2021).

A Figura 13 apresenta a resistência a compressão das argamassas aos 7 dias de cura.

Figura 13- Resistência a compressão das argamassas com CFB aos 7 dias de cura (Letras diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test))

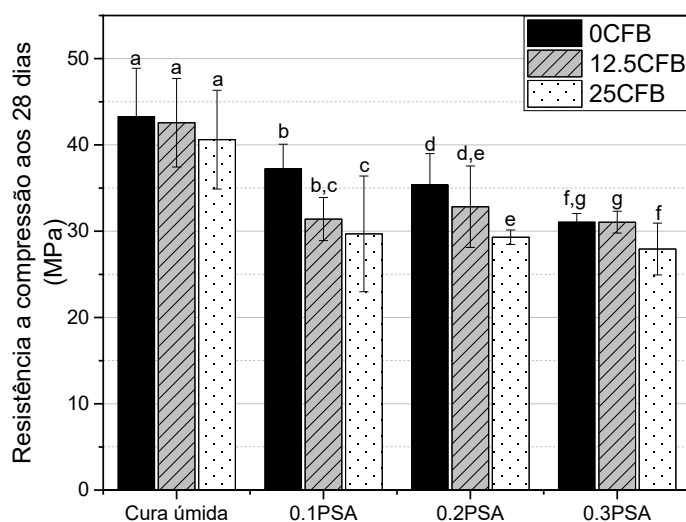


Fonte: O autor

Analisando a Figura 13 é possível notar que a argamassa somente com cimento apresentou maior resistência em todos os traços analisados, o que já era esperado uma vez que os materiais pozolânicos necessitam do CH proveniente da hidratação do cimento para formar produtos resistentes, levando mais tempo, que talvez na análise aos 7 dias não nos permita observar. Ao analisarmos a substituição parcial do cimento pela CFB é possível notar que nos traços onde foi realizado a cura úmida, com 0,1% de PSA e 0,2% de PSA mesmo com substituição de 25% do cimento a resistência foi estatisticamente igual. O bom comportamento pozolânico da CFB já foi observado até 30% por outros autores (Moraes *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021).

A Figura 14 apresenta a resistência a compressão das argamassas aos 28 dias de cura.

Figura 14- Resistência a compressão das argamassas aos 28 dias de cura (Letras diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$, ANOVA, Tukey test))



Fonte: O autor

Observando a Figura 14 é possível notar que a incorporação progressiva de C940 levou a queda gradativa da resistência a compressão. Os dados de caracterização do carbopol, como tamanho de partículas inadequados, ajudam a entender este comportamento.

Quanto a incorporação de CFB, pode-se observar que todas as argamassas com 12,5% de CFB apresentaram resistências estatisticamente igual a argamassa sem cinza. As argamassas com 25% de CFB do traço com 0,1% de PSA e com 0,2% de PSA não alcançaram resistência estatisticamente igual a argamassa controle. A literatura relata que o processo de cura é ainda mais importante quando MCS são inseridos no compósito, uma vez que os aglomerantes compostos são mais sensíveis à falta de umidade e mostram uma perda significativa de resistência quando comparado com a obtida após a cura úmida (Ramezani pour; Malhotra, 1995). Este mesmo padrão foi obtido por outro pesquisador ao comparar concreto convencional e composto com sílica ativa; conforme se aumentava a porcentagem de substituição de cimento por sílica maior a diferença entre a resistência dos concretos curados a seco e em cura úmida (Atiş et al., 2005).

5 CONCLUSÃO

Depois de analisar os resultados de caracterização da CFB e do Carbopol 940 e das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, obteve-se as seguintes conclusões:

- O processo de produção (calcinação e moagem) adotado para a CFB resulta em um material com composição mineralógica e distribuição granulométrica adequadas;
- A caracterização do carbopol 940 mostrou características importantes como o formato esférico das partículas, granulometria e a capacidade de absorção e dessorção. Estes dados ajudaram a entender os resultados do ensaio de consistência e resistência a compressão.
- A CFB diminui a trabalhabilidade de argamassas no estado fresco, enquanto o uso do C940 previamente entumecido aumenta;
- A CFB não causou perdas significativas de resistência a compressão, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de cura;
- A rápida dessorção do C940 não contribuiu com o processo de cura e aliado ao grande tamanho de partículas pode ter prejudicado a resistência a compressão;
- O uso de polímeros superabsorventes, previamente saturado, junto a aglomerantes que demandam altas quantidades de água pode ser uma alternativa ao uso de aditivos plastificantes.

REFERENCIAS

ABNT. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. **NBR 12653 - Pozzolan materials — Requirements**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.

AGOSTINHO, L. B. **Análise microestrutural de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo polímero superabsorvente e nanosílica**. 2021. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2021.

AL-ASADY, Nadia Ashoor Hussein; HASSAN, Dhia A.; ABDULQADER, Daniah Tahseen. In vitro tooth whitening efficacy of carbamide peroxide polyelectrolyte gel and colorimetric evaluation, stability, and hydrogen peroxide release. **Chemical Papers**, [s. l.], v. 76, n. 6, p. 3841–3851, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11696-022-02125-z>.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção Civil: Normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.

AMULYA, S.; RAVI SHANKAR, A. U. Replacement of Conventional Base Course with Stabilized Lateritic Soil Using Ground Granulated Blast Furnace Slag and Alkali Solution in the Flexible Pavement Construction. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 276–288, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00426-2>.

ASTM. **ASTM C109 / C109M-20b, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM. **ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM. **ASTM C305-20, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASTM. **ASTM C349-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM. **ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.

ATIŞ, C.D. *et al.* Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. **Building and Environment**, [s. l.], v. 40, n. 12, p. 1678–1683, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132304003762>.

BECERRA-DUITAMA, Jhonatan A.; ROJAS-AVELLANEDA, Diana. Pozzolans: Areview. **Engineering and Applied Science Research**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 495–504, 2023.

BEDIAKO, Mark; KEVERN, J T; AMANKWAH, Eric Opoku. Effect of Curing Environment on

the Strength Properties of Cement and Cement Extenders. **Materials Sciences and Applications**, [s. l.], v. 06, n. 01, p. 33–39, 2015. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/msa.2015.61005>.

BENTZ, D.P. P; SNYDER, K.A. A. Protected paste volume in concrete—Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 1863–1867, 1999. Disponível em: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860184.

BHUIYAN, M. A. Rahman *et al.* Polyurethane–superabsorbent polymer-coated cotton fabric for thermophysiological wear comfort. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 54, n. 12, p. 9267–9281, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-019-03495-8>.

CHANEY, RC *et al.* Evaluation of Sulfate Expansion in Soil-Cements. **Geotechnical Testing Journal**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 269, 1996. Disponível em: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?GTJ10352J>.

CHARITHA, V. *et al.* Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 122851, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821006115>.

CHEN, Jianping *et al.* Mechanical, Rheological and Release Behaviors of a Poloxamer 407/ Poloxamer 188/Carbopol 940 Thermosensitive Composite Hydrogel. **Molecules**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 12415–12425, 2013. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1420-3049/18/10/12415>.

DAVIS, Cole R.; KELLY, Stacey L.; ERK, Kendra A. Comparing laser diffraction and optical microscopy for characterizing superabsorbent polymer particle morphology, size, and swelling capacity. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 135, n. 14, p. 46055, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.46055>.

ESTEVEZ, Luís Pedro. Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 717–724, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511000710>.

G., Dhinakaran; CHANDANA, Gangava Hari. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 279–289, 2016. Disponível em: https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/show_paper.php?pid=3601.

GARCÍA, Alvaro *et al.* Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 46, n. 8, p. 1275–1289, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-012-9971-6>.

GOMES, L M. **Avaliação da potencialidade de resíduo de base celulósica advindo do setor de higiene pessoal testando sua adição em argamassa de revestimento**. 2014. 117 f. - Unisinos, [s. l.], 2014.

HADDADINE, Nabila *et al.* Preparation and characterization of carbopol/silver nanoparticles composites obtained by heating process for antimicrobial application. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 477, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10965-014-0477-5>.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, Ananth. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 147, p. 546–559, 2017.

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

HOVER, Kenneth C. The influence of water on the performance of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 3003–3013, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811000249>.

IGLIŃSKI, Bartłomiej; BUCZKOWSKI, Roman. Development of cement industry in Poland – History, current state, ecological aspects. A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 702–720, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616314809>.

ISMAIL, Sameh H. *et al.* Synthesis and Characterization of Antibacterial Carbopol/ZnO Hybrid Nanoparticles Gel. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1092, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/9/1092>.

JENSEN, Ole Mejlhede; HANSEN, Per Freiesleben. Water-entrained cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 647–654, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888460100463X>.

JSA. **K 7223: Testing Method for Water Absorption Capacity of Super Absorbent Polymers**. [S. l.]: Japanese Standards Association, 1996.

JSA. **K 7224: Testing Method for Water Absorption Rate of Super Absorbent Polymers**. 96. ed. [S. l.]: Japanese Standards Association, 2021.

KAMINSKY, Amanda *et al.* Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete Members of ASTM Subcommittee C09.24 summarize industry context behind new ASTM standard specification. **Concrete International**, [s. l.], v. 42, 2020.

LI, Zhi *et al.* Nanoporous Carbon Foam for Water and Air Purification. **ACS Applied Nano Materials**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 1564–1570, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnm.9b02347>.

LIN, Shan-Yang; YU, Hui-Ling. Thermal stability of methacrylic acid copolymers of Eudragits L, S, and L30D and the acrylic acid polymer of carbopol. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**, [s. l.], v. 37, n. 13, p. 2061–2067, 1999. Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-0518\(19990701\)37:13%3C2061::AID-POLA20%3E3.0.CO;2-Y](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-0518(19990701)37:13%3C2061::AID-POLA20%3E3.0.CO;2-Y).

MA, Xianwei; LIU, Jianhui; SHI, Caijun. A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 218, p. 385–393, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819312954>.

MA, Xiaofang; WEN, Guohua. Development history and synthesis of super-absorbent polymers: a review. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 136, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10965-020-02097-2>.

MA, Jian Feng; YAMAJI, Naoki. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 392–397, 2006. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1360138506001634>.

MACIEL (TRANSL), M. J. **Vitruvius, De Architectura**. 3. ed. [S. l.]: IST Press, 2009.

MANZANO, M A R *et al.* ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DE UM POLÍMERO SUPERABSORVENTE UTILIZADO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS. *In:* , 2015, Lisboa. **Anais do CONPAT 2015**. Lisboa: Associação Brasileira de Patologia das Construções, 2015.

