



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC)**

CAMILA CRISTINA CANHESTRO GUIMARÃES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
CINZAS DE BIOMASSA EM DIFERENTES PERÍODOS DE
ESTOCAGEM**

**CATALÃO - GO
2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO
FACULDADE DE ENGENHARIA

Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020
Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA)

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES
ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E
DISSERTAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCA)**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Catalão (UFCA) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFCA), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFCA é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação ou Tese? Dissertação

2. Nome completo do autor: **CAMILA CRISTINA CANHESTRO GUIMARÃES**

Nome completo do(a) orientador(a): **HEBER MARTINS DE PAULA**

3. Título do trabalho

Título: **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CINZAS DE BIOMASSA EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM**

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento: SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs.: Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor



Documento assinado eletronicamente por **HEBER MARTINS DE PAULA, Orientador(a)**, em 23/05/2024, às 08:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CAMILA CRISTINA CANHESTRO GUIMARÃES, Usuário Externo**, em 23/05/2024, às 22:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0064122** e o código CRC **CAD3EB4F**.

CAMILA CRISTINA CANHESTRO GUIMARÃES

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM
CINZAS DE BIOMASSA EM DIFERENTES PERÍODOS DE
ESTOCAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), como requisito para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Construção Civil. Linha de pesquisa: Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade na Construção Civil.
Orientador: Professor Doutor Heber Martins de Paula.

CATALÃO - GO

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Canhestro Guimarães, Camila Cristina

Análise do desempenho de argamassas produzidas com cinzas de biomassa em diferentes períodos de estocagem / Camila Cristina Canhestro Guimarães. - 2024.

91, f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Heber Martins de Paula.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Faculdade de Engenharia, Catalão, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Catalão, 2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Materiais cimentícios suplementares. 2. Blends. 3. Cinzas de biomassa. 4. Argamassas industrializadas. 5. Desempenho por período de estocagem. I. Paula, Heber Martins de, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO
Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020
Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 17 da sessão de Defesa de Dissertação de **CAMILA CRISTINA CANHESTRO GUIMARÃES**, que confere o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

Aos vinte e sete dias do mês de março de dois mil e vinte e quatro a partir das 10 horas, na plataforma digital Google Meet, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CINZAS DE BIOMASSA EM DIFERENTES PERÍODOS DE ESTOCAGEM**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Professor Doutor HEBER MARTINS DE PAULA (PPGEC/UFCAT)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professor Doutor ED CARLO ROSA PAIVA (PPGEC/UFCAT)**, membro titular interno; da **Professora Doutora LEILA APARECIDA DE CASTRO MOTTA (PPGEC/UFU)**, membro titular externo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Heber Martins de Paula, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e sete dias do mês de março de dois mil e vinte e quatro.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **HEBER MARTINS DE PAULA**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/03/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ED CARLO ROSA PAIVA**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/03/2024, às 12:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LEILA APARECIDA DE CASTRO MOTTA**, **Usuário Externo**, em 27/03/2024, às 12:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0048840** e o código CRC **B0DFF1E2**.

Dedico esta dissertação a todos os profissionais da Engenharia Civil, cujo trabalho incansável e dedicação contribuem para a construção e melhoria contínua da nossa sociedade. A todos os engenheiros, técnicos, operários e demais colaboradores que, com suas habilidades e esforços, tornam possível a realização de grandes projetos, meu respeito profundo. Esta conquista é sem dúvida, um reflexo do legado que vocês constroem diariamente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele é a inteligência suprema, o principal agradecimento por me conceder a oportunidade da vida e pelas diversas manifestações de bondade e misericórdia.

Quero expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Romeu e Josilene. Vocês foram a base sólida sobre a qual construí minha trajetória acadêmica. É uma dádiva saber que acreditam em mim, mesmo quando eu duvidava de minha própria capacidade.

Aos meus irmãos, João Ricardo e Marcelo, quero expressar minha gratidão pelo apoio incondicional durante esta jornada. Marcelo, obrigada por sempre estar ao meu lado.

Ao professor e orientador Professor Heber Martins de Paula, pela confiança, dedicação e competência em conduzir esta orientação, não mediu esforços para me ajudar, sem a qual não seria possível a realização desta pesquisa. Aos professores do PPGEC, foram grandes construtores do meu conhecimento ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao Claudinei, Walter e Sérgio, pela colaboração e ajuda técnica nos laboratórios, sempre prestativos e amigos. E aos colegas que tive o prazer de conhecer e compartilhar essa trajetória acadêmica.

As empresas localizadas nas cidades de João Pinheiro - MG, Araguari - MG e Catalão - GO, e respectivos funcionários, que foram solícitos ao fornecerem os materiais necessários para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal de Catalão, que forneceu espaço físico e pessoal nesta pesquisa, em especial a CAPES pelo apoio financeiro.

Obrigada a todos que direta e indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

CANHESTRO GUIMARÃES, C. C. **Análise do desempenho de argamassas produzidas com cinzas de biomassa em diferentes períodos de estocagem**. Catalão. Dissertação (Mestrado) - Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Catalão, 2024, n° p. 91.

A aplicação de resíduos agroindustriais, como as cinzas da casca de arroz (CCA), as cinzas do cavaco de eucalipto (CCE) e as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), em produtos cimentícios, melhora a gestão, reduz o volume e contribui com disposição final destes materiais descartados no meio ambiente. Assim sendo, para que esses resíduos sejam inseridos e absorvidos na construção civil, faz-se necessária a avaliação dos requisitos de desempenho químico, físico e mecânico, validando-os como materiais cimentícios suplementares (MCS). Para tanto, visando a utilização dessas cinzas de biomassa em substituição parcial do cimento Portland em argamassas modificadas, foram produzidos três traços $T_{mín}$, $T_{méd}$ e $T_{máx}$, utilizando respectivamente os *blends* de cinzas de biomassa, $C_{mín}$, $C_{méd}$ e $C_{máx}$, e para fins comparativos, foi produzido um traço referência (T_{ref}) isento de substituições. Preliminarmente foram realizadas as caracterizações das cinzas e *blends* de biomassa através dos ensaios de composição granulométrica, finura, umidade, perda ao fogo, densidade de partículas e índice de atividade pozolânica *Chapelle*. Além disso, foi determinada a quantidade de água necessária para a obtenção das pastas de consistência normal e o intervalo de tempo de pega para cada uma das pastas cimentícias modificadas com os *blends* de biomassa. Objetivando analisar a influência da incorporação dos *blends* nas argamassas modificadas, foram avaliados aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão simples. Ainda, no estado endurecido, foi determinada a absorção de água por capilaridade aos 28 dias. Os resultados apontaram que o traço da argamassa modificada $T_{méd}$ pode ser escolhido como traço ideal para o desenvolvimento de uma argamassa ecoeficiente. Por fim, validou-se o tempo de estocagem do traço ideal da argamassa modificada, que substitui em 26,75% o cimento Portland por cinzas de biomassa. Para tanto, o desempenho da argamassa foi analisado através da dosagem e moldagem dos corpos de prova a cada 30 dias, executando os ensaios de *flow table*, resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, variação dimensional, resistência na aderência à tração, permeabilidade e a microscopia eletrônica de varredura. O traço ideal apresentou um bom desempenho até os 60 dias de estocagem, porém aos 90 dias de estocagem, tanto a argamassa referência, quanto a argamassa modificada, tiveram suas propriedades comprometidas.

Palavras-chave: Materiais cimentícios suplementares, *Blends*, Cinzas de biomassa, Argamassas industrializadas, Desempenho por período de estocagem.

ABSTRACT

CANHESTRO GUIMARÃES, C. C. **Analysis of the performance of mortars produced with biomass ash in different storage periods.** Catalão. Dissertação (Mestrado) - Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Universidade Federal de Catalão, 2024, n° p. 91.

The application of agro-industrial waste, such as rice husk ash (RHA), eucalyptus chip ash (ECA) and sugarcane bagasse ash (SCBA), in cement products, improves management, reduces the volume and contributes to the final disposal of these discarded materials in the environment. Therefore, for these wastes to be included and addressed in civil construction, it is necessary to evaluate the physical, physical and mechanical performance requirements, validating them as supplementary cementitious materials (SCM). To this end, they began to use this biomass ash in partial replacements of Portland cement in modified mortars, three traits T_{min}, T_{mea} and T_{max} were produced, using respectively the mixtures of biomass ash, C_{min}, C_{mea} and C_{max}, and for comparative purposes, a reference trace (T_{ref}) free of substitutions was produced. Preliminarily, the characterizations of the ash and biomass mixtures were carried out through tests of granulometric composition, fineness, humidity, fire loss, particle density and Chapelle pozzolanic activity index. Furthermore, the amount of water required to supply the masses of normal consistency and the setting time interval for each of the cementitious masses modified with the biomass mixtures were determined. Aiming to analyze the influence of the incorporation of the mixtures in the modified mortars, the flexural tensile strength and simple seam resistance were evaluated at 7, 14, 28 and 56 days of curing. Even so, in the long-lasting state, water absorption by capillarity was determined at 28 days. The results showed that the modification trait can be chosen as the ideal trait for the development of an eco-efficient mortar. Finally, the storage time of the ideal mixture of the modified mortar was validated, which replaces Portland cement by 26.75% with biomass ash. To this end, the performance of the mortar was analyzed by dosing and molding the test specimens every 30 days, carrying out flow table tests, simple elasticity resistance, flexural tensile strength, dimensional variation, and tensile adhesion resistance, permeability and scanning electron microscopy. The ideal mix performed well up to 60 days of storage, but after 90 days of storage, both the reference mortar and the modified mortar had their properties compromised.

Keywords: Supplementary cementitious materials, Blends, Biomass ash, Industrialized mortars, Performance by storage period.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2. 1 - Processo de aglomeração do cimento Portland.	22
Figura 2. 2 - Silicato de cálcio hidratado (C-S-H).	23
Figura 2. 3 - Hidróxido de cálcio (CH).	23
Figura 2. 4 – Etringita (AFt) e Monossulfato (AFm).	23
Figura 2. 5 - Algumas fases da pasta de cimento hidratada em concreto aos 28 dias de cura: hidróxido de cálcio e etringita (a) e silicato de cálcio hidratado e etringita (b).	24
Figura 2. 6 - Algumas fases da pasta de cimento hidratada em argamassa aos 540 dias de cura: géis de C-S-H, portlandita e etringita (a) e detalhes das agulhas de etringita e cristais de portlandita (b).	24
Figura 2. 7 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado: sem adições (a) e com adições (b).	25
Figura 2. 8 - Representação esquemática de partículas de cimento Portland em pastas sem adição (a), com aditivo superplastificante (b) e com superplastificante e adição mineral de elevada finura (c). ...	26
Figura 2. 9 - Classificação de materiais cimentícios suplementares.	27
Figura 2. 10 - Distribuição de partículas e empacotamento do sistema: empacotamento adequado (a) e falha de empacotamento (b).	29
Figura 2. 11 - Partículas de adição mineral presentes na pasta de cimento hidratada de amostra de concreto aos 28 dias de cura.	30
Figura 2. 12 – Micrografia em amostras de concreto com resíduos de corte de mármore e granito (RCMG): isento de inserção (a), com 5% de inserção (b), e 10% de inserção (c).	31
Figura 2. 13 - Consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para diferentes materiais.	32
Figura 2. 14 - Classificação química de cinzas de diversas fontes de biomassa.	33
Figura 2. 15 - Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.	40
Figura 2. 16 - Formas de ruptura no ensaio de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco: Tipo A (a), Tipo B (b), Tipo C (c), Tipo D (d) e Tipo E (e) e esquema do conjunto de camadas (f).	40
Figura 2. 17 - Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassas de cimento e cal.	41
Figura 3. 1 - Delineamento geral da pesquisa.	42
Figura 3. 2 – Equipamentos utilizados na uniformização das cinzas de biomassa: secagem em estufa (a), peneiramento com peneira #4 (b) e homogeneização no liquidificador industrial (c).	43
Figura 3. 3 - Cinzas de biomassa após uniformização: CCA (a), CBCA (b) e CCE (c).	44
Figura 3. 4 - Ensaio de pozolanicidade <i>Chapelle</i> : aparato para ensaio (a) e esquema do aparato (b)...	45
Figura 3. 5 - Produção das dosagens ótimas: argamassadeira (a), pesagem materiais secos (b) e produção das argamassas (c).	48

Figura 3. 6 - Cura seca dos cp's de argamassa.	49
Figura 3. 7 – Ensaio de tração na flexão e compressão simples: prensa universal (a), tração na flexão (b) e compressão simples (c).....	49
Figura 3. 8 - Ensaio de absorção por capilaridade: cp's aos 28 dias (a) e lâmina d'água (b).....	51
Figura 3. 9 - Traço ideal da argamassa modificada com cinzas de biomassa: pré-dosagem (a) e acondicionamento em sacos plásticos (b).	52
Figura 3. 10 - Ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa: mesa e molde metálico (a), antes do ensaio (b) e após ensaio (c).	54
Figura 3. 11 - Corpos de prova (cp's) Tref e Tméd, dosados em t0.	56
Figura 3. 12 - Ensaio de retração: aparelho comparador (a), cp's Tref e Tméd (b) e cp's Tméd-t90dias-cura28dias (c).....	57
Figura 3. 13 - Ensaio de aderência à tração ao substrato: cp's componente de alvenaria sem chapisco com argamassa Tméd e Tref para t0 dia (a), equipamento utilizado para furos (b) equipamento para aplicação da carga (c).....	59
Figura 3. 14 - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão ou permeabilidade (cachimbo): aparato para ensaio (a) e esquema do Tubo de Carsten para superfícies verticais (b).....	60
Figura 4. 1 - Distribuição granulométrica da CCA, CBCA e CCE.....	61
Figura 4. 2 - Amostras das cinzas de biomassa após ensaios de distribuição granulométrica: CCA (a), CBCA (b) e CCE (c).	62
Figura 4. 3 – Finura (a), perda ao fogo (b) e teor de umidade (c).	64
Figura 4. 4 - Densidade de partículas (a) e massa específica (b).	64
Figura 4. 5 - Determinação da pasta de consistência normal (a), início de pega (b) e fim de pega (c).	66
Figura 4. 6 - Resistência à compressão simples para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14 28 e 56 dias de cura.....	68
Figura 4. 7 - Resistência à tração na flexão para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14,28, e 56 dias de cura.....	69
Figura 4. 8 - Cp's Tmáx, Tméd, Tmín e Tref após ensaio de absorção por capilaridade (a), cp's Tmín (b), cp's Tméd (c) e cp's Tmáx (d).	70
Figura 4. 9 - Ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa: antes do ensaio (a), após ensaio (b) e medição (c).....	73
Figura 4. 10 - Dosagem padrão: resultados obtidos no ensaio <i>flow table</i> , para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,24 e 0,20.	73
Figura 4. 11 - Adequação da dosagem: Resultados obtidos no ensaio <i>flow table</i> , para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,25 e 0,21.	74
Figura 4. 12 – Resistência à compressão simples (f_a) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.	74
Figura 4. 13 - Resistência à tração na flexão (R_f) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.	75

Figura 4. 14 - Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade (cachimbo).	77
Figura 4. 15 – Micrografia via MEV: Tref-5000x (a) e Tméd-5000x (b).	78
Figura 4. 16 - Tref-500x (a) e elementos químicos (b).	79
Figura 4. 17 - Tméd-500x (a) e elementos químicos (b).	80
Quadro 2. 1 - Classificação dos materiais pozolânicos.	28
Quadro 2. 2 - Exigências químicas e físicas para materiais pozolânicos.	28
Quadro 2. 3 - Classificação das argamassas de acordo com a resistência potencial de aderência à tração ao substrato R_a	36
Quadro 2. 4 - Classificação das argamassas conforme a variação dimensional.	37
Quadro 2. 5 - Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos de acordo com a resistência à tração na flexão.	37
Quadro 2. 6 - Classificação das argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade.	37
Quadro 2. 7 - Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação - Estado endurecido.	38
Quadro 2. 8 - Classificação das argamassas de acordo com a resistência à compressão.	38
Quadro 3. 1 - Características do cimento Portland CPV-ARI utilizado.	45
Quadro 3. 2 - Ensaio de caracterização do Estudo 1.	46
Quadro 3. 3 - Características da cal hidratada CH-III utilizada.	47
Quadro 3. 4 - Metodologia para a produção dos traços ótimos das argamassas do Estudo 2.	47
Quadro 3. 5 - Quantitativos dos materiais secos das argamassas Tméd e Tref, pré-dosados, acondicionados e armazenados.	53
Quadro 3. 6 - Metodologia para análise do desempenho dos lotes das argamassas Tméd e Tref, nos tempos de estocagem $t(i)$	55
Quadro 4. 1 - Resultados da finura (F).	62
Quadro 4. 2 - Síntese das características do traço ideal da argamassa modificada Tméd.	72
Quadro 4. 3 - Resultados obtidos para a variação dimensional (ϵ_i) e variação de massa (Δ_{28}).	76
Quadro 4. 4 - Resultados obtidos no ensaio de arrancamento.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland.....	20
Tabela 2. 2 - Porcentagens de cada constituinte do cimento.....	21
Tabela 2. 3 - Proporções, em massa, das argamassas utilizadas por Bonfim (2019).	34
Tabela 2. 4 - Faixas para possíveis substituições do cimento por cinzas de biomassa.	34
Tabela 3. 1 - <i>Blends</i> de cinzas de biomassa	44
Tabela 3. 3 - Traços em massa (kg) para a produção das argamassas.....	47
Tabela 4. 1 - Resultados do teor de umidade (U) e perda ao fogo (PF).	62
Tabela 4. 2 - Resultados para a densidade de partículas (Dp).....	63
Tabela 4. 3 -Resultados para a massa específica (μ).....	63
Tabela 4. 4 - Índice de atividade pozolânica <i>Chapelle</i>	65
Tabela 4. 5 - Resultados da quantidade de água (A), início de pega (IP), fim de pega (FP) e intervalo de pega (Δ_p).....	65
Tabela 4. 6 - Resultados da absorção e coeficiente de capilaridade.....	70
Tabela 4. 7- Resultado médio e desvio padrão da resistência à compressão simples e tração na flexão (Método Scott-Knott, $p=0,05$).....	71
Tabela 4. 8 - Composição química semiquantitativa das argamassas Tref e Tméd (% em massa) via EDS/MEV.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
CBCA – cinza do bagaço de cana-de-açúcar;
CCA – cinza da casca de arroz;
CCE – cinza do cavaco de eucalipto;
a/ms – água/ materiais secos;
cp's – corpos de provas;
T_{mín} – traço com teor mínimo de incorporação de cinzas de biomassa;
T_{méd} – traço com teor médio de incorporação de cinzas de biomassa;
T_{máx} – traço com máximo teor de incorporação de cinzas de biomassa;
T_{ref} – traço referência;
C_{mín} – *blend* com cinzas de biomassa, porcentagem mínima;
C_{méd} – *blend* com cinzas de biomassa, porcentagem média;
C_{máx} – *blend* com cinzas de biomassa, porcentagem máxima;
ANOVA – análise de variância;
SK – teste Scott-knott;
t_i - tempo de estocagem;
t₀ – tempo de estocagem 0 dia;
t₃₀ – tempo de estocagem 30 dias;
t₆₀ – tempo de estocagem 60 dias;
t₉₀ – tempo de estocagem 90 dias;
D_p – densidade de partículas;
PF – perda ao fogo;
F – finura;
A – absorção de água;
IP – início de pega;
FP – fim de pega;
 Δp – intervalo de pega;
 Δ_i – variação de massa;
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura;
EDS - Espectroscopia por Dispersão de Elétrons;
MSR - Metodologia de Superfície de resposta;
R_c ou f_a - resistência à compressão simples;
 ϵ_i - variação dimensional;
R_a - resistência potencial de aderência à tração ao substrato;
R_f - resistência à tração na flexão.

LISTA DE SÍMBOLOS

$C_3S \equiv Ca_3SiO_5 \equiv 3CaO.SiO_2$ – Silicato tricálcico, alita;

$C_2S \equiv Ca_2SiO_4 \equiv 2CaO.SiO_2$ – Silicato dicálcico, belita;

$C_3A \equiv Ca_3Al_2O_6 \equiv 3CaO.Al_2O_3$ – Aluminato tricálcico, aluminato;

$C_4AF \equiv 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ – Ferroaluminato tetracálcico, ferrita;

$F \equiv Fe_2O_3$ – Óxido férrico;

$H \equiv H_2O$ – Água;

$C \equiv CaO$ – Cal;

$CaCO_3$ – Carbonato de cálcio;

$S \equiv SiO_2$ – Sílica;

SO_4^{2-} - Sulfato

$\bar{S} \equiv SO_3$ – Trióxido de enxofre;

$A \equiv Al_2O_3$ – Alumina;

$CH \equiv CaO.H_2O \equiv Ca(OH)_2$ – Hidróxido de cálcio, portlandita;

$AFt \equiv C_6A\bar{S}_3H_{32} \equiv 6CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32H_2O$ – Trissulfoaluminato de cálcio, etringita;

$AFm \equiv C_4A\bar{S}H_{18} \equiv 4CaO.Al_2O_3.SO_4.18H_2O$ – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado;

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado;

CH - Hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita;

C – Carbono;

Ca – Cálcio;

O – Oxigênio;

Si -Silício.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 CIMENTO PORTLAND	20
2.2 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)	25
2.3 EVIDÊNCIAS DOS MCS EM PRODUTOS CIMENTÍCIOS	30
2.4 REQUISITOS E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO	34
3 METODOLOGIA	42
3.1 ESTUDO 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS E <i>BLENDS</i> DE BIOMASSA	43
3.2 ESTUDO 2 – DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DOS TRAÇOS ÓTIMOS	46
3.3 ESTUDO 3 – ESCOLHA DO TRAÇO IDEAL PARA A ARGAMASSA MODIFICADA	51
3.4 ESTUDO 4 – DESEMPENHO DA ARGAMASSA MODIFICADA POR TEMPO DE ESTOCAGEM	52
4 RESULTADOS	61
4.1 ESTUDO 1- CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS E <i>BLENDS</i> DE BIOMASSA	61
4.2 ESTUDO 2 – DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO DOS TRAÇOS ÓTIMOS	67
4.3 ESTUDO 3 – SÍNTESE DAS CARATERÍSTICAS PARA O TRAÇO IDEAL DA ARGAMASSA MODIFICADA	71
4.4 ESTUDO 4 – DESEMPENHO DA ARGAMASSA MODIFICADA POR TEMPO DE ESTOCAGEM	73
4.4.1 <i>Avaliação das propriedades no estado fresco</i>	73
4.4.2 <i>Avaliação das propriedades no estado endurecido</i>	74
4.4.3 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

As cinzas de biomassa são subprodutos da queima de resíduos agrícolas e florestais, e podem ser utilizadas substituindo parcialmente o cimento Portland pois contêm sílica no estado amorfo e outros minerais em suas composições, que ao serem inseridos em produtos cimentícios, como em argamassas e concretos, podem contribuir para a melhoria da resistência, trabalhabilidade e durabilidade. Do ponto de vista agroindustrial, destacam-se as cinzas entre os principais resíduos gerados, por serem estas oriundas de diferentes processos de secagem, geração de vapor e energia, e também por seu potencial de geração de impactos ambientais (CINCOTTO, 1988).

Somando-se a este fato, o setor da construção civil é conhecido por ser um dos principais contribuintes pelo desenvolvimento econômico do Brasil, desta forma, é responsável por uma considerável parcela do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (IBGE, 2021). Entretanto, concomitantemente a esta potencialização do capital brasileiro, esse ramo de atividade impacta negativamente, em grande escala, o meio ambiente, principalmente no que tange as emissões de CO₂, gasto energético e utilização de recursos não renováveis (SILVA, 2016).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2018) a indústria da construção é o setor de atividades humanas que mais consome recursos naturais e utiliza energia de forma intensiva, gerando consideráveis impactos ambientais. Nesse contexto, faz-se necessária a busca por soluções que tenham como principal meta diminuir os impactos advindos da construção civil sobre o meio ambiente.

Assim, a composição das cinzas de biomassa, principalmente as derivadas do bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e cavaco de eucalipto, por apresentarem alta concentração de sílica, um mineral componente das pozolanas, pode ser empregado em argamassas e concretos, resultando em vários benefícios, entre eles a redução do impacto ambiental e a redução do custo final do material cimentício (CARRASCO, *et al.*, 2014; LIMA *et al.*, 2022).

Mesmo tratando-se de resíduos oriundos da combustão de biomassa, usada como fonte de energia renovável, existe também o lançamento de CO₂ na atmosfera, o que carece aplicar esses resíduos em novos processos, inserindo-os na cadeia de suprimentos, promovendo uma economia circular, tornando-os recursos com valor agregado. Dessa forma, a substituição parcial do cimento, na fabricação de argamassas de assentamento e revestimento por cinzas de biomassa, é uma alternativa que vem sendo estudada pela academia (CARRASCO *et al.*, 2014, BONFIM, 2019), tendo em vista que, por se tratar de um material não estrutural, as argamassas apresentam uma predisposição para consumir maiores quantidades de resíduos em sua composição (SAMIEL *et al.*, 2015) e que a diminuição da demanda de cimento Portland está diretamente relacionada com a redução do lançamento de CO₂ na atmosfera (MONTES-HERNANDEZ *et al.*, 2009).

Todavia, faz-se necessário considerar alguns fatores ao utilizá-las para esta finalidade, deve-se realizar testes e estudos para determinar a quantidade ideal de cinzas a serem incorporadas, a dosagem e produção, bem como os efeitos na resistência e durabilidade dos produtos cimentícios ao longo do

tempo, garantindo que as cinzas de biomassa estejam livres de impurezas e contaminantes que possam afetar a qualidade do produto final. Por isso, é recomendável utilizar cinzas de biomassa provenientes de fontes confiáveis e realizar testes de qualidade para garantir que atendam aos requisitos de desempenho.

Os estudos realizados por Cabral, Barbosa e Pinto (2022), Gonçalves, Soares e Paula (2021), Castro *et al.* (2020) e Degen *et al.* (2019), mostram a real influência das adições minerais em concretos e argamassas. Além disso, as pesquisas sobre a cinza da queima da casca de arroz mostraram resultados promissores quando utilizado como substituto do cimento Portland, melhorando as propriedades como trabalhabilidade (KIELING *et al.*, 2009; MORAES *et al.*, 2010), resistência mecânica (BEZERRA *et al.*, 2011; BEZERRA *et al.*, 2012), absorção de água (BEZERRA *et al.*, 2011) e aderência (SILVA; LIBÓRIO, 2003; KIELING *et al.*, 2009; CARASEK, 2017). No mesmo sentido, a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e de cavaco de eucalipto também se mostraram viáveis nos estudos de Canova, Miotto e Mori (2015) e Modolo *et al.* (2013).

Apesar de apresentarem bons resultados no que tange o desempenho, ainda não existem estudos aprofundados que investiguem os impactos do tempo de estocagem das argamassas modificadas com a incorporação destes resíduos, o que torna o material refém do uso imediato e dificulta processo de fabricação, compra e venda. Dessa forma, para que a argamassa modificada se ratifique como um produto viável, suas propriedades deverão atender aos requisitos de desempenho, tanto para o estado fresco quanto para o estado endurecido, após intervalos de tempo de armazenamento.