MASSAZZA, Franco. Pozzolanitic cements. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 185–214, 1993. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0958946593900233>.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 28, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-018-1149-4>.

MECHTCHERINE, Viktor. Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive. **RILEM Technical Letters**, [s. l.], v. 1, p. 81, 2016. Disponível em: <http://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/18>.

MÖNNIG, Sven. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete. **Otto-Graf-Journal**, [s. l.], v. 16, p. 193, 2005.

MORAES, M.J.B. J.B. *et al.* Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanitic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 208, p. 369–380, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819304805>.

MORALES, E.V. *et al.* Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanitic activation. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 22–28, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946508001364>.

MU, Song *et al.* Property and microstructure of aluminosilicate inorganic coating for concrete: Role of water to solid ratio. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 148, p. 846–856, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181730956X>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NORSURAYA, S.; FAZLENA, H.; NORHASYIMI, R. Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 148, p. 839–846, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816310979>.

OMIDIAN, H. *et al.* Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity). **Polymer**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 1753–1761, 1999. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386198003942>.

PAIVA, Fábio *et al.* Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 1–14, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821005936>.

PALMA E SILVA, Arthur Aviz *et al.* Evaluation of mechanical properties and microstructure of high-performance mortars with superabsorbent polymers and metakaolin by means of X-ray computed microtomography. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, p. 104219, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710222002327>.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2008.

PRAMOD, Kannissery *et al.* Unveiling the compatibility of eugenol with formulation excipients by systematic drug-excipient compatibility studies. **Journal of Analytical Science and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 34, 2015. Disponível em: <http://www.jast-journal.com/content/6/1/34>.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; MALHOTRA, V.M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 125–133, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/095894659500005W>.

RAMOS, Edenir Zabicki Soares; MONTERIO, Elislene Dantas; MARZANO JUNIOR, Marcos Aurélio Pinto. Sistema de controle autônomo para cura úmida do concreto. *In*: ENGENHARIA NA PRÁTICA: CONSTRUÇÃO E INOVAÇÃO - VOL.2. [S. l.: s. n.], 2021. p. 51–88.

SAFITRI, Fenny Indah; NAWANGSARI, Desy; FEBRINA, Dina. Overview: Application of Carbopol 940 in Gel. *In*: , 2021, Paris, France. **Proceedings of the International Conference on Health and Medical Sciences (AHMS 2020)**. Paris, France: Atlantis Press, 2021. Disponível em: <https://www.atlantis-press.com/article/125951906>.

SAHOO, S *et al.* Structural Analysis of Ciprofloxacin-Carbopol Polymeric Composites by X-Ray Diffraction and Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research**, [s. l.], v. 10, n. 3, 2011. Disponível em: <http://www.ajol.info/index.php/tjpr/article/view/67938>.

SAHOO, S; CHAKRABORTI, K C; BEHERA, P K. FTIR and Raman Spectroscopic Investigations of Ofloxacin / Carbopol940 Mucoadhesive Suspension. **International Journal of PharmTech Research**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 382–391, 2012.

SANNINO, A. *et al.* Biomedical application of a superabsorbent hydrogel for body water elimination in the treatment of edemas. **Journal of Biomedical Materials Research**, [s. l.], v. 67A, n. 3, p. 1016–1024, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jbm.a.10149>.

SARFRAZ, Muhammad *et al.* Carbopol Based Hydrogels for ITOPRIDE Hydrochloride Delivery; Synthesis, Characterization and Comparative Assessment with Various Monomers. **Journal of Functional Biomaterials**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 295, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4983/13/4/295>.

SCHRÖFL, Christof; SNOECK, Didier; MECHTCHERINE, Viktor. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: report of the RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 197, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-017-1060-4>.

SENF, L. *et al.* Development of mortars containing superabsorbent polymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 95, p. 575–584, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815301951>.

SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* Bamboo as a Sustainable Building Material. *In*: BAMBOO AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 1–23. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-99-0232-3_1.

SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 42, n. May, p. 102769, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221006276>.

SINHA, Vibha; CHAKMA, Sumedha. Advances in the preparation of hydrogel for wastewater treatment: A concise review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 103295, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221334371930418X>.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, [s. l.], v. 74, n. 1, p. 211–278, 2012. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/rimg/article/74/1/211-278/140929>.

SOUZA, M *et al.* Influência do tipo de cura no comportamento mecânico de argamassas confeccionadas com areia de Scheelita. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 91–94, 2019.

SUHAIL, Muhammad; WU, Pao-Chu; MINHAS, Muhammad Usman. Using Carbomer-Based Hydrogels for Control the Release Rate of Diclofenac Sodium: Preparation and In Vitro Evaluation. **Pharmaceuticals**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 399, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8247/13/11/399>.

TAN, Yawen *et al.* Influence of superabsorbent polymers (SAPs) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 270, p. 121442, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820334462>.

TRTIK, P *et al.* Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste. *In:* , 2010. **International RILEM Conference on Material Science**. [S. l.: s. n.], 2010. p. 175–185.

TRTIK, P. *et al.* Release of internal curing water from lightweight aggregates in cement paste investigated by neutron and X-ray tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s. l.], v. 651, n. 1, p. 244–249, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900211002907>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2023**. [S. l.: s. n.], 2023.

VILLAR COCIÑA, Ernesto *et al.* Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 691–699, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-016-9741-8>.

ZHENG, Dan *et al.* Synthesis and characterization of dopamine-modified Ca-alginate/poly(N-isopropylacrylamide) microspheres for water retention and multi-responsive controlled release of agrochemicals. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 160, p. 518–530, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813020333948>.

ZOHURIAAN-MEHR, M. J. *et al.* Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 45, n. 21, p. 5711–5735, 2010. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-010-4780-1>.

ZOHURIAAN-MEHR, M J; KABIRI, K. Superabsorbent Polymer Materials: A Review. **Iranian Polymer Journal**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 451–477, 2008.

CAPÍTULO 5: ESTUDO DA DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COMPOSTAS COM CINZA DA FOLHA DE BAMBU: CARBONATAÇÃO, DIFUSÃO E MIGRAÇÃO DE CLORETOS

RESUMO

A durabilidade das estruturas é uma preocupação constante na engenharia civil. Uma das maneiras de melhorar a durabilidade é utilizando materiais que contribuam para redução dos poros e entrada de agentes nocivos. Os cimentos pozolânicos são apontados como materiais com essa característica e na busca por materiais mais sustentáveis a cinza da folha de bambu (CFB) tem se destacado. Assim, este artigo tem como objetivo avaliar a durabilidade de argamassas compostas com 20%, 25%, 30% e 40% de CFB em substituição ao cimento. As argamassas foram ensaiadas frente resistência a compressão, resistividade elétrica, a carbonatação e o ataque por difusão e migração de cloretos. A resistência a compressão aos 7 e 28 dias mostraram que a substituição do cimento por até 40% de CFB não resultou em queda da resistência a compressão. A resistividade elétrica indicou que a CFB levou a formação de produtos hidratados adicionais que aumentaram a resistividade das amostras testadas. O aumento da compactação das argamassas compostas melhorou a impermeabilidade das amostras reduzindo o coeficiente de migração e difusão de cloretos. A velocidade de carbonatação foi aumentada com os níveis mais altos de adição de CFB e isso foi explicado pelo menor pH das argamassas que tiveram o carbonato de cálcio consumido pela reação pozolânica. Os resultados embasaram a conclusão de que a CFB representa uma adição mineral capaz de melhorar a durabilidade das estruturas além de contribuir para mitigar as emissões de gases de efeito estufa pela produção de cimento.

Palavras-chave: Durabilidade, cinza da folha de bambu, resistividade elétrica, carbonatação, ataque por cloretos.

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas é uma preocupação constante na engenharia civil, sobretudo quando estas estão expostas a ambientes agressivos. Em edificações com estrutura de concreto, a durabilidade é profundamente reduzida quando agentes nocivos conseguem penetrar pelos poros e interconectividades do compósito cimentício, alterando a microestrutura e as propriedades dos materiais.

Em concreto armado o cobrimento é um dos meios de se garantir a durabilidade (ABNT, 2014). O cobrimento visa evitar que os processos de deterioração alcancem a armadura.

Outra maneira de aumentar a impermeabilidade e impedir a deterioração da estrutura é utilizando materiais que apresentam a capacidade de reduzir os poros do compósito cimentício como é o caso do cimento CP IV (Wolenski et al., 2012). O cimento CP IV, também conhecido como cimento pozolânico no Brasil, utiliza até 50% destes materiais, o que lhe confere as características que o tornam adequado para uso em ambientes agressivos (ácidos e com presença de sulfatos) (Souza et al., 2020).

Na década de 60, os primeiros materiais foram incorporados aos cimentos para atuarem como inibidores de corrosão e hoje já é comum o emprego de cinzas volantes, escórias entre outros (Dacuan; Abellana; Canseco, 2021).

Nos últimos anos a cinza da folha de bambu (CFB) tem se destacado enquanto material cimentício suplementar (MCS), tendo sido comparada a cinza da casca de arroz, que era citada até então como o resíduo agroindustrial que melhor substitua parcialmente o cimento, visto que apresenta altas quantidades de sílica (Charitha et al., 2021).

Para investigar o processo de corrosão do aço inserido no concreto armado produzido com CFB em substituição parcial ao cimento, Dacuan, Abellana e Canseco (2021) imergiu os corpos de prova em solução de 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e notaram que a substituição de 10% de cimento por CFB proporcionava melhoria das propriedades do concreto no estado endurecido, diminuindo a penetração do ácido na matriz. Após a cura, o concreto composto com CFB apresentou fissuras insignificantes, enquanto o concreto controle apresentava fissuras de 0,31 mm.

As boas características apresentadas pela CFB motivaram o aprofundamento nas análises de suas propriedades e o desejo de avaliar frente a outras demandas

comuns aos materiais cimentícios na construção civil. Dois importantes processos têm sido amplamente estudados no desenvolvimento de novos materiais de construção civil: a carbonatação e o ataque por cloretos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carbonatação

Para melhor entendimento, o processo de carbonatação pode ser dividido em três etapas.

Primeira etapa: A matriz cimentícia, usualmente, tem pH de 12,5. No processo de carbonatação o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico penetra na matriz cimentícia e na presença de umidade ocorre a formação do ácido carbônico (H_2CO_3) (Equação 1), que por ser um ácido fraco, facilmente se decompõe nos íons bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) (Equação 2). A presença destes íons na pasta cimentícia diminui o pH do concreto causando a despassivação do aço presente no concreto armado e possibilitando os processos de corrosão (Borges et al., 2010; Šavija; Luković, 2016).