Para tal, serão utilizados os traços de argamassas com incorporação, identificados por Bonfim (2019), que utiliza cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), cinza de casca de arroz (CCA) e cinza de cavaco de eucalipto (CCE), associadas, em substituição parcial do cimento Portland, definindo os teores de cada cinza por meio da análise por superfície de resposta. Nesse sentido, o presente estudo abordará argamassas modificadas com CBCA, CCA e CCE submetidas a períodos de estocagem no estado seco, buscando identificar como o intervalo de tempo pode interferir em propriedades relacionadas à trabalhabilidade e à resistência.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral analisar o desempenho, durante o período de estocagem, de argamassas produzidas com adições de cinzas de biomassa em substituição parcial ao cimento Portland, em diferentes idades de moldagem e aplicação.

Tendo em vista, os objetivos específicos são:

- Analisar o desempenho dos traços otimizados com inserção de cinzas de biomassa identificados pelo autor Bonfim (2019);
- Avaliar o potencial dos *blends* de cinzas de biomassa como materiais cimentícios suplementares utilizando diferentes técnicas de caracterização;

- Eleger o traço ideal a partir da produção dos traços ótimos das argamassas modificadas com os *blends* de cinzas de biomassa;
- Verificar o desempenho do traço ideal dosado em diferentes períodos de estocagem, avaliando principalmente se há modificações em suas propriedades em função do tempo de armazenamento.

1.2 Justificativa

As cinzas produzidas por processos antrópicos, provenientes da combustão de biomassa são classificadas como pozolanas artificiais (PARIS *et al.*, 2016). Suas incorporações em matrizes cimentícias, substituindo parcialmente o cimento Portland, podem trazer vários benefícios, como a redução do impacto ambiental e o custo do material (ATAIE; RIDING, 2016). Não somente por razões ecológicas, mas também tecnológicas (MORAES *et al.*, 2016), o uso de pozolanas proporciona menor consumo de cimento, melhorias no desempenho mecânico e durabilidade do concreto (LIMA *et al.*, 2022; CAMPOS; MEDEIROS; HOPPE FILHO, 2017; RAMOS; MATOS; SOUSA-COUTINHO, 2013).

A biomassa pode ser usada para a geração de energia, contudo, de acordo com Carrasco *et al.* (2014), mesmo sendo uma tecnologia renovável, esse processo é responsável pelo aumento dos níveis de resíduos advindos da combustão em aproximadamente 210% até 2030. Em que, queimados 7 bilhões de toneladas de biomassa são produzidas 48 toneladas de cinzas (BELVISO, 2018). Assim, torna-se imprescindível encontrar aplicações para agregar valor a este resíduo transformando-o em um recurso alternativo em novos processos.

O emprego das cinzas de biomassa na construção civil com as suas incorporações nos produtos cimentícios, mitiga o problema de gestão de resíduos de biomassa, e, além disso, reduz as emissões de dióxido de carbono (CO₂) ao se tratar da produção do cimento (UKRAINCYK; VRBOS; KOENDERS, 2016; CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA, 2015).

A sílica reativa, presente nas adições minerais, é o componente essencial para desenvolver um comportamento pozolânico, que depende também do tamanho da partícula e a um estado amorfo (ROSELLÓ *et al.*, 2017). Neste sentido, é importante considerar a heterogeneidade das cinzas de biomassa provenientes de resíduos agroindustriais, realizar a caracterização e estudos para verificar os requisitos de desempenho desejados (CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2017), a fim de atestar o potencial destas cinzas como material cimentício suplementar (MCS).

Para tanto, o presente trabalho abordará o desempenho químico, físico e mecânico de argamassas modificadas com inserção de cinzas de biomassa, produzidas após diferentes períodos de estocagem. Contribuindo assim com estudos voltados para produtos ecoeficientes, que atenuam a quantidade de consumo de cimento Portland em produtos cimentícios (BARBOSA; ALMEIDA, 2016).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico amplamente utilizado na construção civil. Os ligantes hidráulicos são substâncias finamente pulverizadas que ao serem misturadas com água são capazes de formar uma pasta cimentícia cujo endurecimento ocorre após uma reação química, física ou físico-química, entre o aglomerante e a água (ISAIA, 2010). Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento Portland é obtido através da moagem do clínquer constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio.

Os componentes do cimento Portland, ao entrar em contato com água reagem quimicamente liberando calor de hidratação formando uma pasta viscosa e densa que, após um período de tempo, originam produtos hidratados conferindo resistência, principalmente ao esforço de compressão, resultando em uma pasta endurecida resistente à água (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MORAIS, 2020).

No decorrer das etapas para obtenção do cimento Portland, o calcário (carbonato de cálcio) é aquecido a 900°C para se decompor em óxido de cálcio (CaO, cal virgem), gerando CO₂. Em seguida, ocorre a clinquerização, a qual necessita de altas temperaturas, entre 1400 a 1500°C, para conferir à mistura a capacidade de sofrer reações físicas e químicas. Assim, nesta etapa os óxidos reagem com a sílica e alumina formando os silicatos e aluminatos, que são as principais fases do clínquer. Este clínquer é então triturado no moinho de bolas junto com a gipsita (sulfato de cálcio) e outros aditivos minerais, para então obter os diferentes tipos de cimentos Portland (PETRUCCI, 1998; BATTAGIN, 2011; SINGH, 2016).

A composição química do cimento engloba quatro constituintes ditos essenciais, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, comumente abreviados em C, S, A e F, respectivamente (BAUER, 1994). Estes componentes encontram-se listados na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 - Principais compostos químicos do cimento Portland.

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

Fonte: Neville, 2016.

Ainda existem outros compostos secundários além dos citados na Tabela 2.1 que, em geral, também fazem parte da massa do cimento, mas em menores percentuais, como o MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O e Na₂O. Em especial conhecidos como álcalis, o potássio (K₂O) e o sódio (Na₂O), podem reagir com os agregados em produtos cimentícios e provocar sua desintegração e afetar na velocidade de ganho de resistência do cimento (NEVILLE, 2016).

As porcentagens de cada componente citado na Tabela 2.1 estão apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2. 2 - Porcentagens de cada constituinte do cimento.

Constituinte do cimento	Abreviatura	Intervalo de porcentagens em massa do cimento
Alita	C ₃ S	50% - 70%
Belita	C ₂ S	15% - 30%
Aluminato	C ₃ A	5% - 10%
Ferrita	C ₄ AF	5% - 15%

Fonte: Adaptado de Taylor, 1997.

Quando o cimento entra em contato com água, em minutos várias reações químicas começam acontecer e continuam por semanas. Segundo Ferreira *et al.* (2019) essas reações de hidratação são responsáveis pela pega e endurecimento do cimento e acontecem por meio do processo de dissolução e precipitação, onde a fase anidra primeiro sofre dissolução e depois as fases hidratadas precipitam. Como regra geral, as propriedades do cimento podem ser obtidas após a cura por 28 dias (CARDARELLI, 2018).

Durante o processo de hidratação do cimento, a primeira reação que acontece é de C₃A (alumina), que hidrata e endurece mais rapidamente, é uma reação altamente exotérmica que libera grande quantidade de calor, contribui para a resistência inicial do cimento e que seria praticamente instantânea se não fosse a ação do sulfato de cálcio, em torno de 5% constituinte da massa do cimento, promovendo o retardamento da pega.

Posteriormente, ocorre a reação entre os cristais de C₃S (alita), que é o principal responsável pela resistência nas idades iniciais. O C₄AF (ferrita) possui pega rápida, mas não é instantânea. Neste sentido, o óxido de ferro age como fundente, fixando a alumina e melhorando a resistência ao ataque de águas sulfatadas. A partir dos 7 dias começam as reações do C₂S (belita) com a água de forma lenta e se processa com mais efetividade após os 28 dias, uma vez que este composto é responsável pela resistência da pasta em idades mais avançadas (SOKOLOVICZ, 2013).

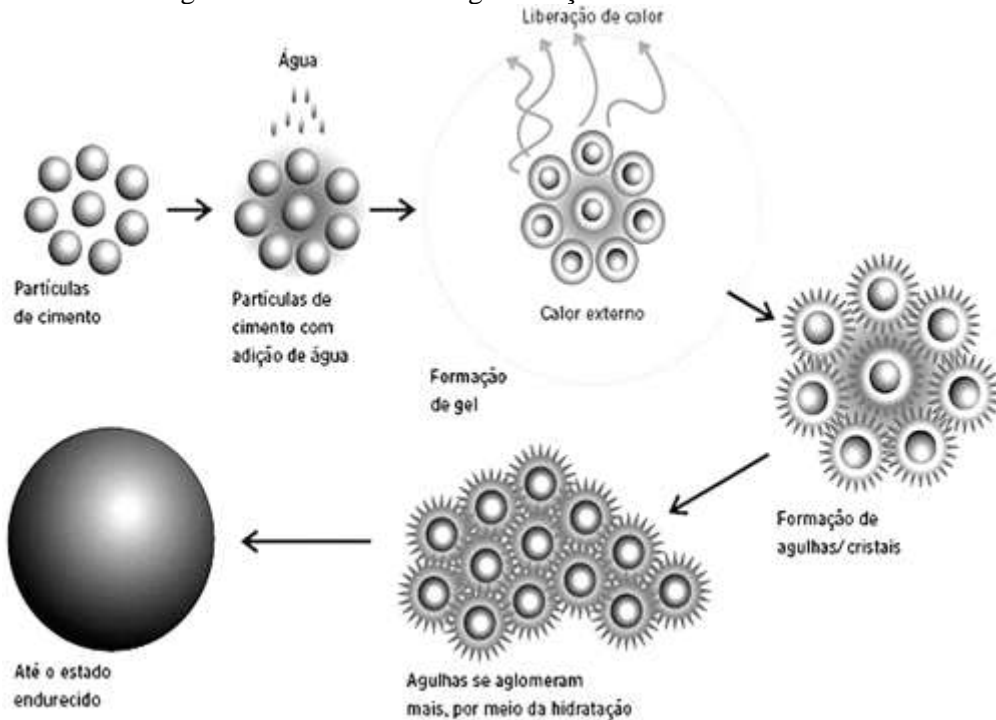
Dentre os compostos hidratados, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) é o principal responsável pela resistência mecânica da pasta cimentícia, e o CH (hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita) é o responsável pela alcalinidade. As fases de alita e belita se combinam para formar C-S-H, gel coloidal amorfo de estequiometria indefinida, que une coesivamente as partículas de cimento à portlandita e precipita (METHA; MONTEIRO, 2014; NAQI; JANG, 2019; SINGH, 2020).

A reação de hidratação começa lentamente a se depositar na periferia externa do núcleo do cimento hidratado, e a estrutura do C-S-H forma uma membrana semipermeável na superfície cimentícia, que à medida que a hidratação prossegue, os produtos de hidratação lentamente começam a se depositar nos grãos de cimento originais, tornando a difusão da água para o núcleo não hidratado cada vez mais difícil, reduzindo a taxa de hidratação. Assim, os produtos da hidratação preenchem gradativamente o espaço originalmente ocupado pela água (NAQI; JANG, 2019; SINGH, 2020).

Está representada na Figura 2.1 o processo de aglomeração do cimento Portland, como processo de hidratação dos silicatos e aluminatos formando o C-S-H, com a formação de cristais de etringita

(trissulfoaluminato de cálcio, $C_6A\bar{S}_3H_{32}$), em forma de agulhas, em suma responsáveis pelo início de pega e pela resistência inicial (LAGUNA; IKEMATSU, 2011).

Figura 2. 1 - Processo de aglomeração do cimento Portland.



Fonte: Mehta e Monteiro, 2014.

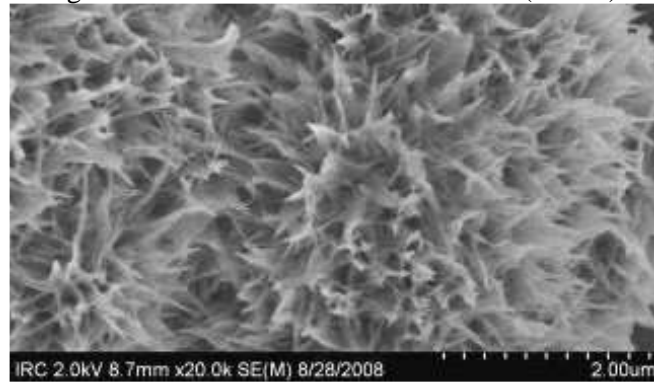
Assim, durante a hidratação do cimento, os principais produtos hidratados formados estão representados na Figura 2.2, Figura 2.3 e Figura 2.4, evidenciando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH, portlandita) e o trissulfoaluminato de cálcio ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$, etringita), respectivamente.

O C-S-H é considerado a fase mais importante da pasta hidratada, compondo 50 a 60% do volume dos sólidos da pasta, sua morfologia (Figura 2.2) apresenta-se com estruturas pequenas e fibrilares pouco cristalinas, e até mesmo redes reticulares (PONTES, 2019). Ainda, pode ser incorporada na fase de C-S-H uma pequena quantidade de alumínio, originando o C-A-S-H (BEAUDOIN; ODLER, 2019, FERREIRA *et al.*, 2019).

O CH, Figura 2.3, conhecido como portlandita, constitui aproximadamente de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta, apresenta-se como grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (PONTES, 2019).