Segunda etapa: Os íons formados (HCO_3^- e CO_3^{2-}) em contato com os íons Ca^{2+} do hidróxido de cálcio (CH), proveniente da reação de hidratação do cimento, reagem formando carbonato de cálcio (CaCO_3). Esta segunda etapa é a fase inicial da carbonatação, ela causa redução da porosidade e aumento da resistência à compressão, devido ao carbonato de cálcio formado ter volume cerca de 12% maior que o CH (Borges et al., 2010).

Terceira etapa: Esta etapa só ocorrerá caso, na etapa anterior, a porosidade do compósito não tenha sido diminuída a ponto de impedir a entrada de CO_2 na pasta. Com a porosidade ainda alta, a difusão de CO_2 e as reações representadas pelas Equações 1 e 2 continuam a ocorrer. A diferença desta etapa para anterior é que aqui os íons Ca^{2+} será proveniente do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e não com o CH, o que pode causar uma diminuição volumétrica, rachaduras, aumentando a porosidade e queda da resistência.

2.2 Ataque por Cloretos

Em muitas partes do mundo o ataque por íons de cloro leva a severa deterioração do concreto armado, sendo citado como o mecanismo mais comum de degradação destas estruturas por corrosão eletroquímica (Paul et al., 2015; Wang et al., 2018). Em zonas litorâneas, a atenção para esta patologia deve ser ainda maior

uma vez que há alta concentração de cloro, presente no mar, que são carregados até as estruturas.

Ikumapayi (2009) destaca que as estruturas mais suscetíveis aos ataques por cloretos são aquelas que passam por repetidos ciclos de molhagem e secagem. Os primeiros sintomas do ataque por cloretos são físicos e estão relacionados com o contato do sal com a superfície levando a rachaduras, descamação e desintegração do concreto.

As principais maneiras de penetração dos cloretos no concreto são difusão e absorção (Ikumapayi, 2019). A difusão ocorre quando o concreto está saturado e a absorção quando a superfície está seca. Outras maneiras menos comuns são migração elétrica, migração térmica ou sob a influência de um gradiente hidrostático (Maes; Gruyaert; De Belie, 2013).

Para que exista o processo de corrosão da armadura de concreto armado é necessário que a concentração de cloretos seja maior que um limite chamado limiar de cloretos. Alguns modelos de previsão de vida útil padronizam a concentração crítica de cloretos totais em 0,40% em relação a massa de cimento do concreto (Silvestro; Romano; Molin, 2021). Entretanto, os efetivamente prejudiciais as estruturas são os cloretos livres.

Com a concentração de cloretos livres acima dos níveis críticos, o cloreto causa a despassivação da armadura, que em contato com o oxigênio passa a oxidar a liga metálica. Esta oxidação, por sua vez, pode gerar produtos que estufam a estrutura de dentro para fora, possibilitando o acesso das intempéries que aceleraram a deterioração da estrutura.

A ocorrência do fenômeno ataque por íons de cloro pode ser influenciada por diferentes fatores: - A relação água:cimento altera a porosidade dos compósitos cimentícios dificultando ou tornando acessível a entrada dos cloretos; - O pH do meio e da pasta cimentícia pode proporcionar a despassivação da armadura que acarretaria a corrosão; - A concentração de cloretos acima do nível crítico é fundamental para a ocorrência do fenômeno e maiores concentrações podem acelerar o processo; - Cimentos com maiores concentrações de C_3A (aluminato tricálcico) e C_4AF (ferro aluminato tetracálcico) apresentam maior resistência a cloretos uma vez que estes compostos se ligam aos cloretos formando cloroaluminato de cálcio (sal de Friedel) e cloroferrato de cálcio, diminuindo a porosidade do compósito e retardando a entrada de mais Cl; - Adições minerais, como a escória de alto forno, podem conferir maior

resistência ao ataque por cloretos devido a maior formação de sal de Friedel, diminuição da porosidade etc (Maes; Gruyaert; De Belie, 2013; Sun et al., 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 Material

3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado para produção das argamassas e pastas foi o cimento espanhol tipo CEM I 42,5R, composto somente com clínquer (95-100%), de acordo com UNE-EN 197-1 (une, 2011). Este cimento tem composição similar ao CP I brasileiro (ABNT, 2018).

3.1.1 Areia

Para as argamassas foi utilizada areia normatizada produzida pela empresa Normensand, localizada em Beckum, Alemanha. As características deste material são definidas por norma e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Características físicas da areia

Abertura da peneira (mm)	Volume acumulado (%)	Módulo de finura	Absorção de água (%)	Pureza (%)
2,0	0			
1,6	7 ± 5			
1,0	33 ± 5			
0,5	67 ± 5	2,93	<2	100
0,16	87 ± 5			
0,08	99 ± 1			

Fonte: O autor

3.1.2 Aditivo superplastificante

Para garantir que as argamassas compostas tivessem valores próximos de consistência da argamassa de referência, foi adicionado o aditivo superplastificante Viscocrete-20 HE da Sika, Alcobendas, Espanha. Este aditivo tem base química de policarboxilato e concentração total de cloretos menores que 0,10 M.

3.1.3 Cinza da Folha de Bambu (CFB)

A CFB foi produzida a partir de folhas da espécie *Bambusa vulgaris* coletadas próximo ao Campus II, da Universidade do Oeste Paulista. A queima foi realizada por

autocombustão, sem controle da temperatura. Após a queima, a cinza foi moída em moinho de bolas da marca Solab, modelo SL-34/2-DT pelo período de 1 hora, a cada 5 kg do material.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização da CFB

A composição química da CFB foi avaliada a partir da técnica de fluorescência de raios X (FRX) no equipamento S2 Ranger, da Bruker. A perda ao fogo foi realizada pela técnica de Termogravimetria (TG), com razão de aquecimento de 10°C/min até 1000°C sob vazão de ar sintético em cadinho de alumina no equipamento SDT Q600, da TA Instruments. O tamanho de partículas foi determinado por granulometria a laser no equipamento Mastersizer, da Malvern Panalytical, e a superfície específica foi determinada pelo método BET (Brunauer, Emmet e Teller), no Monosorb Surface Area Analyzer MS-13 da Quantachrome.

3.2.2 Experimentação com argamassas

Para avaliação da argamassa e a influência da CFB nas propriedades do compósito cimentício foram produzidas, além do traço controle, argamassas com 20%, 25%, 30% e 40% de substituição do cimento por CFB. O traço utilizado para produção das argamassas foi de 1:3 (aglomerante:areia) e 0,50 de fator água:aglomerante. Estes valores estão definidos pela norma UNE-EN 196-1 (UNE, 2018) e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Composição das argamassas

	Cimento (g)	CFB (g)	Areia (g)	Água (g)	Superplastificante (%)
Referência	450,00	0,00	1350	225	0
20%CFB	360,00	90,00	1350	225	0,50
25%CFB	337,50	112,50	1350	225	0,65
30%CFB	315,00	135,00	1350	225	0,80
40%CFB	270,00	180,00	1350	225	0,95

Fonte: O autor

A mistura para obtenção da argamassa foi realizada na argamassadeira modelo C0086 da Proetisa e seguiu o método descrito na UNE-EM 196-1 (UNE, 2018), iniciando com a água e o cimento, na argamassadeira, por 30 segundos de mistura em velocidade lenta (140 rpm). Nos 30 segundos seguintes, é adicionada a areia, mantendo a velocidade. Ao final dos primeiros 60 segundos pausa-se a argamassadeira por 90 segundos (nos 30 segundos iniciais, retira-se, com uma espátula o material aderido às paredes e ao fundo do recipiente). Por fim, a argamassadeira é ligada na velocidade alta (275 rpm) por 60 segundos.

Logo após o amassamento, a consistência das argamassas frescas foi mensurada a partir do método de penetração do pistão (UNE, 1999). Este método é semelhante ao descrito pela NBR 16606 (ABNT, 2018), aplicado para determinação da consistência normal em pastas, no Brasil.

Garantido que as argamassas apresentassem consistências iguais à argamassa de referência +/- 2 cm, moldou-se os corpos de prova em 2 camadas, cada uma seguida de 60 golpes ou 30 segundos na mesa vibratória para compactação e retirada do ar incorporado nas fases de mistura e lançamento. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em câmara úmida até a idade para serem ensaiados.

Resistência à Compressão

A resistência a compressão foi medida aos 7 e 28 dias de cura, seguindo a metodologia descrita na norma UNE-EN 196-1 (UNE, 2018). Para este ensaio foram utilizados os mesmos corpos de prova ensaiados a tração, uma vez que o ensaio de tração não afeta a integridade dos CPs (corpo de prova), apenas os divide ao meio. Cada semiprisma foi ensaiado a compressão em uma prensa universal com taxa de incremento de carga de 2400 ± 200 N/s.

Os resultados foram analisados estatisticamente com uso do *software* Origin 8.5 (OriginLab Corporation, Northampton, USA). Inicialmente, a normalidade dos dados foi confirmada com o teste de Shapiro Wilk e o teste one-way ANOVA, seguido do teste *post hoc* Tukey aplicado para a comparação dos resultados. Foram consideradas diferenças estatisticamente significativas quando $p < 0,05$.

Ensaio de durabilidade

Resistividade elétrica

A resistividade elétrica das argamassas foi medida em corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) saturados com água, a partir da desmoldagem e continuando até 28 dias de cura. As medições foram realizadas usando o dispositivo RCON da Giatec Scientific, e o método descrito na norma espanhola UNE 83988-2 [43]. Os valores de resistividade obtidos (ρ) foram calculados com base nas medições, aplicando a seguinte Equação 3:

$$\rho_e = k \cdot R_e \quad (3)$$

Onde:

ρ_e = resistividade elétrica, ($\Omega \cdot m$);

k = constante de célula, (m);

R_e = resistência elétrica, (Ω).

A constante de célula é calculada pela razão entre a área da seção transversal (m^2) em contato com a esponja e a altura do corpo de prova (m). No caso das provetas prismáticas a constante de célula utilizada foi de 0,1.

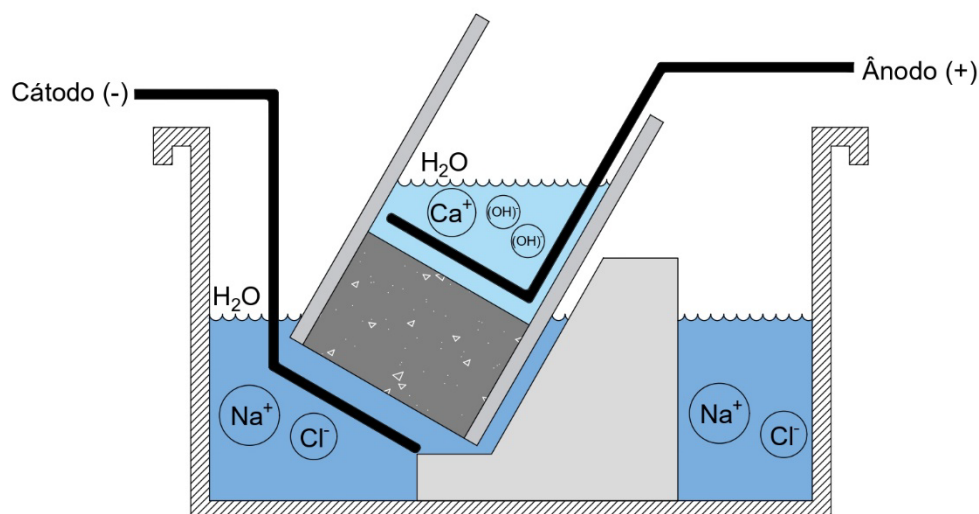
Migração acelerada de cloretos

A determinação do coeficiente de migração de cloretos no compósito seguiu um método acelerado de ensaio determinado pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999).

O método consiste em aplicar uma diferença de potencial elétrico ao longo da amostra, conforme a Figura 1, forçando os íons de cloreto presentes na solução de cloreto de sódio (NaCl) a migrarem pela amostra.

O corpo de prova usado para ensaio foi moldado em um cilindro ($\emptyset 10 \times 20$ cm). Inicialmente, o cilindro foi cortado em duas metades, ou seja, em dois cilindros de $\emptyset 10 \times 10$ cm, e depois cortando uma fatia de 5 ± 2 cm de espessura de uma metade. A superfície final que estava mais próxima do centro é a que foi exposta à solução de cloreto (cátodo).

Figura 1- Esquema de ensaio de migração de cloro



Fonte: O autor

Após o período de teste (neste caso 24 horas), a amostra é dividida axialmente e é aplicada uma solução de nitrato de prata que evidencia e possibilita medir a profundidade de penetração do cloro e a partir da Equação 4, presente na NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999), calcula-se o coeficiente de migração de cloretos.

$$C_{mCl} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (4)$$

Onde:

C_{mCl} = coeficiente de migração em estado não estacionário, (m²/s);

T = média entre a temperatura inicial e final, (°C);

L = espessura da amostra, (m);

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

t = tempo de duração do ensaio, (s);

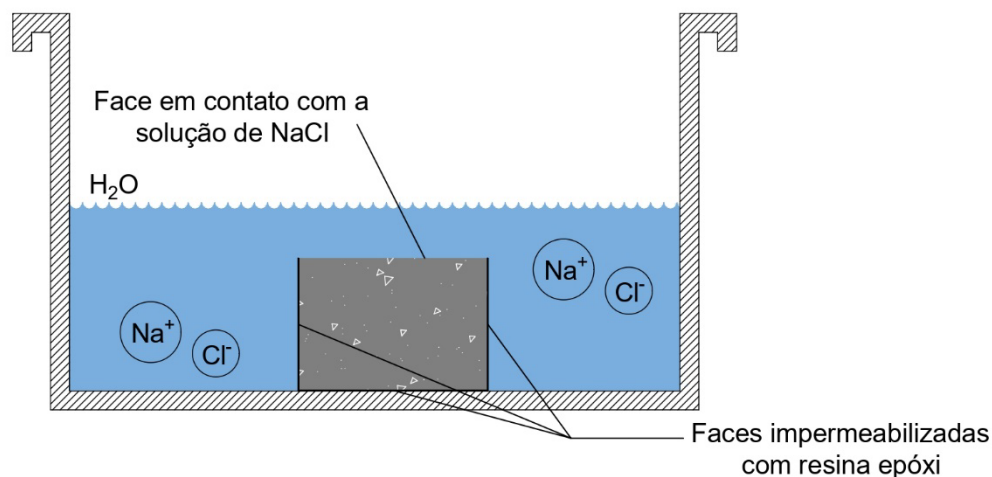
x_d = profundidade média de penetração, (m);

Difusão de cloretos

O ensaio de difusão dos cloretos na argamassa foi realizado após 28 dias de cura do compósito. O corpo de prova cilíndrico (Ø10cm e 20cm de altura), já curado, é dividido ao meio resultando em duas partes de 10 cm de diâmetro x 10 cm de altura. As metades então tiveram suas faces impermeabilizadas deixando apenas a superfície cortada (parte central do corpo de provas) exposta para entrada dos íons

de cloro (Figura 2). Uma solução de 165 g/L de NaCl é preparada e o corpo de prova é submerso para que o processo de difusão se inicie (NORDTEST, 1995). Após 35 dias submerso, a face exposta a solução de NaCl é lixada em profundidade de 1 mm consecutivamente até 8 mm, recolhendo o material pulverulento de cada camada para quantificação dos cloretos totais e livres (UNE, 2007).

Figura 2- Esquema de ensaio de difusão de cloretos



Fonte: O autor

A quantificação dos cloretos foi realizada por titulação com AgNO₃ (nitrato de prata), no titulador compacto modelo 916 Ti-Touch, da Metronh. Os valores de Coeficiente de difusão (D) e Concentração superficial (C_s) são determinados por meio de uma análise de regressão não linear pelo método de ajuste de mínimos quadrados dos teores de cloreto medidos, conforme Equação 5.

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \quad (5)$$

Onde:

$C_{(x,t)}$ = concentração de cloretos, (% massa);

C_s = condição de contorno na superfície exposta, (% massa);

C_i = concentração inicial de cloretos, (% massa);

x = profundidade abaixo da superfície exposta, (m);

D_e = coeficiente de difusão, (m²/s);

t = tempo de exposição, (s)

erf = função do erro.

Carbonatação

Para o ensaio de carbonatação, inicialmente os corpos de prova de argamassa, de 10 cm de diâmetro, são curados por 28 dias em câmara úmida. Após este período são transferidas para uma câmara com temperatura e umidade relativa controlada em 20°C e 60%, por 14 dias. Ao final dos 14 dias, os corpos de prova têm suas faces superior e inferior impermeabilizadas, ficando apenas as laterais disponíveis para interação com o meio. Após a impermeabilização os CPs são mantidos, por 7, 28 e 70 dias, em uma câmara de carbonatação (Figura 3), onde o nível de dióxido de carbono (CO₂) é mantido constante em 3%. Após 7, 28 e 70 dias de exposição ao gás, os corpos de prova são retirados da câmara de carbonatação e uma fatia de 50 mm de espessura da face superior, impermeabilizada, é cortada expondo a argamassa. Nesta face é aplicada uma solução indicadora de fenolftaleína (UNE, 2020). A fenolftaleína é um indicador ácido-base incolor em meio ácido e rosa intenso em meio básico. A profundidade de penetração do CO₂ (d_k) fica visível após a aplicação da solução de fenolftaleína uma vez que a argamassa tem originalmente pH básico, entretanto com a penetração do CO₂ a argamassa passa a apresentar pH menor. Após mensurar a profundidade de carbonatação (d_k), é possível calcular a velocidade de carbonatação (K_{ac}). A equação da velocidade de carbonatação – Equação 6 – é baseada na Lei de Fick que descreve casos de difusão onde inicialmente não existe equilíbrio.

$$d_k = a + k_{AC} + \sqrt{t} \quad (6)$$

Onde:

d_k = profundidade média de carbonatação, (mm);

a = intersecção, (mm);

k_{AC} = velocidade de carbonatação, (mm/dias^{0,5});

t = tempo de exposição, (em dias).

Figura 3- Câmara de carbonatação



Fonte: O autor

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da CFB

É esperado que, na composição química de materiais pozolânicos, estejam presentes quantidades mínimas de SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3 , uma vez que estes óxidos reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado na reação de hidratação do cimento para formar produtos resistentes. A soma destes óxidos deve ser no mínimo de 70%, de acordo com as exigências químicas de algumas normas vigentes (ABNT, 2015; ASTM, 2019). A Tabela 3 apresenta a composição química da CFB obtida por FRX.

Tabela 3- Composição da CFB

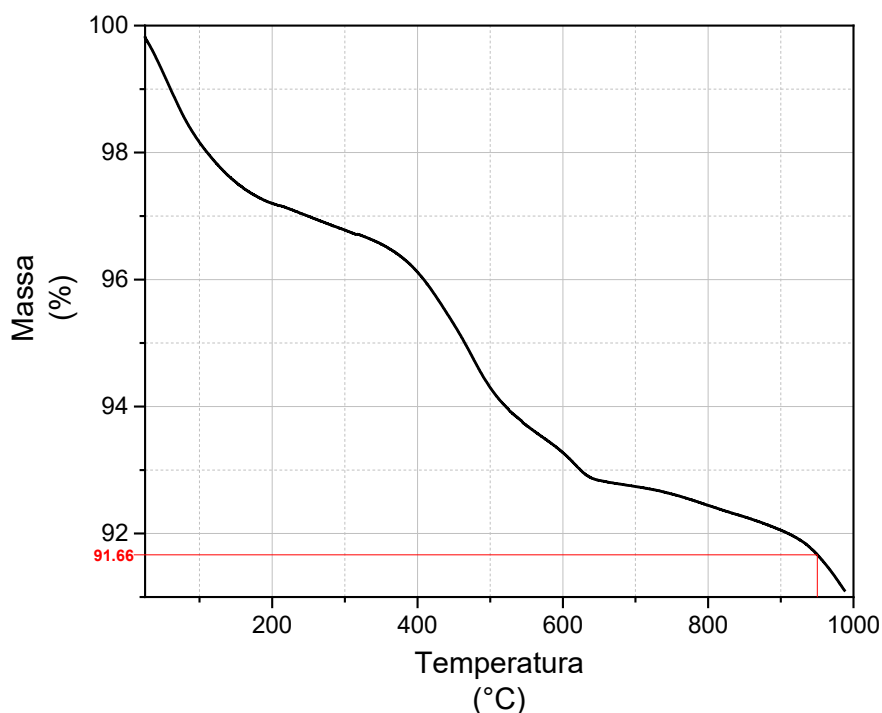
Óxidos presentes na CFB (%)										
SiO_2	CaO	K_2O	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	P_2O_5	SO_3	TiO_2	Cl	PF
70,27	7,60	6,24	4,36	3,09	3,02	2,26	1,28	0,63	0,53	8,34

Fonte: O autor

A CFB utilizada nesta pesquisa apresenta somatório dos óxidos de silício, alumínio e ferro ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) igual a 77,72%. Outros autores que também caracterizaram CFB encontraram valores próximos. Nos estudos de Abebaw, Bewket e Gatahun (2021) a CFB apresentou 76,35% e nos de Odeyemi *et al.* (2022) 78,30%. Outro composto importante, definido em norma, é a quantidade máxima de SO_3 em 4%. Este composto pode causar a expansão do compósito cimentício facilitando a entrada de CO_2 e outros agentes nocivos que poderiam levar a corrosão e prejudicariam a vida útil da estrutura. Como é possível observar, na Tabela 3, a quantidade de SO_3 encontrada foi de apenas 1,28%.