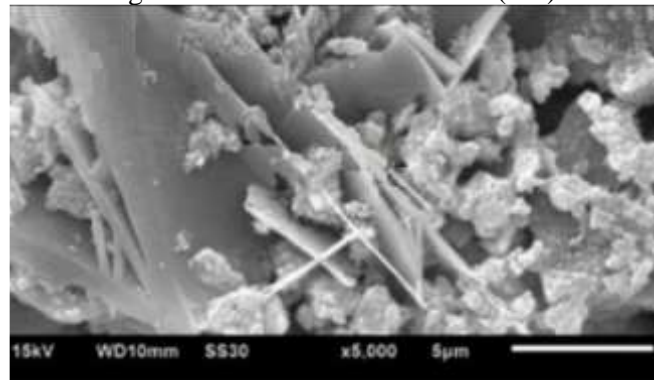
A etringita representa em torno de 15 a 20% do volume de sólidos da pasta, com cristais de morfologia prismática aciculares (agulhas), Figura 2.4. Por ser instável, eventualmente, a etringita (Equação 2.4) transforma-se em monossulfato de cálcio hidratado (placas hexagonais) (PONTES, 2019; ZHANG *et al.*, 2020).

Figura 2. 2 - Silicato de cálcio hidratado (C-S-H).



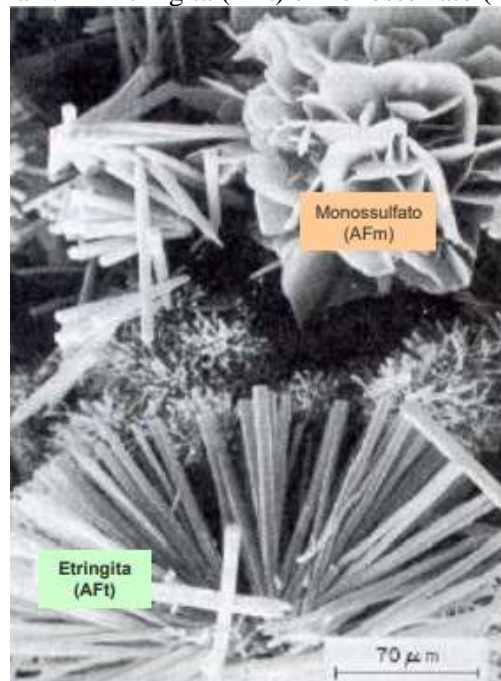
Fonte: Alizadeh, 2020.

Figura 2. 3 - Hidróxido de cálcio (CH).



Fonte: Cascudo *et al.*, 2018.

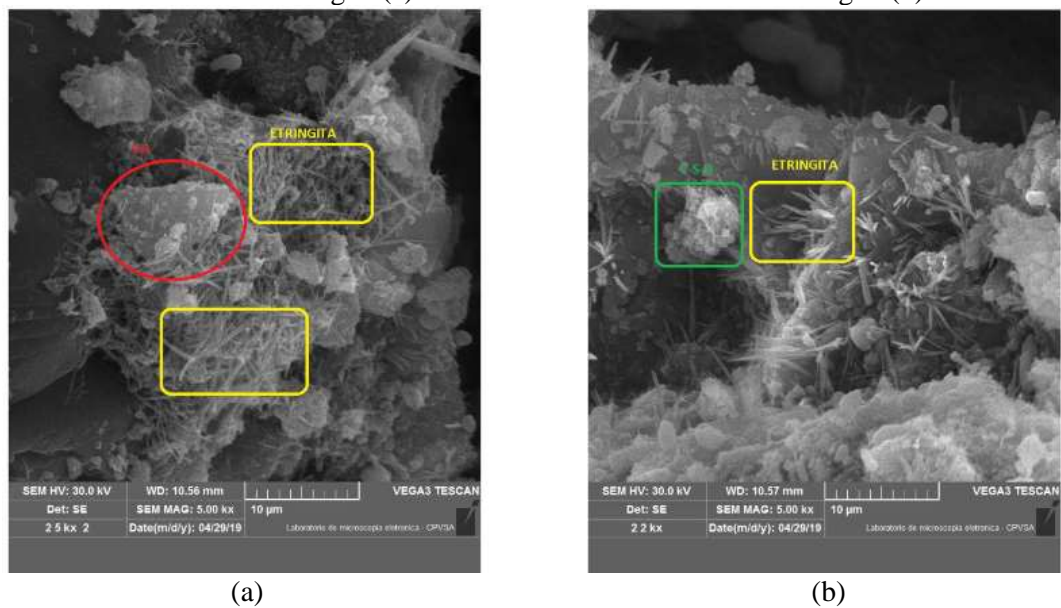
Figura 2. 4 – Etringita (AFt) e Monossulfato (AFm).



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 1994.

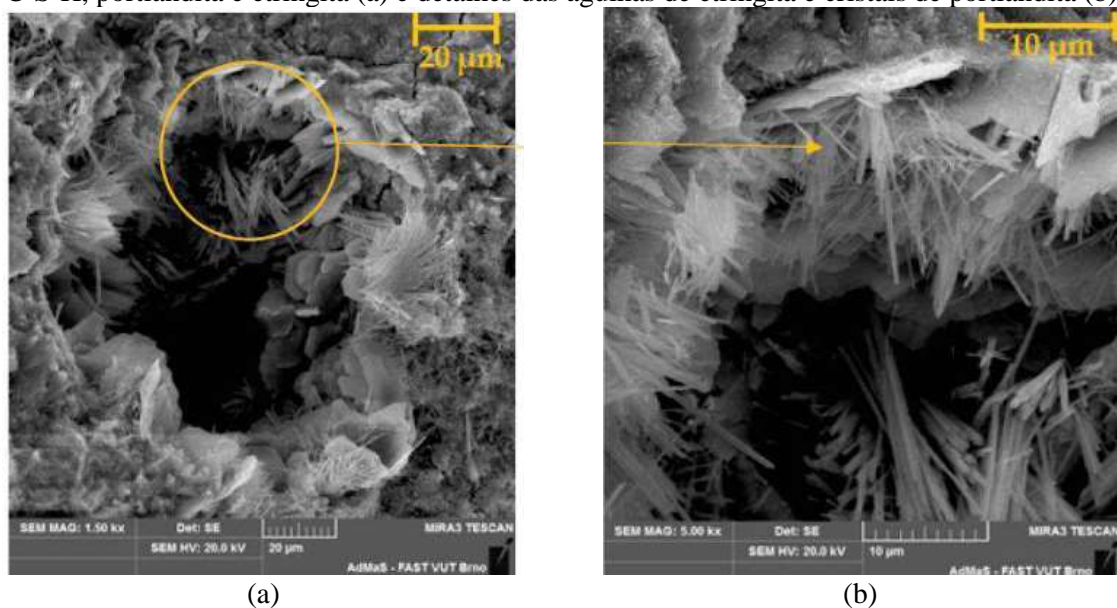
Algumas das principais fases da pasta de cimento hidratada de amostras de concreto submetido ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) na idade de cura de 28 dias, sendo elas, o hidróxido de cálcio (CH), o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a etringita ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$), são evidenciadas na Figura 2.5 (TAVARES, 2019). Também, na Figura 2.6, estão representadas as principais fases da pasta de cimento hidratadas, para amostras de argamassa submetidas ao MEV, para a idade de cura de 540 dias (HODUL; ZIZKOVÁ; BORG, 2020).

Figura 2. 5 - Algumas fases da pasta de cimento hidratada em concreto aos 28 dias de cura: hidróxido de cálcio e etringita (a) e silicato de cálcio hidratado e etringita (b).



Fonte: Tavares, 2019.

Figura 2. 6 - Algumas fases da pasta de cimento hidratada em argamassa aos 540 dias de cura: géis de C-S-H, portlandita e etringita (a) e detalhes das agulhas de etringita e cristais de portlandita (b)



Fonte: Hodul, Zizková e Borg, 2020.

2.2 Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)

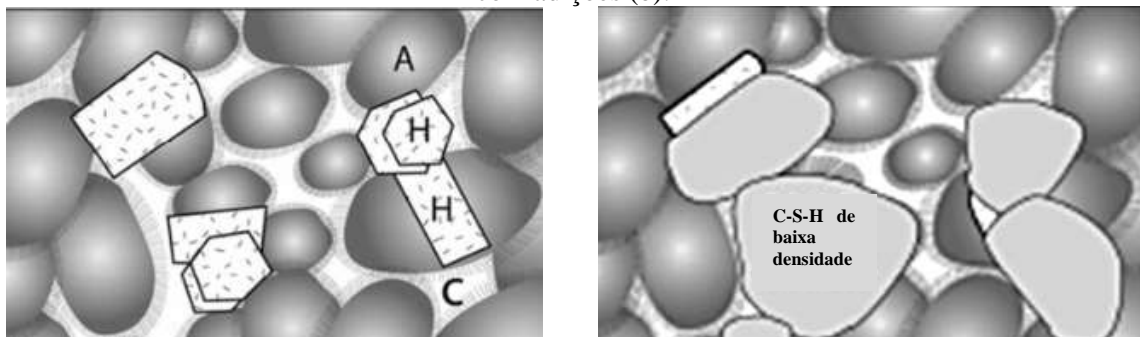
A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS), substituindo parte do clínquer ou do cimento é possível devido ao potencial pozolânico dessas adições minerais, pois possuem elevados teores de SiO_2 , e, muitas vezes, em Al_2O_3 também. Estas adições minerais possuem estruturas amorfas suficientemente reativas em misturas com água e CaO , onde produzem C-S-H a temperaturas normais atuando como cimentos hidráulicos (TAYLOR, 1997; GIVI *et al.*, 2010; SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHEMBACH, 2016).

Assim, a reação pozolânica, ilustrada na Equação 2.1, ocorre devido a presença do CH (portlandita) com a pozolana e água, gerando uma nova fase de C-S-H, menos densa se comparada à primeira formação, descrita no item 2.1, obtida da hidratação do cimento. Essas reações pozolânicas apresentam tanto importância química, com a formação do gel de C-S-H secundário, como importância física, pois este produto preenche os poros maiores, favorecendo assim à durabilidade e à resistência mecânica (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).



Está esquematizada na Figura 2.7 a microestrutura do concreto hidratado sem adições e com adições pozolânicas. Na Figura 2.7a, o C-S-H, pouco cristalino, representado por “A”, “H” representam grandes cristais formados por produtos cristalinos hexagonais e os espaços identificados por “C” representam as cavidades capilares e os vazios formados pelo não preenchimento dos espaços ocupados inicialmente pela água durante a hidratação do cimento. Na Figura 2.7b, são demonstrados os produtos da reação pozolânica, em que os vazios capilares são eliminados ou reduzidos, e os cristais de hidróxido de cálcio substituídos pelo C-S-H adicional de baixa densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2. 7 - Representação esquemática da microestrutura do cimento hidratado: sem adições (a) e com adições (b).



“A”= C-S-H; “H”= Cristais de CH, C-A-H, C-A-S-H; “C”= Vazios

(a)

(b)

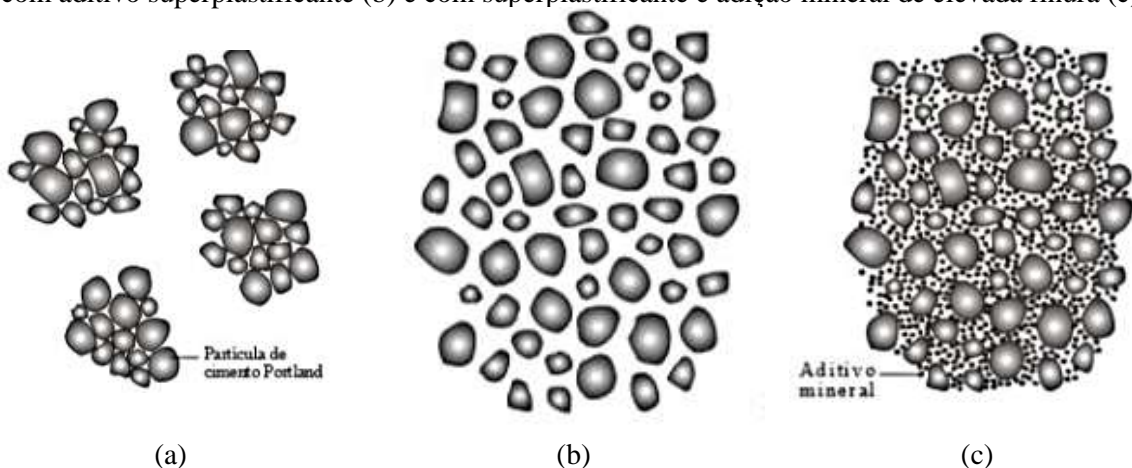
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014.

Logo, existem dois efeitos físicos principais da reação entre as partículas de pozolana e do hidróxido de cálcio, que aumentam a resistência da pasta de cimento. O primeiro processo é o de refinamento do tamanho do poro, em que ocorre a transformação de um sistema contendo vazios capilares grandes em um produto contendo vários vazios pequenos. Isso se deve a formação de produtos hidratados secundários, principalmente silicatos de cálcio hidratados, ao redor das partículas de pozolanas, que tende a preencher os vazios capilares grandes com um material microporoso de baixa densidade. O segundo processo é o refinamento do tamanho do grão, em que ocorre a transformação de um sistema contendo grãos grandes de um componente em um produto contendo grãos menores. Deve-se a nucleação do hidróxido de cálcio ao redor de partículas finas e bem distribuídas de pozolana, substituindo os cristais grandes orientados de hidróxido de cálcio por vários cristais, pequenos e menos orientados, além de produtos de reação pouco cristalinos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Assim, as adições ativas no cimento Portland melhoram o desempenho das pastas cimentícias resultantes, tanto devido ao efeito fíler, em que as partículas atuam como núcleos para a formação de fases hidratadas de cimento Portland, como ao efeito pozolânico, em que os produtos da reação pozolânicas preenchem as lacunas provocadas pelo excesso de água (TAYLOR, 1997).