Ainda nos requisitos químicos, a NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece um limite máximo para perda ao fogo. As pozolanas de classe N podem perder até 10% da massa após permanecer 50 minutos em mufla a 950°C (CMN, 2012). O mesmo documento classifica como classe N as pozolanas naturais ou artificiais que atendam os critérios elencados. A Figura 4 mostra a análise térmica da CFB.

Figura 4- Análise termogravimétrica da CFB

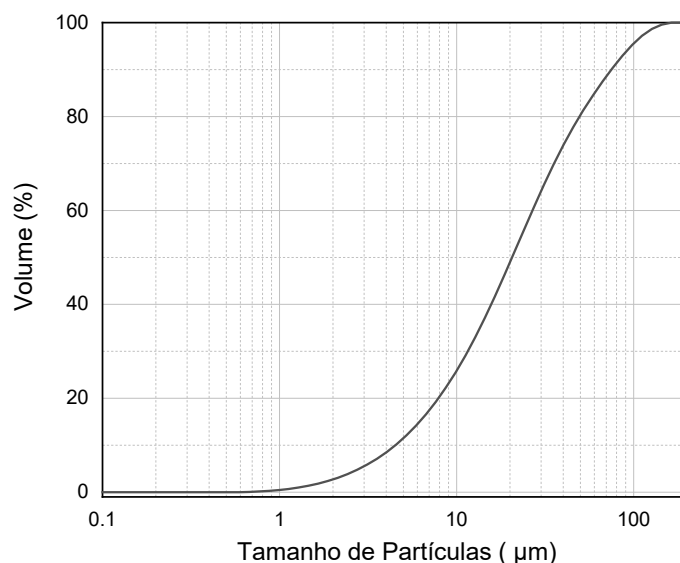


Fonte: O autor

Na análise térmica da CFB é possível observar que a 950 °C a CFB havia perdido 8,34%. Este valor atende aos requisitos normativos, mas observa-se uma margem passível de melhora desta característica, uma vez que o processo de queima utilizou um forno experimental para pesquisa e não um processo industrial.

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica da CFB. Partículas mais finas garantem uma melhor reatividade dos aglomerantes e a norma brasileira de requisitos de materiais pozolânicos limita que apenas 20% das partículas sejam maiores que 45 µm, enquanto a norma norte americana estende o limite até a 34% (ABNT, 2015; ASTM, 2019).

É possível observar que o tamanho das partículas de CFB ensaiadas estão entre 0,5 µm e 186 µm. Nota-se ainda que quase 80% das partículas estão abaixo de 45 µm, atendendo ao critério normativo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015). A importância da granulometria é inegável, entretanto, ela não é descrita em cerca de 59% dos artigos que investigam a CFB enquanto aglomerante (Silva *et al.*, 2023).

Figura 5- Distribuição granulométrica da CFB

Fonte: O autor

A superfície específica medida das partículas de CFB é de 57,7 m²/g. Quanto maior a superfície específica, mais área de contato pode reagir com a água, formando produtos resistentes (Sanjuán *et al.*, 2018). A grande área específica das partículas de cinza de bambu já foi descrita por Onikeku *et al.* (2019). Outro pesquisador investigando CFB encontrou um valor menor (48 m²/g), porém próximo, para área específica da CFB (Moraes *et al.*, 2019).

4.2 Experimentação com argamassa

4.1.1 Resistência mecânica

A Tabela 4 e a Figura 6 apresentam os resultados de resistência a compressão das argamassas, aos 7 e 28 dias de cura. Com estes dados é possível avaliar, de maneira indireta, a pozolanicidade da CFB.

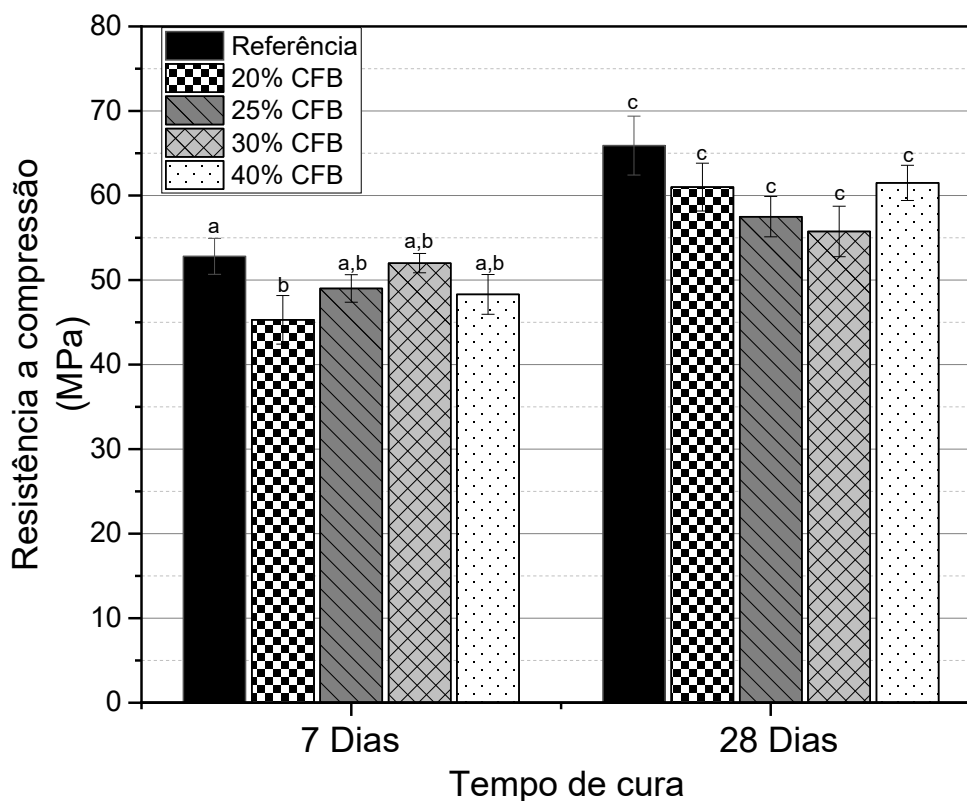
Tabela 4- Resistência a compressão, aos 7 e 28 dias de cura

	Referência	Resistência a compressão (MPa)			
		20% CFB	25% CFB	30% CFB	40% CFB
7 Dias	52,80 ± 2,13 ^a	45,30 ± 2,87 ^b	49,00 ± 1,63 ^{a,b}	52,00 ± 1,15 ^{a,b}	48,30 ± 2,36 ^{a,b}
28 Dias	65,90 ± 3,48 ^c	61,00 ± 2,83 ^c	57,50 ± 2,38 ^c	55,75 ± 2,99 ^c	61,50 ± 2,08 ^c

Letras diferentes, no mesmo período de cura, indicam diferença estatística ($p < 0.05$, ANOVA, Tukey test)

Fonte: O autor

Figura 6- Resistência a compressão, aos 7 e 28 dias de cura (Letras diferentes, no mesmo período de cura, indicam diferença estatística ($p < 0.05$, ANOVA, Tukey test))



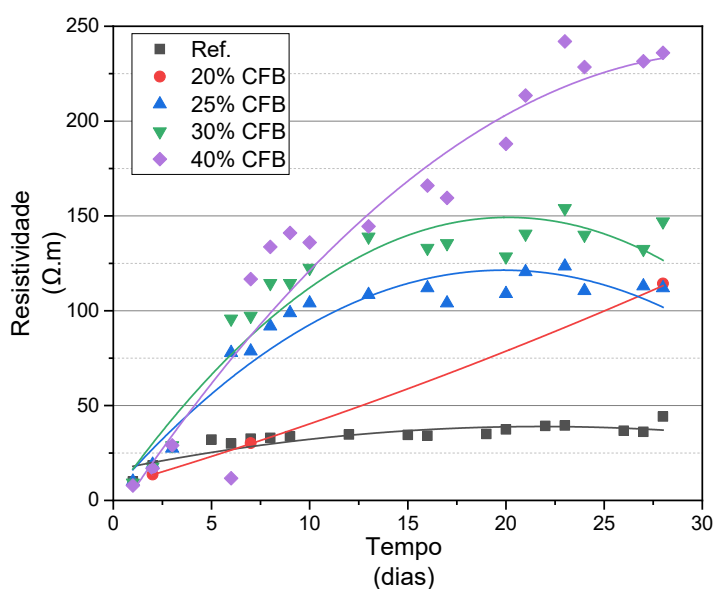
Fonte: O autor

Aos 7 dias de cura, ao substituir cimento pela CFB é possível observar uma ligeira queda na resistência à compressão. Ainda assim, as argamassas com 25%, 30% e 40% de CFB têm resistência à compressão estatisticamente iguais a argamassa controle (diferenças não significativas, $p > 0.05$). Aos 28 dias, todas as argamassas apresentam resistência estatisticamente iguais a argamassa controle. Até então, resultados da literatura de resistência à compressão equiparáveis a resistência da argamassa controle haviam sido encontrados com substituição máximo de 30% de cimento por CFB. Neste caso, os autores atribuíram os resultados à alta reatividade da cinza, que causa ligeiras melhorias nas propriedades da matriz em idades posteriores (Moraes et al., 2019).

4.2.1 Resistividade elétrica

A Figura 7 mostra a variação da resistividade, influenciada pela hidratação dos aglomerantes, ao longo de 28 dias de cura. Este é um ensaio não-destrutivo no qual a maior resistividade indica que a matriz de cimento está mais densa e apresenta maior resistência ao transporte de cargas (Alonso-Domínguez *et al.*, 2017), além disso alguns benefícios dos testes de resistividade é que eles podem ser de baixo custo, repetíveis e rápidos de executar (Spragg *et al.*, 2013).

Figura 7- Variação na resistividade da argamassa ao longo da cura



Fonte: O autor

Diante dos resultados é possível observar que a argamassa controle atingiu 44,2 $\Omega.m$ aos 28 dias de cura enquanto as argamassas compostas com 20%, 30% e 40% de CFB atingiram, respectivamente, 112 $\Omega.m$, 147 $\Omega.m$, e 236 $\Omega.m$. A resistividade elétrica está relacionada à porosidade interligada e, portanto, um melhor comportamento pode se traduzir em melhor comportamento durável, uma vez que a maior parte dos agentes agressivos penetram na microestrutura na fase aquosa.