Teoricamente, as partículas muito finas de cimento Portland poderiam proporcionar o mesmo efeito físico apresentado pelas partículas de uma adição mineral, mas quando em contato com a água dissolvem-se rapidamente, e então o efeito de densificação da pasta cimentícia torna-se ineficiente (CORDEIRO, 2006). Está representada na Figura 2.8a as partículas de cimento Portland em pastas sem adição, com aditivo superplastificante (Figura 2.8b), e com superplastificante e adição mineral de elevada finura, Figura 2.8c.

Figura 2. 8 - Representação esquemática de partículas de cimento Portland em pastas sem adição (a), com aditivo superplastificante (b) e com superplastificante e adição mineral de elevada finura (c).

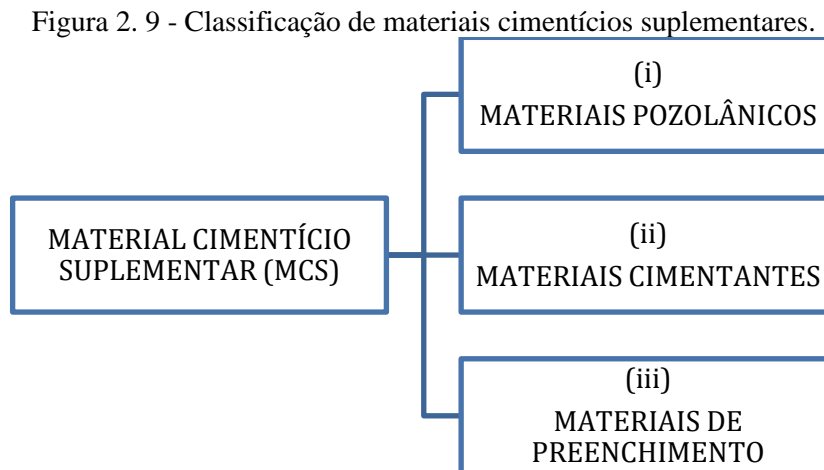


Fonte: Cordeiro, 2006.

Portanto, os MCS são adicionados aos ligantes hidráulicos que quimicamente reagem e formam produtos de hidratação adicionais e podem ser classificados de acordo com a sua ação físico-química, separados em três grandes grupos apresentados na Figura 2.9. A NBR 11172 (ABNT, 1990) define

adições, também conforme a sua ação físico-química, como sendo produtos de origem mineral que podem ser incorporados aos cimentos, argamassas e concretos.

Assim, pelas reações pozolânicas essas adições minerais ditas como MCS, podem ser classificadas em materiais pozolânicos (i), materiais cimentantes (ii) e materiais de preenchimento (fíler) (iii).



Fonte: Adaptado de Dal Molin, 2011.

(i) Materiais pozolânicos: segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente fracionados e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com tais propriedades.

(ii) Materiais cimentantes: não necessitam de hidróxido de cálcio, presente no cimento Portland, pois são materiais que em sua composição apresentam grande quantidade de óxido de cálcio que podem reagir e formar produtos cimentantes, como o C-S-H. No entanto, a hidratação é normalmente lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados não é suficiente para aplicação do material para fins estruturais (DAL MOLIN, 2011; METHA E MONTEIRO, 2014).

(iii) Materiais de preenchimento (fíler): adição mineral finamente fracionada sem atividade química, cuja ação em compósitos resume-se apenas a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Esse efeito é conhecido como efeito fíler e contribui para o aumento da resistência mecânica do concreto e torna-o menos permeável, prolongando sua vida útil, pois ocorre o aumento da densidade da mistura pelo preenchimento dos espaços vazios do concreto por suas dimensões de partículas reduzidas (MENEZES *et al.*, 2009; BORJA, 2011; DAL MOLIN, 2011; NONAT, 2014).

Os materiais pozolânicos podem ser classificados em três classes conforme sua origem, como indicado no Quadro 2.1. Para serem consideradas pozolanas as adições minerais devem atender as exigências físico-químicas definidas no Quadro 2.2, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Quadro 2. 1 - Classificação dos materiais pozolânicos.

CLASSE	Materiais que atendem aos requisitos
N	Pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas.
E	Quaisquer pozolanas, não contempladas nas classes N e C.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

Quadro 2. 2 - Exigências químicas e físicas para materiais pozolânicos.

PROPRIEDADE	CLASSE DO MATERIAL POZOLÂNICO			MÉTODO DE ENSAIO
	N	C	E	
Requisitos químicos				
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 79	*ABNT NBR NM 22
SO ₃	4	5	5	*ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	3	3	3	*ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	10	6	6	*ABNT NBR NM 18
Alcalis disponíveis em Na ₂ O	1,5	1,5	1,5	*ABNT NBR NM 25
Requisitos físicos				
Material retido na peneira 45 μm	< 20%	< 20%	< 20%	**ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751
*Os métodos de ensaio devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico. **Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.				

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

Estabelecer uma classificação para as pozolanas é uma tarefa difícil, posto que, uma mesma classe inclui materiais que são muito diferentes em sua composição química, natureza mineralógica, ou origem geológica. Assim a principal classificação é de acordo com sua origem, e a primeira subdivisão é entre materiais naturais e artificiais. Nesse caso, as pozolanas ditas naturais são obtidas na natureza de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido, mais que 65% de SiO₂, ou de origem sedimentar, com atividade pozolânica, que não necessitam de nenhum tratamento prévio além da moagem. Já as pozolanas artificiais são materiais advindos de processos industriais, como tratamento térmico ou subprodutos industriais, com atividade pozolânica, dessa forma passam por modificações químicas e/ou estruturais de materiais que originalmente não possuem, ou possuem poucas, propriedades pozolânicas (MASSAZZA, 1998).

As adições pozolânicas favorecem aos cimentos maior resistência mecânica, principalmente em idades mais avançadas; um menor calor de hidratação, pois a pozolana, inicialmente inerte, diminui a velocidade inicial de hidratação do cimento, reduzindo a liberação de seu calor de hidratação; uma maior

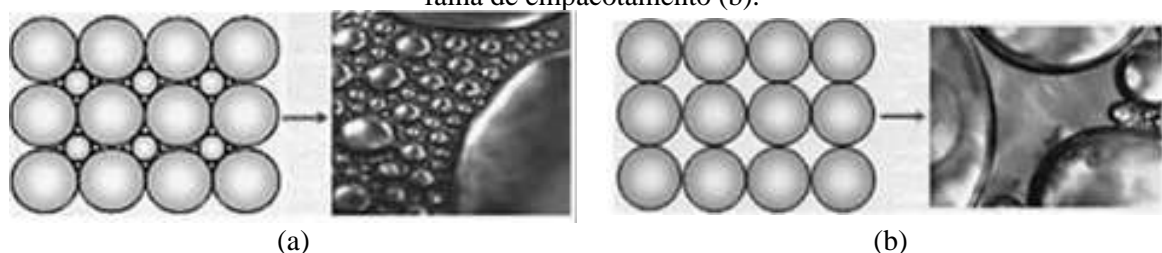
trabalhabilidade, pois os cimentos pozolânicos apresentam uma melhor plasticidade da pasta e argamassa, devido ao melhor arranjo das partículas do aglomerante, propiciando uma melhoria no envolvimento dos grãos do agregado, além de uma menor tendência à segregação; e ainda maior resistência ao ataque por ácidos, fornecendo uma maior durabilidade em ambientes agressivos, pois ocorre a estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e a formação de C-S-H com uma menor relação CaO/SiO_2 e conseqüentemente, menor basicidade (GUEDERT, 1989; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A incorporação de MCS resulta na produção de produtos cimentícios com melhores características técnicas, contudo o desempenho desses nas misturas depende de alguns parâmetros imprescindíveis que influenciam as atividades físico-químicas das reações de hidratação, como finura e tamanho das partículas, área superficial específica, relação água/aglomerante, composição química, mineralógica e proporção em relação ao clínquer de adição (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO; 2014).

Ainda, as reações pozolânicas apresentam algumas peculiaridades, pois ocorrem lentamente com a liberação de calor, apresentando desempenho mecânico com tempo de cura tardio. Diferente ao que ocorre nas pastas cimentícias isentas de adições, que atingem 90 a 96% do ápice da resistência aos 28 dias de cura, as pastas cimentícias com adições, precisam em torno de 91 dias de cura. Além disso, essas reações pozolânicas consomem o CH presente na mistura favorecendo uma melhoria na durabilidade da pasta, pois os produtos obtidos por estas reações são capazes de fechar os poros capilares, aumentando a resistência e melhorando a impermeabilidade da matriz cimentícia (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Figura 2.10 esquematiza a distribuição de partículas e o empacotamento ideal de uma matriz cimentícia. Considerando que neste sistema o principal fator responsável pelo aumento da sua densidade de empacotamento é a distribuição granulométrica adequada, para garantir uma menor porosidade, os vazios entre as partículas devem ser preenchidos por partículas ainda menores e assim sucessivamente (CANOVA; MIOTTO; MORI, 2015; KWAN; NG; HUEN, 2014; LOPES, 2019), Figura 2.10a. Caso as partículas introduzidas sejam maiores que os vazios já existentes, essas causarão o surgimento de novos vazios devido ao deslocamento das partículas maiores de suas posições originais aumentando a porosidade do sistema devido a redução do empacotamento (SANTOS, 2012), Figura 2.10b.

Figura 2. 10 - Distribuição de partículas e empacotamento do sistema: empacotamento adequado (a) e falha de empacotamento (b).



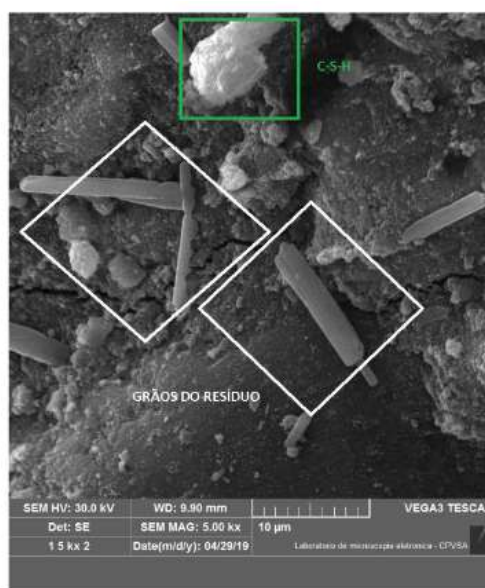
Fonte: Adaptado de PET CIVIL UFJF, 2012.

Logo, considerando os MCS em sua classificação como material de preenchimento (fíler), as partículas inseridas não reagem com os produtos anidros e os compósitos presentes na pasta não apresentam atividade química, resumindo-se apenas a um efeito físico de empacotamento granulométrico e a uma ação como pontos de nucleação proporcionando uma cinética de reação mais rápida das partículas de cimento, aumentando a quantidade de produtos hidratados (MORAES, 2019; TAVARES, 2019).

2.3 Evidências dos MCS em Produtos Cimentícios

É apresentada na Figura 2.11 algumas partículas da cinza da folha de bananeira (CFB), como adição mineral em amostra de concreto aos 28 dias de cura. Observando a morfologia apresentada pela micrografia, é possível identificar algumas partículas de CFB, contribuem para um melhor empacotamento da matriz (TAVARES, 2019).

Figura 2. 11 - Partículas de adição mineral presentes na pasta de cimento hidratada de amostra de concreto aos 28 dias de cura.

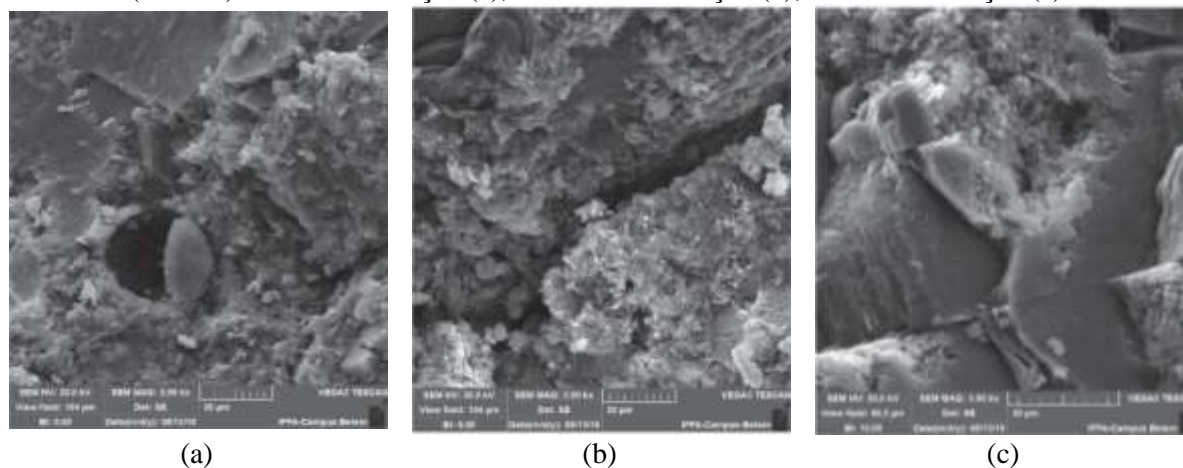


Fonte: Tavares, 2019.

Está apresentada na Figura 2.12 a micrografia obtida por MEV, das amostras de concreto com adições minerais de resíduo de corte de mármore e granito (RCMG), percebe-se uma microestrutura mais densa proporcional ao acréscimo da inserção em 5% de resíduo (Figura 2.12b) e em 10% de resíduo (Figura 2.12c), comparado a referência, 0% de inserção (Figura 2.12a). Gesta, Santos e Souza (2019) constataram através da Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), partículas de RCMG distribuídas em toda a amostra de concreto, sendo mais evidente na zona de transição e nos poros. Além disso, os autores observaram nos ensaios de absorção, que essa adição contribui para uma menor absorção total, mas aumenta a taxa de absorção. Segundo Gonçalves (2000) o incremento da inserção

mineral não impede a interconexão dos poros, o que influencia diretamente na sucção capilar do concreto, pois as partículas finas do resíduo causam um refinamento dos poros formando caminhos preferenciais para a água, justificando o aumento da taxa de absorção.

Figura 2. 12 – Micrografia em amostras de concreto com resíduos de corte de mármore e granito (RCMG): isento de inserção (a), com 5% de inserção (b), e 10% de inserção (c).



Fonte: Gesta, Santos e Souza, 2019.

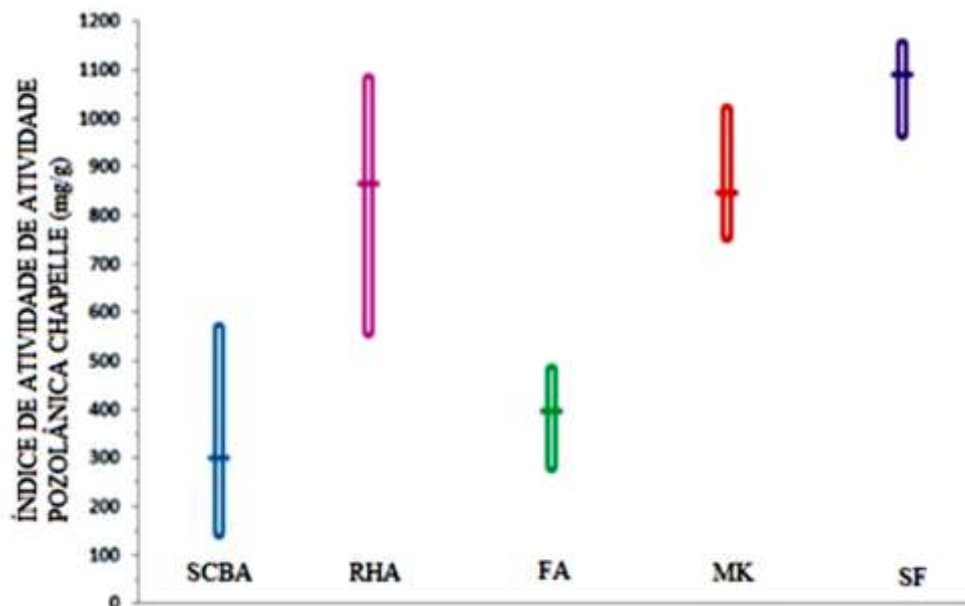
Para avaliar a atividade pozolânica dos MCS classificados em materiais pozolânicos, além dos requisitos apresentados no Quadro 2.2, que englobam os métodos definidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), prescritos pela NBR 5751 (ABNT, 2014) e pela NBR 5752 (ABNT, 2015), determinando, respectivamente, a atividade pozolânica aos sete dias com cal, e o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, é possível mensurar o índice de pozolânicidade do material através de outros métodos não tradicionais, como o método *Chapelle* modificado prescrito pela NBR 15895 (ABNT, 2010a), a condutividade elétrica (LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989; SILVA, 2016) e a análise termogravimétrica associada com a difração de raios-X, (MOODI; RAMEZANIANPOUR; SAFAVIZADEH, 2011; HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

O índice de atividade pozolânica *Chapelle* modificado, NBR 15895 (ABNT, 2010a), corresponde a uma análise química que determina a quantidade de óxido de cálcio consumido pela adição a ser estudada, ou seja, corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado ($I_{Ca(OH)_2}$), expresso em miligramas (mg) de $Ca(OH)_2$ por grama (g). Para a realização deste método, inicialmente é misturado 1 g da adição com 2 g de óxido de cálcio (CaO) preparado no momento do ensaio, misturados com 250 ml de água isenta de CO_2 , em um Erlenmeyer de 500 ml. Esta mistura é mantida no frasco hermeticamente fechado a 90 ± 5 °C em banho-maria com agitador magnético, por 16 ± 1 h. Após resfriar, adiciona uma solução de sacarose (240 g/L), fecha-se o Erlenmeyer e agita-se a solução durante quinze minutos, seguido de uma filtragem e armazenamento de 50 ml, para determinar a alcalinidade com ácido clorídrico (HCl) 0,1 M. O resultado deste ensaio é expresso em miligramas (mg) de $Ca(OH)_2$ por grama (g) de adição. Raverdy *et al.* (1980) estabelece o limite mínimo de 330 mg CaO / g de amostra

(equivalente a 436 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ / g de amostra) para a classificação de uma adição mineral como material pozolânico. Este método determina diretamente o teor de cal fixado por atividade pozolânica, com a interação da adição mineral com o hidróxido de cálcio, proporcionando o máximo potencial reativo da adição (HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Em suma, neste ensaio obtém-se o consumo do hidróxido de cálcio por uma substância potencialmente pozolânica, que atribui ao material em estudo sua possível reatividade com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oriundo da hidratação do cimento, quando empregado em matrizes cimentícias.

Está representada na Figura 2.13 o índice de atividade pozolânica através do método *Chapelle* modificado para diferentes materiais, mensurando o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (QUARCIONI *et al.*, 2015).

Figura 2. 13 - Consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para diferentes materiais.



SBCA= cinza do bagaço de cana de açúcar; RHA = cinza da casca de arroz; FA = cinza volante; MK = metacaulim; SF = sílica ativa.

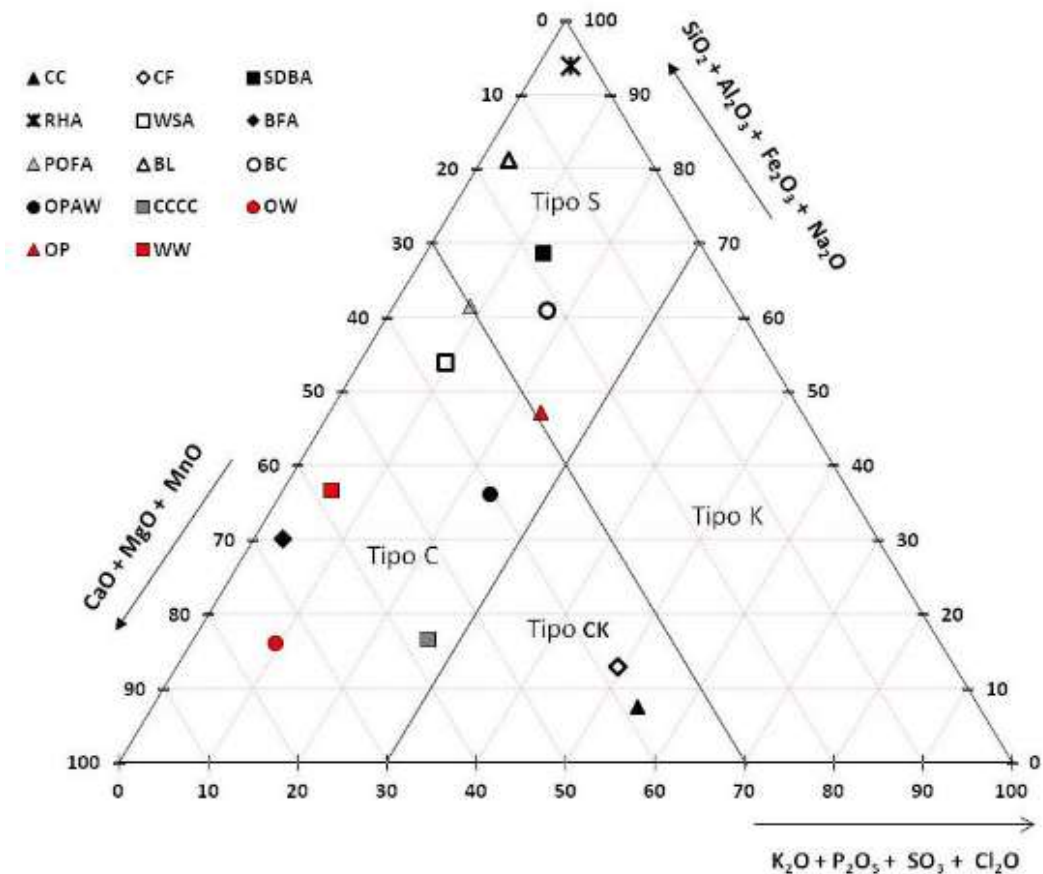
Fonte: Adaptado de Quarcioni *et al.*, 2015.

As propriedades da cinza de biomassa e seu efeito sobre os materiais cimentícios dependem de alguns fatores como o tipo de biomassa utilizada e as características de calcinação (temperatura, tipo de caldeira etc). Vasseliv *et al.* (2010) classificaram as cinzas de biomassa em 4 tipos químicos (S, K, C e CK), definidos pelo teor de $\text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{SO}_3 + \text{Cl}_2$, teor de $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}$ e teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{TiO}_2$.

Silva *et al.* (2015) estudaram a cinza do cacau do ciclone coletada nos filtros dos gases (CC) e a cinza do cacau coletada dentro da fornalha (CF), para serem utilizadas como adição mineral na produção de argamassas. Constataram que essas cinzas apresentaram classificações similares às cinzas oriundas da biomassa agrícola e da biomassa animal, mas são diferentes das demais cinzas de biomassa

utilizadas na construção civil, que são do tipo C ou S (VASSELIV *et al.* (2010). As cinzas estudadas e suas classificações estão indicadas na Figura 2.14.

Figura 2. 14 - Classificação química de cinzas de diversas fontes de biomassa.



CC=cinza de cacau do ciclone; CF= cinza do cacau da fornalha; SDBA= cinza da cama de frango; RHA= cinza da casca de arroz; WSA= cinza da palha de trigo; BFA= cinza da madeira; POFA= cinza do resíduo de óleo de palma; BL= cinza da folha de bambu; BC= cinza do bagaço de cana-de-açúcar; OPAW= cinza do bagaço de azeitona e resíduos agrícolas; CCCC= cinza da casca de castanha de caju; OW= cinza do resíduo de oliva; OP= cinza do bagaço de azeitona; WW= cinza de resíduo da madeira.

Fonte: Adaptado de Silva *et al.*, 2015.

Matos *et al.* (2021) realizaram uma revisão de literatura sobre a reutilização de resíduos de biomassa, no geral notaram grande aplicação destes, com grande potencial de contribuição para pesquisas voltadas para a sustentabilidade na construção civil. Além disso, através de uma análise criteriosa dos artigos, voltada especificamente para as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) aplicadas à produção de argamassas cimentícias, foram contabilizados apenas 34 artigos científicos aderentes ao tema. Nestes estudos, a CBCA foi aplicada em teores que variam entre 7,5 e 40% em substituição parcial a areia, e entre 5 e 20% em substituição parcial ao cimento, melhorando o desempenho reológico, mecânico e a durabilidade, dos produtos aos quais foram aplicadas.

Bonfim (2019) estudou traços de argamassas com inserção de CCA, CBCA e CCE, de forma individual, com taxas graduais de 10, 20 e 30% de substituição ao cimento Portland. Essas porcentagens estão apresentadas na Tabela 2.3, indicando o traço referência, sem adição de cinzas, e os traços com incorporações graduais de 10%, 20% e 30% de substituição, em massa, do cimento Portland pelas cinzas CCA, CBCA e CCE. Com os resultados de caracterização dos ensaios no estado fresco (índice de consistência e densidade de massa), ensaios no estado endurecido (resistência à tração na flexão e compressão simples, módulo de elasticidade dinâmico, retração por secagem, absorção de água por capilaridade e por imersão, índice de vazios e massa específica), aplicou a Metodologia de Superfície de resposta (MSR) e obteve as faixas de otimização para o traço de argamassas de assentamento e revestimento com adição das cinzas CCA, CBCA e CCE. Na sequência, estão apresentados na Tabela 2.4, os possíveis resultados para a substituição do cimento Portland em argamassas de assentamento e revestimento.

Tabela 2. 3 - Proporções, em massa, das argamassas utilizadas por Bonfim (2019).

Argamassa	Cimento	Cinza	Cal	Areia seca	Água
REF	1,00	0,00	0,66	7,67	1,69
CCA - 10%	0,90	0,10	0,66	7,67	1,69
CCA - 20%	0,80	0,20	0,66	7,67	1,72
CCA - 30%	0,70	0,30	0,66	7,67	1,74
CBCA - 10%	0,90	0,10	0,66	7,67	1,69
CBCA - 20%	0,80	0,20	0,66	7,67	1,69
CBCA - 30%	0,70	0,30	0,66	7,67	1,69
CCE - 10%	0,90	0,10	0,66	7,67	1,76
CCE - 20%	0,80	0,20	0,66	7,67	1,94
CCE - 30%	0,70	0,30	0,66	7,67	2,10

Fonte: Bonfim (2019).

Tabela 2. 4 - Faixas para possíveis substituições do cimento por cinzas de biomassa.

CCA	CBCA	CCE
12,5 – 18,8%	3,2 – 9,5%	0 – 9,5%

Fonte: Adaptado de Bonfim (2019).

2.4 Requisitos e Propriedades das Argamassas de Assentamento e Revestimento

As argamassas são materiais amplamente utilizados na construção civil, principalmente ao que tange os revestimentos de alvenarias e estruturas de concreto. Existem diferentes tipos de argamassa, a depender da sua composição e do local empregado. Por exemplo, a argamassa comum é normalmente produzida em obra a partir da mistura pré-definida de cimento, cal, areia e água. Há também a argamassa industrializada, que basicamente é misturada a seco em uma fábrica e ensacada, devendo ser apenas misturada com água na obra. Definindo o objetivo e o local de aplicação para a argamassa, é possível escolher o tipo de argamassa a ser utilizada na obra.