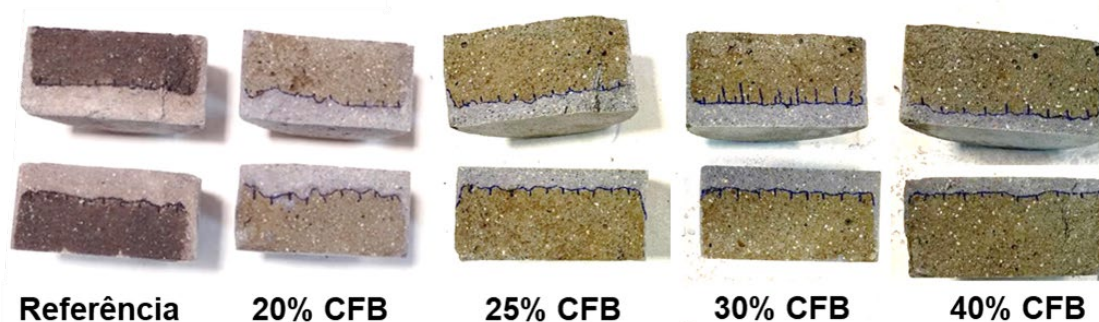
Sanjuán *et al.* (2018) já estabeleceram uma maneira para estimar a difusão de cloretos baseado na resistividade elétrica. No trabalho é descrito que argamassas com resistividade abaixo de 50 $\Omega.m$ tem uma alta difusão de cloretos, argamassas com resistividade entre 50 $\Omega.m$ e 100 $\Omega.m$ tem uma difusão moderada, entre 100 $\Omega.m$ e

200 $\Omega.m$ – baixa difusão, entre 200 $\Omega.m$ e 2000 $\Omega.m$ – muito baixa e por fim, maior que 2000 $\Omega.m$ difusão de cloretos insignificante. A incorporação de CFB nas amostras estudadas proporcionou uma melhora na resistividade saindo da classificação “alta difusão de cloretos” e chegando até “muito baixa difusão de cloretos” nas argamassas com 40% de CFB.

4.2.3 Migração acelerada de cloretos

Após o processo acelerado de migração de cloretos os CPs foram rompidos axialmente de modo a permitir que uma solução de nitrato de prata fosse aplicada na argamassa a fim de observar a profundidade da migração dos cloretos (Figura 8). Essa profundidade foi utilizada para o cálculo do coeficiente de migração.

Figura 8- Corpos de prova após o ensaio de migração de cloretos



Fonte: O autor

Na Tabela 5 é apresentado o coeficiente de migração de todas as argamassas ensaiadas, aos 28 dias de cura.

Tabela 5- Coeficiente de migração das argamassas ensaiadas

	Referência	20% CFB	25% CFB	30% CFB	40% CFB
Coeficiente de migração (m^2/s)	$11,8 \times 10^{-12}$	$4,53 \times 10^{-12}$	$3,65 \times 10^{-12}$	$3,42 \times 10^{-12}$	$2,05 \times 10^{-12}$

Fonte: O autor

É possível observar que o coeficiente de migração da argamassa de referência, somente com cimento, foi 260,49%, 323,29%, 345,03% e 575,61% maior que nas argamassas com 20%, 25%, 30 e 40% de CFB, respectivamente. Isso sugere que a CFB proporcionou uma diminuição na porosidade, impedindo a passagem dos íons

de cloro. Estes baixos valores do coeficiente de migração nas argamassas compostas pode ser fruto da diminuição do número de poros conectados causada pela incorporação da CFB.

Sanjuán *et al.* (2022) utilizou cimentos ternários com escória granulada de alto-forno e cinzas volante e obteve grandes reduções do coeficiente de migração. O autor cita ainda que o uso de materiais pozolânicos tem essa propriedade. A maior impermeabilidade e a boa resistência ao ataque químico também são características observadas na literatura quando se trata de adições minerais ativas (Ikumapayi; Akingbonmire; Oni, 2019). O emprego de nanosílica em argamassas também demonstrou a capacidade de diminuir drasticamente a resistividade elétrica e posteriormente a entrada de íons cloreto (Alonso-Domínguez *et al.*, 2017).

4.2.4 Difusão de cloretos

Os cloretos presentes nas argamassas podem se apresentar de maneira livre ou combinados. A Tabela 6 apresenta os coeficientes efetivo de difusão de cloretos (D_e), coeficientes aparentes de difusão de cloretos (D_a) e a concentração superficial de cloretos (C_s), nas argamassas testadas.

Tabela 6- Coeficiente de difusão e concentração superficial de cloretos

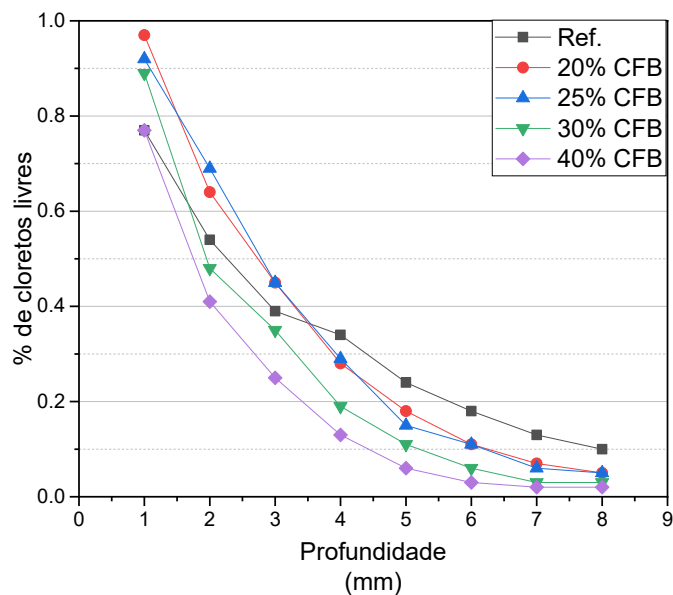
		Referência	20% CFB	25% CFB	30% CFB	40% CFB
Cloretos livres	D_e ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	4,09	2,06	1,79	1,68	1,20
	C_s (% massa)	0,76	1,11	1,25	0,91	0,89
Cloretos totais	D_a ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	9,00	3,81	3,60	2,81	1,70
	C_s (% massa)	1,11	1,73	1,70	1,42	1,38

Fonte: O autor

É possível observar que o coeficiente de migração de cloretos, tanto efetivo quanto aparente, é menor nas argamassas compostas. O coeficiente de difusão efetivo na argamassa controle é 198,54%, 228,49%, 243,45% e 340,83% maior que nas argamassas compostas com 20%, 25%, 30% e 40%. A substituição parcial de cimento por CFB proporcionou maior resistência a difusão dos cloretos.

Na Figura 9 é possível observar o perfil de migração de cloretos livres de cada traço ensaiado.

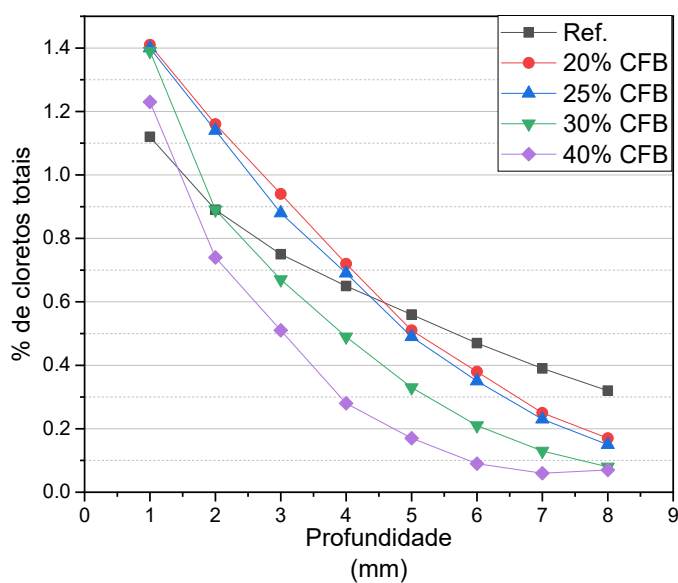
Figura 9- Perfil de migração de cloretos livres



Fonte: O autor

Na Figura 10 é possível observar o perfil de migração de cloretos totais de cada traço ensaiado.

Figura 10- Perfil de migração de cloretos totais dos traços referência, 20% CFB, 25%, 30% CFB e 40% CFB



Fonte: O autor

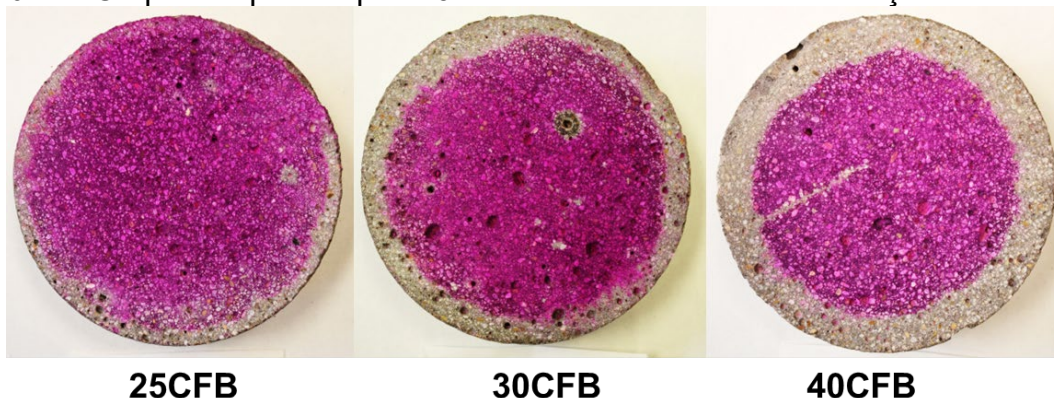
Observando os perfis de difusão de cloretos (Figuras 9 e 10) e a concentração superficial (C_s), é possível notar que a argamassa de referência apresenta, superficialmente, uma menor concentração de íons de cloro que as argamassas com CFB. Entretanto, isso se inverte nas maiores profundidades. As argamassas com CFB apresentaram maior resistência à penetração de cloretos e, todas elas, inclusive as com maiores quantidades de substituição, tiveram comportamento muito similar uma à outra.