Assim, as argamassas são compósitos feitos a partir da mistura em determinada dosagem, conhecida como traço, de um ou mais aglomerantes (cimento e cal), agregado miúdo (areia) e água,

podendo, a depender da finalidade, conter aditivos. Esse material tem características e propriedades de aderência e endurecimento que o permitem ser utilizado para união de elementos, como blocos de vedação ou estruturais, e para revestimento de paredes, tetos e pisos (ISAIA, 2017). Ainda, da definição da argamassa, quanto a função, pode ser classificada basicamente em dois tipos: argamassa de assentamento e argamassa de revestimento. A argamassa de revestimento é usada para ligar elementos de alvenaria criando uma unidade monolítica estanque dotada de determinada resistência, é também capaz de permitir a distribuição uniforme de cargas que venham atuar na unidade produzida. Já a argamassa de revestimento, tem função de proteção e regularização da estrutura a qual é aplicada, podendo nos casos de revestimento de pisos também desempenhar a função de ligante.

Ainda, as argamassas são definidas pela NBR 13281 (ABNT, 2023) em: argamassas para revestimento de paredes e tetos (i) e argamassas para assentamento e argamassas para fixação da alvenaria (ii).

(i) Argamassa para revestimento de paredes e tetos, subdivididas em:

ARV-I: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações com altura total de 10 m do nível médio da rua da fachada principal;

ARV-II: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de qualquer edificação e externo de edificações com altura total de até 60 m do nível médio da rua da fachada principal;

ARV-III: argamassa inorgânica indicada para o revestimento interno de quaisquer edificação e externo de edificações com altura a 60 m do nível médio da rua da fachada principal; e

AET: argamassa inorgânica de emboço técnico destinada à utilização como primeira camada do revestimento de edificações, fazendo parte de um revestimento ATD multicamadas (substrato para a última camada – camada aparente).

(ii) Argamassas para assentamento (AAV e AAE) e argamassas para fixação horizontal da alvenaria (AAF), subdivididas em:

AAV: Argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural (vedação);

AAE: Argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria estrutural; e

AAF: Argamassas para fixação horizontal de alvenaria (encunhamento).

Além da definição, é necessário informar ou classificar as argamassas conforme os requisitos classificatórios e os requisitos informativos. Para as argamassas de revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a - ensaio de arrancamento) e a variação dimensional (ϵ_i - retração ou expansão linear), são alguns requisitos classificatórios, enquanto a resistência à tração na flexão (R_f) e a absorção de água por capilaridade (W_h) são alguns dos requisitos informativos, NBR 13281-1 (ABNT, 2023). Tratando-se das argamassas para assentamento e argamassas para fixação horizontal, no estado endurecido, a resistência à compressão (f_a), a variação dimensional (ϵ_i) e a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a) são requisitos classificatórios, NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2023) nos requisitos classificatórios a argamassa deve atender aos critérios, enquanto os requisitos informativos o fabricante deve apenas informar a classe de uso a que a argamassa se enquadra considerando as faixas determinadas para cada um dos requisitos e tempo de uso. No estado fresco o tempo de uso para a argamassa inorgânica aplicada em revestimento, é um requisito informativo, e é definido como o tempo máximo decorrido entre a mistura da argamassa e sua aplicação, no qual a argamassa mantém inalteradas as suas propriedades no estado fresco, garantindo o seu desempenho no estado endurecido, considerando os requisitos e critérios estabelecidos. Ainda, a qualquer momento a trabalhabilidade da argamassa pode ser restabelecida sem acréscimo de água, apenas através da remistura, dentro do tempo de uso. Este tempo de uso deve ser informado pelo fabricante na embalagem ou na ficha técnica. No caso de argamassa para revestimento produzidas em canteiro de obras, o responsável legal ou o técnico pela obra deve determinar o tempo de uso da argamassa e manter o seu registro nos controles de obra.

Conforme as classificações e requisitos apontados, o presente trabalho propõe um estudo do tempo de uso (validade), das argamassas modificadas com cinzas de biomassa ao longo do tempo de armazenamento, realizando uma análise do desempenho da argamassa produzida com os materiais constituintes pré-dosados e embalados, similarmente ao empregado para as argamassas industrializadas.

A classificação para as argamassas de revestimento de paredes e tetos (ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET) de acordo com o potencial de aderência à tração ao substrato (R_a) está apresentada no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Classificação das argamassas de acordo com a resistência potencial de aderência à tração ao substrato R_a .

ARGAMASSA	CLASSE	RESISTÊNCIA POTENCIAL DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO AO SUBSTRATO (R_a) MPa	MÉTODO DE ENSAIO
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de pintura e/ou textura*	RA1	$R_a \geq 0,20$	ABNT NBR 15258
ARV-I, ARV-II e ARV-III para produção de revestimento interno destinado à aplicação de peças cerâmicas (ver ABNT NBR 13754)* ou de revestimento externo	RA2	$R_a \geq 0,30$	
AET	RA3	Crítérios estabelecidos na ABNT NBR 16648	
*Para a aplicação de outro tipo de acabamento com características similares, consultar o fabricante da argamassa ou o projetista.			

Fonte: NBR 13281-1 (ABNT, 2023)

No Quadro 2.4 está a classificação dessas argamassas conforme a variação dimensional (ϵ_i). E no Quadro 2.5 está apresentada a classificação conforme a resistência à tração na flexão (R_f). Para a absorção de água por capilaridade (W_h) estão apresentadas no Quadro 2.6 a classificação segundo a

normativa NBR 13281 (ABNT, 2005), que utiliza o método de ensaio NBR 15259 (ABNT, 2005) para a classificação conforme o coeficiente capilaridade (C).

Quadro 2. 4 - Classificação das argamassas conforme a variação dimensional.

Classe	Variação dimensional (ϵ_i) mm/m	Método de ensaio
VD1	$-1,10 > \epsilon_i \geq -1,20$ (retração entre 1,11 e 1,20)	ABNT NBR 15261
VD2	$-0,90 > \epsilon_i \geq -1,10$ (retração entre 0,91 e 1,10)	
VD3	$-0,70 > \epsilon_i \geq -0,90$ (retração entre 0,71 e 0,90)	
VD4	$0,0 \geq \epsilon_i \geq -0,70$ (retração entre 0 e 0,70)	
VD5	$\epsilon_i > 0,00$ (expansão)	

Fonte: Adaptado de NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

Quadro 2. 5 - Classificação das argamassas de revestimento de paredes e tetos de acordo com a resistência à tração na flexão.

Resistência à tração - R_f (MPa)	
R1	$R_f < 0,5$
R2	$0,5 \leq R_f < 1,5$
R3	$1,5 \leq R_f < 3,0$
R4	$R_f > 3,0$

Fonte: NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

Quadro 2. 6 - Classificação das argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade.

Coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	
C1	$\leq 1,5$
C2	1,0 a 2,5
C3	2,0 a 4,0
C4	3,0 a 7,0
C5	5,0 a 12,0
C6	$> 10,0$

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005).

A classificação das argamassas de assentamento (AAV e AAE) de unidades de alvenaria e fixação horizontal (AAF) de alvenaria, devem cumprir aos critérios e requisitos descritos no Quadro 2.7 para a resistência à compressão (f_a), para a variação dimensional (ϵ_i) e para resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a), pois são requisitos classificatórios segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Quadro 2.7 - Requisitos e respectivos critérios para argamassas inorgânicas para assentamento e fixação - Estado endurecido.

REQUISITO	UNIDADE	CRITÉRIOS POR TIPO DE ARGAMASSA			
		AAV	AAE	AAF	Método de ensaio
Resistência à compressão (f_a)	MPa	$2,0 \leq f_a < 5,0$	*	$1,5 \leq f_a < 5,0$	ABNT NBR 13279
Variação dimensional retração livre (ϵ_i)	mm/m	$\epsilon_i \geq -0,80$ (retração menor ou igual a 0,80)			ABNT NBR 15261
Resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a)	MPa	$\geq 0,20$			ABNT NBR 15258
AAV = Argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural (vedação). AAE = Argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria estrutural. AAF = Argamassas para fixação horizontal (encunhamento). *Vide Quadro 2.8.					

Fonte: Adaptado de NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Quadro 2.8 - Classificação das argamassas de acordo com a resistência à compressão.

Resistência à compressão - f_a (MPa)	
AAF	$1,5 \leq f_a < 5,0$
AAV	$2,0 \leq f_a < 5,0$
AAE5	$5,0 \leq f_a < 8,0$
AAE8	$5,0 \leq f_a < 12,0$
AAE12	$12,0 \leq f_a < 16,0$
AAE16	$16,0 \leq f_a < 20,0$
AAE20	$20,0 \leq f_a < 24,0$
AAEE (Especial)	$f_a \geq 24,0$

Fonte: NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

As argamassas devem conferir proteção, estanqueidade, durabilidade ao serem utilizadas na construção civil, além de conferir conforto aos usuários. Em relação a resistência de aderência das

argamassas de revestimento, Vaz e Carasek (2019) realizaram uma revisão sistemática sobre o tema e como principais resultados observaram as performances dos aditivos e adições, em termos de variações médias na resistência de aderência, e também correlacionaram com outras propriedades dos revestimentos.

Vaz e Carasek (2019), observaram também que os estudos em argamassas mistas compostas por cimento CPV-ARI resultaram em maiores valores de aderência (0,60 MPa com a cal CH-I e 0,80 MPa com CH-III), e as formuladas com CPII-F resultaram nos menores valores (0,15 e 0,30 MPa, respectivamente, para cal CH-I e CH-III). Ainda, os autores ressaltaram, através da pesquisa sistemática, que o cimento CPIII embora resultasse em baixos valores de aderência nas idades iniciais, apresentou crescimento contínuo de resistência até 182 dias, chegando próximo aos valores de aderência obtidos nas composições com CPV-ARI (que alcançou seu pico de resistência até os 63 dias). Outro ponto observado pelos autores, foi o quesito finura do cimento, quanto mais fino o cimento, maior a aderência obtida. Também elucidaram quanto à cal, pois o teor de hidróxido de magnésio influencia diretamente a resistência de aderência ao se deprender, pois, as cales consideradas dolomíticas formam grandes cristais de carbonato de cálcio nas argamassas, retendo mais água, melhorando a aderência dos revestimentos. Outro fator importante ressaltado na revisão foram os ensaios de arrancamento realizados em laboratório que, ao utilizar substratos formados por blocos individuais de concreto atingem uma resistência de aderência média maior que utilizando os tijolos cerâmicos como substratos, como exemplo, utilizando os blocos de concreto a resistência à aderência atingiu 0,36 MPa, e para os tijolos cerâmicos, a média foi quase 52% inferior, com resistência de aderência de 0,17 MPa.

A verificação da resistência de aderência é requisito classificatório, tanto para as argamassas de revestimento de paredes e tetos, quanto para as argamassas de assentamento e fixação horizontal (encunhamento), em que, os valores mínimos estão apontados, respectivamente, no Quadro 2.3 e no Quadro 2.7. Nota-se grande desafio por parte das construtoras em atingir os valores mínimos estabelecidos pelas normativas, e uma grande variabilidade dos resultados dos ensaios de aderência. Além disso, essa aderência é influenciada por vários fatores, entre eles as condições climáticas (temperatura, umidade relativa, vento etc.), a argamassa (reologia, adesão inicial, retenção de água etc.), o substrato (sucção de água, rugosidade, porosidade etc.) e a execução (energia de impacto, limpeza e preparo da base, cura etc.), os quais dificultam a rastreabilidade das causas reais para resultados abaixo do esperado. Portanto, torna-se necessário o estudo da influência de cada um desses fatores em separado com o objetivo de mapear os problemas e aumentar o desempenho do conjunto (MALAGONI; SCARTEZINI, 2013; CARASEK, 2010). Estão apresentados na Figura 2.15 alguns fatores que exercem influência na aderência das argamassas sobre bases porosas.

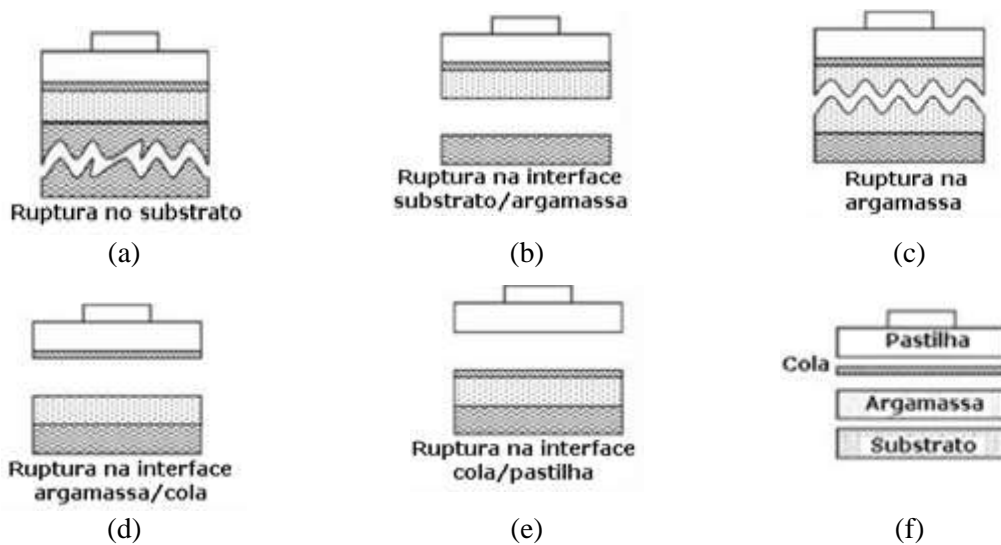
Estão apresentadas na Figura 2.16 as possíveis formas de ruptura que podem ocorrer no ensaio de aderência à tração ao substrato, segundo a NBR 13528-2 (ABNT, 2019).