4.2.5 Carbonatação

Os fatores que podem influenciar a velocidade com que ocorre a carbonatação são permeabilidade e o teor de umidade do compósito e umidade relativa e teor de CO_2 do ambiente (Silva et al., 2015). Em condições naturais, os níveis de CO_2 na atmosfera ficam entre 0,03% e 1%. Entretanto, para reduzir o tempo de ensaio, muitas pesquisas utilizam teores superiores de concentração do gás (Pauletti; Possan; Molin, 2007).

A Figura 11 apresenta os corpos de prova após 70 dias em câmara de carbonatação e aplicação da solução de fenolftaleína. É possível observar o surgimento de um aro incolor e o centro rosa intenso. A área incolor representa a região que em contato com o CO_2 carbonatou e teve o pH alterado. O uso da fenolftaleína para avaliação da carbonatação é descrito como sendo um método rápido e barato entretanto é acrescentado ressalvas quanto a dificuldade de delimitar a interface a ser medida (McPolin; Basheer; Long, 2009).

Figura 11- Corpos de prova após 70 dias em câmara de carbonatação



Fonte: O autor

A Tabela 7 apresenta a profundidade de carbonatação obtida após 7, 28 e 70 dias com concentração de CO₂ de 3%.

Tabela 7- Dados relativos a carbonatação

Amostras	Profundidade de carbonatação (mm)			Velocidade de carbonatação (mm/d ^{1/2})		
	7 Dias	28 Dias	70 Dias	7 Dias	28 Dias	70 Dias
Referência	0,68	0,13	1,20	0,11	2,12	0,20
20%CFB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25%CFB	0,00	0,00	6,43	0,00	0,00	0,38
30%CFB	0,00	5,29	7,63	0,00	0,50	0,45
40%CFB	0,00	7,61	10,53	0,00	0,72	0,62

Fonte: O autor

É possível observar que o CP d e referência sofreu pequena carbonatação após 70 dias. Nos CPs com maiores quantidades de CFB (25%, 30% e 40%) observa-se um aumento progressivo da profundidade de carbonatação. Este aumento da profundidade de carbonatação nas argamassas com maiores quantidades de materiais pozolânicos pode ser explicado pela menor quantidade de CH nas argamassas, uma vez que estes foram consumidos pela reação pozolânica diminuindo o pH da argamassa (Alonso-Domínguez et al., 2017) e não no aumento da permeabilidade já que estas foram testadas nos ensaios de resistividade elétrica, migração e difusão de cloretos e as argamassas compostas tiveram melhor desempenho.

5 CONCLUSÃO

As seguintes conclusões puderam ser realizadas a partir dos ensaios realizados:

- A CFB, calcinada por autocombustão, e moída nas condições descritas atendem as exigências normativas para uso em cimentos compostos e podem ser uma alternativa para produção de energia enquanto biomassa;
- A substituição do cimento por CFB nas quantidades de 20%, 25%, 30% e 40% não afetaram, de maneira significativa, a resistência a compressão das argamassas uma vez que a retirada de parte do cimento foi compensada pelas reações pozolânicas.
- Os testes de migração e difusão de cloreto, confirmaram o resultado do teste de resistividade, e indicaram que resistência a ataques de agentes externos é maior nas argamassas compostas e isso se deve ao fato da reação pozolânica ter tornado a matriz mais densa e com poros não conectados.
- A CFB representa uma adição mineral eficaz que pode ser utilizada na formulação de cimentos pozolânicos, nas regiões onde esse material está disponível, diminuindo impactos ambientais e custos do provenientes do transporte dos materiais tradicionais utilizados hoje.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABNT. **NBR 12653 - Pozzolanic materials — Requirements**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- AGOSTINHO, L. B. **Análise microestrutural de pastas de cimento Portland de alta resistência contendo polímero superabsorvente e nanosílica**. 2021. - Universidade de Brasília, [s. l.], 2021.
- AL-ASADY, Nadia Ashoor Hussein; HASSAN, Dhia A.; ABDULQADER, Daniah Tahseen. In vitro tooth whitening efficacy of carbamide peroxide polyelectrolyte gel and colorimetric evaluation, stability, and hydrogen peroxide release. **Chemical Papers**, [s. l.], v. 76, n. 6, p. 3841–3851, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11696-022-02125-z>.
- AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção Civil: Normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.
- AMULYA, S.; RAVI SHANKAR, A. U. Replacement of Conventional Base Course with Stabilized Lateritic Soil Using Ground Granulated Blast Furnace Slag and Alkali Solution in the Flexible Pavement Construction. **Indian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 276–288, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00426-2>.
- ASTM. **ASTM C109 / C109M-20b, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- ASTM. **ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- ASTM. **ASTM C305-20, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- ASTM. **ASTM C349-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- ASTM. **ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- ATIŞ, C.D. *et al.* Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. **Building and Environment**, [s. l.], v. 40, n. 12, p. 1678–1683, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132304003762>.

BECERRA-DUITAMA, Jhonatan A.; ROJAS-AVELLANEDA, Diana. Pozzolans: A review. **Engineering and Applied Science Research**, [s. l.], v. 49, n. 4, p. 495–504, 2023.

BEDIAKO, Mark; KEVERN, J T; AMANKWAH, Eric Opoku. Effect of Curing Environment on the Strength Properties of Cement and Cement Extenders. **Materials Sciences and Applications**, [s. l.], v. 06, n. 01, p. 33–39, 2015. Disponível em: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/msa.2015.61005>.

BENTZ, D.P. P; SNYDER, K.A. A. Protected paste volume in concrete—Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 1863–1867, 1999. Disponível em: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860184.

BHUIYAN, M. A. Rahman *et al.* Polyurethane–superabsorbent polymer-coated cotton fabric for thermophysiological wear comfort. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 54, n. 12, p. 9267–9281, 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-019-03495-8>.

CHANEY, RC *et al.* Evaluation of Sulfate Expansion in Soil-Cements. **Geotechnical Testing Journal**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 269, 1996. Disponível em: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?GTJ10352J>.

CHARITHA, V. *et al.* Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 122851, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821006115>.

CHEN, Jianping *et al.* Mechanical, Rheological and Release Behaviors of a Poloxamer 407/ Poloxamer 188/Carbopol 940 Thermosensitive Composite Hydrogel. **Molecules**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 12415–12425, 2013. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1420-3049/18/10/12415>.

DAVIS, Cole R.; KELLY, Stacey L.; ERK, Kendra A. Comparing laser diffraction and optical microscopy for characterizing superabsorbent polymer particle morphology, size, and swelling capacity. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 135, n. 14, p. 46055, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.46055>.

ESTEVEZ, Luís Pedro. Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 717–724, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946511000710>.

G., Dhinakaran; CHANDANA, Gangava Hari. Compressive Strength and Durability of Bamboo Leaf Ash Concrete. **Jordan Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 279–289, 2016. Disponível em: https://elearning.just.edu.jo/jjce/issues/show_paper.php?pid=3601.

GARCÍA, Alvaro *et al.* Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 46, n. 8, p. 1275–1289, 2013. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-012-9971-6>.

GOMES, L M. **Avaliação da potencialidade de resíduo de base celulósica advindo do setor de higiene pessoal testando sua adição em argamassa de revestimento**. 2014. 117 f. - Unisinos, [s. l.], 2014.

HADDADINE, Nabila *et al.* Preparation and characterization of carbopol/silver nanoparticles composites obtained by heating process for antimicrobial application. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 477, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10965-014-0477-5>.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, Ananth. A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 147, p. 546–559, 2017.

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

HOVER, Kenneth C. The influence of water on the performance of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 3003–3013, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061811000249>.

IGLIŃSKI, Bartłomiej; BUCZKOWSKI, Roman. Development of cement industry in Poland – History, current state, ecological aspects. A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 702–720, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616314809>.

ISMAIL, Sameh H. *et al.* Synthesis and Characterization of Antibacterial Carbopol/ZnO Hybrid Nanoparticles Gel. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1092, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/9/1092>.

JENSEN, Ole Mejlhede; HANSEN, Per Freiesleben. Water-entrained cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 647–654, 2001. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000888460100463X>.

JSA. **K 7223: Testing Method for Water Absorption Capacity of Super Absorbent Polymers**. [S. l.]: Japanese Standards Association, 1996.

JSA. **K 7224: Testing Method for Water Absorption Rate of Super Absorbent Polymers**. 96. ed. [S. l.]: Japanese Standards Association, 2021.

KAMINSKY, Amanda *et al.* Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete Members of ASTM Subcommittee C09.24 summarize industry context behind new ASTM standard specification. **Concrete International**, [s. l.], v. 42, 2020.

LI, Zhi *et al.* Nanoporous Carbon Foam for Water and Air Purification. **ACS Applied Nano Materials**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 1564–1570, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnm.9b02347>.

LIN, Shan-Yang; YU, Hui-Ling. Thermal stability of methacrylic acid copolymers of Eudragits L, S, and L30D and the acrylic acid polymer of carbopol. **Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry**, [s. l.], v. 37, n. 13, p. 2061–2067, 1999. Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-0518\(19990701\)37:13%3C2061::AID-POLA20%3E3.0.CO;2-Y](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-0518(19990701)37:13%3C2061::AID-POLA20%3E3.0.CO;2-Y).

MA, Xianwei; LIU, Jianhui; SHI, Caijun. A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials. **Construction and Building Materials**,

[s. l.], v. 218, p. 385–393, 2019. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819312954>.

MA, Xiaofang; WEN, Guohua. Development history and synthesis of super-absorbent polymers: a review. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 136, 2020.

Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10965-020-02097-2>.

MA, Jian Feng; YAMAJI, Naoki. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 392–397, 2006. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1360138506001634>.

MACIEL (TRANSL), M. J. **Vitruvius, De Architectura**. 3. ed. [S. l.]: IST Press, 2009.

MANZANO, M A R *et al.* ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO DE UM POLÍMERO SUPERABSORVENTE UTILIZADO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS. *In:* , 2015, Lisboa. **Anais do CONPAT 2015**. Lisboa: Associação Brasileira de Patologia das Construções, 2015.

MASSAZZA, Franco. Pozzolanitic cements. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 185–214, 1993. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0958946593900233>.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 28, 2018. Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1617/s11527-018-1149-4>.

MECHTCHERINE, Viktor. Use of superabsorbent polymers (SAP) as concrete additive.

RILEM Technical Letters, [s. l.], v. 1, p. 81, 2016. Disponível em:

<http://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/18>.

MÖNNIG, Sven. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete.

Otto-Graf-Journal, [s. l.], v. 16, p. 193, 2005.

MORAES, M.J.B. J.B. *et al.* Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanitic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 208, p. 369–380, 2019. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061819304805>.

MORALES, E.V. *et al.* Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanitic activation. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 22–28, 2009. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946508001364>.

MU, Song *et al.* Property and microstructure of aluminosilicate inorganic coating for concrete: Role of water to solid ratio. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 148, p. 846–856, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181730956X>.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NORSURAYA, S.; FAZLENA, H.; NORHASYIMI, R. Sugarcane Bagasse as a Renewable Source of Silica to Synthesize Santa Barbara Amorphous-15 (SBA-15). **Procedia**

Engineering, [s. l.], v. 148, p. 839–846, 2016. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816310979>.

OMIDIAN, H. *et al.* Modified acrylic-based superabsorbent polymers (dependence on particle size and salinity). **Polymer**, [s. l.], v. 40, n. 7, p. 1753–1761, 1999. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386198003942>.

PAIVA, Fábio *et al.* Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 1–14, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821005936>.

PALMA E SILVA, Arthur Aviz *et al.* Evaluation of mechanical properties and microstructure of high-performance mortars with superabsorbent polymers and metakaolin by means of X-ray computed microtomography. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, p. 104219, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710222002327>.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2008.

PRAMOD, Kannissery *et al.* Unveiling the compatibility of eugenol with formulation excipients by systematic drug-excipient compatibility studies. **Journal of Analytical Science and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 34, 2015. Disponível em: <http://www.jast-journal.com/content/6/1/34>.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; MALHOTRA, V.M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 125–133, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/095894659500005W>.

RAMOS, Edenir Zabicki Soares; MONTERIO, Elislene Dantas; MARZANO JUNIOR, Marcos Aurélio Pinto. Sistema de controle autônomo para cura úmida do concreto. *In*: ENGENHARIA NA PRÁTICA: CONSTRUÇÃO E INOVAÇÃO - VOL.2. [S. l.: s. n.], 2021. p. 51–88.

SAFITRI, Fenny Indah; NAWANGSARI, Desy; FEBRINA, Dina. Overview: Application of Carbopol 940 in Gel. *In*: , 2021, Paris, France. **Proceedings of the International Conference on Health and Medical Sciences (AHMS 2020)**. Paris, France: Atlantis Press, 2021. Disponível em: <https://www.atlantis-press.com/article/125951906>.

SAHOO, S *et al.* Structural Analysis of Ciprofloxacin-Carbopol Polymeric Composites by X-Ray Diffraction and Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy. **Tropical Journal of Pharmaceutical Research**, [s. l.], v. 10, n. 3, 2011. Disponível em:
<http://www.ajol.info/index.php/tjpr/article/view/67938>.

SAHOO, S; CHAKRABORTI, K C; BEHERA, P K. FTIR and Raman Spectroscopic Investigations of Ofloxacin / Carbopol940 Mucoadhesive Suspension. **International Journal of PharmTech Research**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 382–391, 2012.

SANNINO, A. *et al.* Biomedical application of a superabsorbent hydrogel for body water elimination in the treatment of edemas. **Journal of Biomedical Materials Research**, [s. l.], v. 67A, n. 3, p. 1016–1024, 2003. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jbm.a.10149>.

SARFRAZ, Muhammad *et al.* Carbopol Based Hydrogels for ITOPRIDE Hydrochloride Delivery; Synthesis, Characterization and Comparative Assessment with Various Monomers. **Journal of Functional Biomaterials**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 295, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4983/13/4/295>.

SCHRÖFL, Christof; SNOECK, Didier; MECHTCHERINE, Viktor. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: report of the RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 197, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-017-1060-4>.

SEFF, L. *et al.* Development of mortars containing superabsorbent polymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 95, p. 575–584, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815301951>.

SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* Bamboo as a Sustainable Building Material. *In*: BAMBOO AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 1–23. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-99-0232-3_1.

SILVA, Lucas Henrique Pereira *et al.* Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 42, n. May, p. 102769, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221006276>.

SINHA, Vibha; CHAKMA, Sumedha. Advances in the preparation of hydrogel for wastewater treatment: A concise review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 103295, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221334371930418X>.

SNELLINGS, R.; MERTENS, G.; ELSEN, J. Supplementary Cementitious Materials. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, [s. l.], v. 74, n. 1, p. 211–278, 2012. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/rimg/article/74/1/211-278/140929>.

SOUZA, M *et al.* Influência do tipo de cura no comportamento mecânico de argamassas confeccionadas com areia de Scheelita. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 91–94, 2019.

SUHAIL, Muhammad; WU, Pao-Chu; MINHAS, Muhammad Usman. Using Carbomer-Based Hydrogels for Control the Release Rate of Diclofenac Sodium: Preparation and In Vitro Evaluation. **Pharmaceuticals**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 399, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8247/13/11/399>.

TAN, Yawen *et al.* Influence of superabsorbent polymers (SAPs) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 270, p. 121442, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820334462>.

TRTIK, P *et al.* Neutron tomography measurements of water release from superabsorbent polymers in cement paste. *In*: , 2010. **International RILEM Conference on Material Science**. [S. l.: s. n.], 2010. p. 175–185.

TRTIK, P. *et al.* Release of internal curing water from lightweight aggregates in cement paste investigated by neutron and X-ray tomography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, [s. l.], v. 651, n. 1, p. 244–249, 2011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900211002907>.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2023**. [S. l.: s. n.], 2023.

VILLAR COCIÑA, Ernesto *et al.* Pozzolanic Characterization of Cuban Bamboo Leaf Ash: Calcining Temperature and Kinetic Parameters. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 691–699, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-016-9741-8>.

ZHENG, Dan *et al.* Synthesis and characterization of dopamine-modified Ca-alginate/poly(N-isopropylacrylamide) microspheres for water retention and multi-responsive controlled release of agrochemicals. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 160, p. 518–530, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813020333948>.

ZOHURIAAN-MEHR, M. J. *et al.* Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 45, n. 21, p. 5711–5735, 2010. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-010-4780-1>.

ZOHURIAAN-MEHR, M J; KABIRI, K. Superabsorbent Polymer Materials: A Review. **Iranian Polymer Journal**, [s. l.], v. 17, n. 6, p. 451–477, 2008.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos durante o período de doutorado (2020-2024).

Buscou-se utilizar o carbopol 940 enquanto polímero superabsorvente para realização da cura interna. Foi possível concluir que o C940 empregado não apresentava as características físicas (granulometria e cinética de absorção / dessorção) necessárias para tal aplicação e não contribuiu com a cura adequada que levaria ao aumento da resistência a compressão. Além disso, a resistência das argamassas com CFB foi mais prejudicada uma vez que as argamassas compostas são mais sensíveis a falta de umidade durante o período de cura.

Estudos de durabilidade de argamassas compostas com até 40% de substituição do cimento por CFB também foram conduzidos. A grande quantidade de substituição de cimento por CFB já é um destaque dessa pesquisa, uma vez que a literatura não apresenta bons resultados de resistência a compressão com essa quantidade substituição. Além do teste de resistência a compressão os resultados dos ensaios de resistividade elétrica e ataques por cloretos mostraram resultados superiores a amostra de referência em todas as dosagens testadas (20%, 25%, 30% e 40%) o que indica maior durabilidade das estruturas moldadas com este material.

Em conclusão, as argamassas desenvolvidas com CFB mostraram-se uma possível alternativa para melhorar a durabilidade de estruturas, diminuir custos de manutenção podendo promover a conservação ambiental por meio de menor consumo de recursos naturais não renováveis e menor emissão de gases poluidores, além de contribuir com novas destinações para este resíduo industrial.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018.
- EMAMVERDIAN, A.; DING, Y. L.; RANAEI, F.; AHMAD, Z. Application of Bamboo Plants in Nine Aspects. **The Scientific World Journal**, [s. l.], v. 2020, p. 1–9, 2020. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2020/7284203/>.
- FRANÇA, H. F.; SILVA, C. da; BRITO, G. de; PAIXÃO, C. A. B. Dimensionamento de uma passarela de bambu: uma alternativa sustentável para obras em áreas rurais. **UNICREA**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 161–189, 2023.
- PAIVA, F.; TAMASHIRO, J. R.; SILVA, L. H. P.; KINOSHITA, A. Utilization of inorganic solid wastes in cementitious materials – A systematic literature review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 285, p. 1–14, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061821005936>.
- PAIVA, F. F. G. de; SANTOS, L. F. dos; TAMASHIRO, J. R.; SILVA, L. H. P.; TEIXEIRA, S. R.; GALVIN, A. P.; LÓPEZ-UCEDA, A.; KINOSHITA, A. Effect of phenolic resin content in waste foundry sand on mechanical properties of cement mortars and leaching of phenols behaviour. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 31, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255412200359X?via%3Dihub>
- PALOMBINI, F. L.; NOGUEIRA, F. M. (org.). **Bamboo and Sustainable Construction**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. (Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes). Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-981-99-0232-3>.
- RAMOS DA SILVA, A.; PAIVA, F. F. G. de; SILVA, L. H. P.; SANTOS, L. F. dos; TOLOSA, G. R.; JOB, A. E.; GALVÍN, A. P.; LÓPEZ-UCEDA, A.; TEIXEIRA, S. R.; KINOSHITA, A.; SANTOS, R. J. dos. Evaluation of pozzolanic activity and environmental assessment of cement composites with lubricating oil re-refining ash. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 376, p. 130980, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182300692X>.
- SILVA, L. H. P.; PAIVA, F. F. G. de; TAMASHIRO, J. R.; ALMEIDA, M. P. B. de; de MARIA, V. P. K.; OLIVEIRA, V. M. A. DE; KINOSHITA, A. Bamboo as a Sustainable Building Material. In: **BAMBOO AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION**. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 1–23. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-99-0232-3_1.
- SILVA, L. H. P.; PAIVA, F. F. G. de; TAMASHIRO, J. R.; KINOSHITA, A. Potential of bamboo leaf ash as supplementary binder materials - A systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 71, p. 106547, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235271022300726X>.
- TAMASHIRO, J. R.; KINOSHITA, A.; SILVA, L. H. P.; PAIVA, F. F. G. DE; ANTUNES, P. A.; SIMÕES, R. D. Compressive resistance of concrete produced with recycled concrete aggregate and sugarcane vinasse waste-water. **Cleaner Engineering and**

Technology, v. 6, 2022a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821003220?via%3Dihub>.

TAMASHIRO, J. R.; LIMA, I. S.; PAIVA, F. F. G. DE; SILVA, L. H. P.; OLIVEIRA, D. V. M. DE; BAFFA, O.; KINOSHITA, A. Treatment of Sugarcane Vinasse Using Heterogeneous Photocatalysis with Zinc Oxide Nanoparticles. **Sustainability**, v. 14, n. 23, 2022b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/16052>.