Figura 2. 15 - Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.



Fonte: Carasek (2010).

Figura 2. 16 - Formas de ruptura no ensaio de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco: Tipo A (a), Tipo B (b), Tipo C (c), Tipo D (d) e Tipo E (e) e esquema do conjunto de camadas (f).



Fonte: Adaptado de NBR 13528-2 (ABNT, 2019).

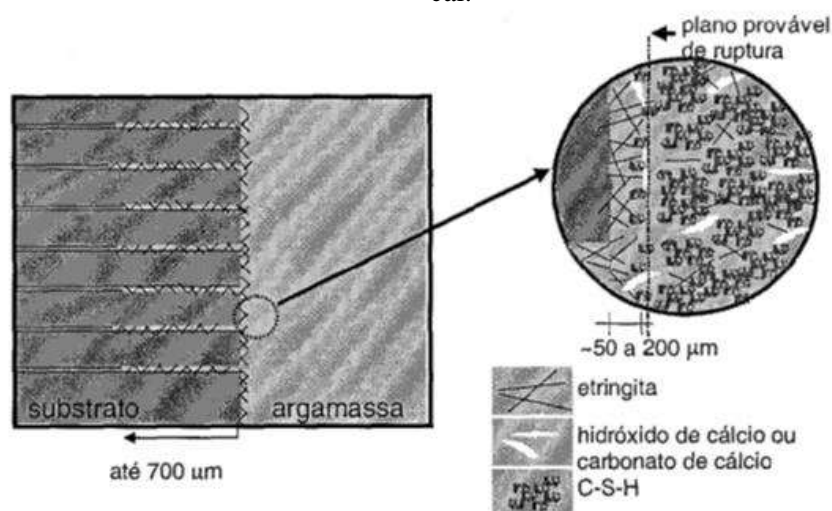
Segundo a NBR 13528-2 (ABNT, 2019) o ensaio de arrancamento deve ser realizado no revestimento com idade de 28 dias de cura, para argamassas mistas ou de cimento e areia, e aos 56 dias de cura para argamassas de cal e areia. O preparo dos cp's para a realização do ensaio em laboratório deve avaliar a capacidade de aderência do revestimento sobre algum substrato, por exemplo, painéis de alvenaria, componentes de alvenaria (blocos e tijolos), placas de concreto, entre outros. Antes da aplicação da argamassa deve ser feita uma limpeza na superfície do substrato para a eliminação de agentes contaminantes, como óleo e poeira, que possam prejudicar a aderência dessa argamassa. Para o lançamento da argamassa, é importante salientar que a maneira de lançamento influencia diretamente na aderência, em que, as argamassas projetadas mecanicamente podem apresentar valores superiores para a resistência de aderência (R_a) comparadas as argamassas aplicadas manualmente, pois a projeção

mecânica proporciona maior superfície de contato e compacidade após a aplicação, reduzindo a porosidade e permeabilidade dos revestimentos. As características dos revestimentos devem ser selecionadas conforme os objetivos a que se propõe o ensaio e, no caso de argamassas industrializadas, devem ser seguidas as indicações do fabricante quanto ao processo de aplicação, espessura e acabamento.

Ainda, segundo a norma, NBR 13528-2 (ABNT, 2019) as formas de ruptura devem ser expressas com indicação da porcentagem de ocorrência, apresentadas junto com o respectivo valor da resistência de aderência. No caso de ruptura da interface argamassa/substrato (Tipo B) o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio. Nas demais rupturas, a resistência de aderência não pode ser determinada por ruptura na camada de argamassa, e é maior do que o valor obtido no ensaio. Nestes casos, o valor obtido no ensaio deve ser apresentado precedido pelo sinal maior que (>). A ruptura na interface cola/pastilha (Tipo E) indica imperfeição na colagem da pastilha, e o resultado deve ser desprezado. Quando ocorrem diferentes formas de ruptura no mesmo corpo de prova, anotar a porcentagem aproximada da área de cada um dos tipos de ruptura.

Carasek (1996) utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura, confirmou que a aderência provém do intertravamento principalmente de etringita, um dos produtos de hidratação do cimento, no interior dos poros do substrato. Observou que esse produto se concentra em grande parte na zona de contato da argamassa com o substrato, que pode ser explicado devido ao processo mais rápido de dissolução dos íons SO_4^{2-} , AlO_4^- , Ca^{2+} e de precipitação da etringita, preenchendo prioritariamente os poros capilares. Logo, com pouco espaço restante para a precipitação, outros produtos da hidratação do cimento, como o C-S-H, ou produtos formados posteriores da carbonatação da cal, como a calcita, aparecem em menor quantidade na região de interface argamassa/substrato. Está apresentada na Figura 2.17 a representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassas de cimento e cal.

Figura 2. 17 - Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassas de cimento e cal.

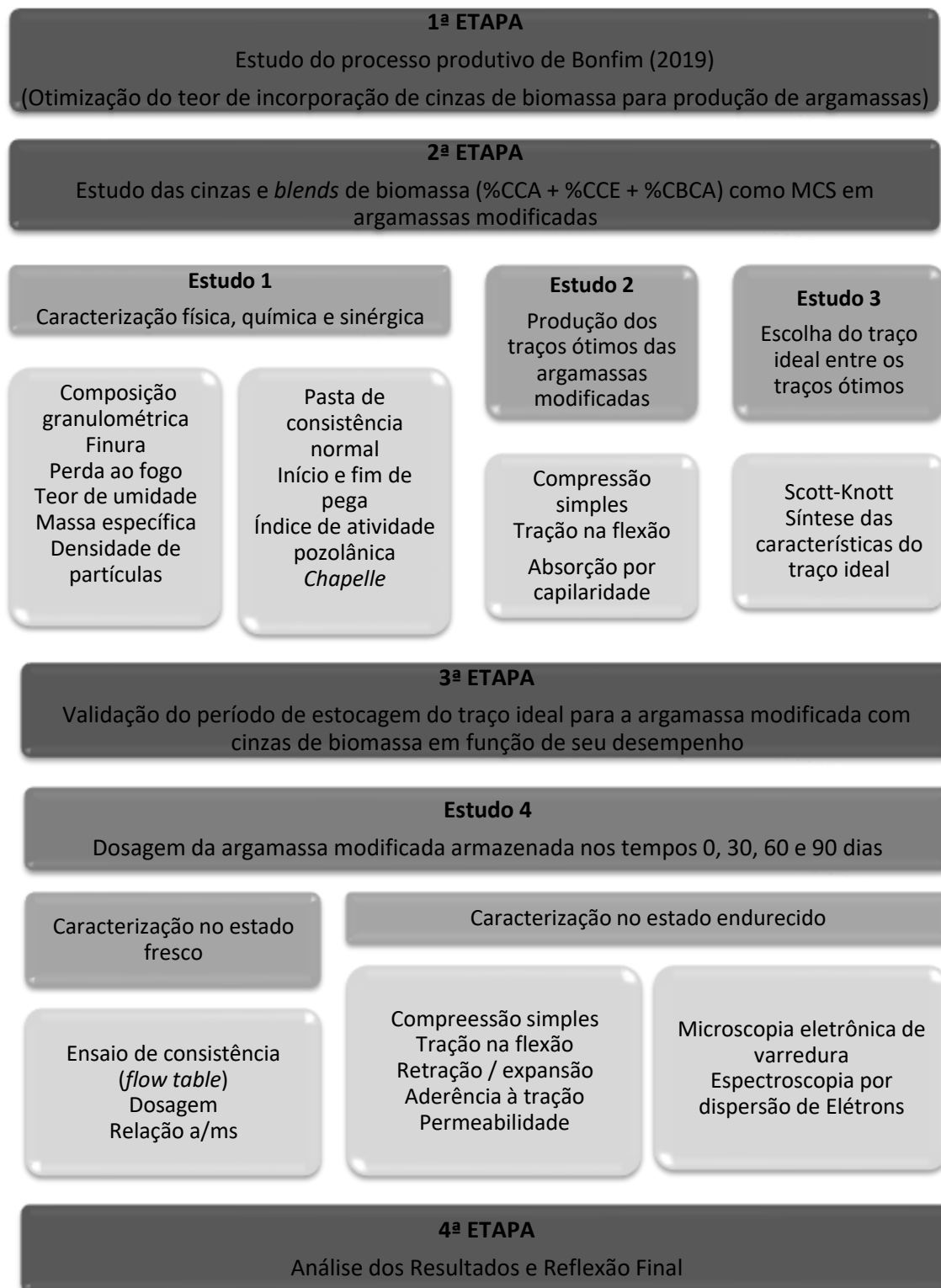


Fonte: Carasek, Cascudo e Scartezini (2001).

3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos desta pesquisa podem ser divididos em quatro etapas como apresentados na Figura 3.1.

Figura 3. 1 - Delineamento geral da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Estudo 1 – Caracterização das Cinzas e *Blends* de Biomassa

As cinzas de biomassa utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em diferentes regiões industriais dos estados de Minas Gerais e Goiás, Brasil. A cinza da casca de arroz (CCA) foi coletada diretamente no pátio de uma indústria de produtos alimentícios, localizada na cidade de Araguari – MG, cujos principais produtos beneficiados são: arroz, feijão e café. Após o beneficiamento do arroz, a sua casca é utilizada como material combustível para geração de calor durante o processo de torra do café.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), foi adquirida em uma usina (destilaria) de etanol localizada na região de João Pinheiro – MG. Segundo a empresa, a cana-de-açúcar é processada para que seja feita a produção de etanol, e a cinza é formada durante o processo de geração de energia através da queima do bagaço e da palha obtidos durante o processamento da cana-de-açúcar.

E, a cinza do cavaco de eucalipto (CCE) foi fornecida por uma indústria de mineração, situada em Catalão – GO, que atua no beneficiamento de nióbio e fosfatos utilizados em fertilizantes para agricultura. O cavaco de eucalipto é utilizado pela empresa na geração de calor através de fornalhas que atingem temperaturas entre 1000 e 1100°C com o intuito de secar a rocha fosfática.

Visando uma caracterização preliminar, as amostras de CCA, CBCA e CCE foram submetidas a análises granulométricas, adaptando a metodologia prescrita pela NBR 17054 (ABNT, 2022a) que originalmente é aplicada em agregados para argamassas e concretos de cimento Portland, utilizando as peneiras com malhas 12,5mm; 9,5mm; 6,3mm; 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm; fundo e tampa.

Após a coleta das cinzas de biomassa *in loco*, as mesmas foram transferidas para o laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia (FENG) da (UFCat), para caracterização e uniformização. Os equipamentos utilizados na uniformização das cinzas de biomassa estão apresentados na Figura 3.2.

Figura 3. 2 – Equipamentos utilizados na uniformização das cinzas de biomassa: secagem em estufa (a), peneiramento com peneira #4 (b) e homogeneização no liquidificador industrial (c).



(a)



(b)



(c)

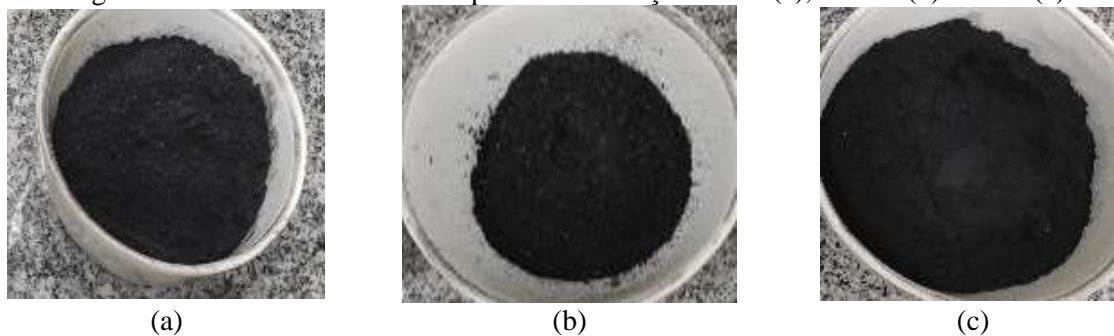
Fonte: Autoria própria.

Com a finalidade de homogeneizar as cinzas de biomassa, reduzindo e simplificando os processos com tratamentos preliminares, individualmente as amostras de CCA, CBCA e CCE foram secas em estufa à uma temperatura de 50°C até apresentarem massa constante, Figura 3.2a. Em seguida

passaram por peneiramento com a peneira #4 (abertura 4,75 mm), Figura 3.2b. Por fim, foram processadas em um liquidificador industrial por 15 minutos em uma rotação de 30 rpm, Figura 3.2c.

As cinzas de biomassa após a homogeneização estão apresentadas na Figura 3.3, sendo a CCA na Figura 3.3a, CBCA na Figura 3.3b e CCE na Figura 3.3c.

Figura 3. 3 - Cinzas de biomassa após uniformização: CCA (a), CBCA (b) e CCE (c).



Fonte: Autoria própria.

Após a uniformização, foi possível obter os *blends* das cinzas de biomassa formados pelas combinações entre a CCA, CBCA e CCE (%CCA + %CCE + %CBCA), seguindo os teores apresentados na Tabela 3.1, baseados no estudo de Bonfim (2019), o qual estabeleceu através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), as faixas de otimização do traço de argamassas de assentamento e revestimento com adição de CCA, CBCA e CCE, considerando os melhores resultados no desempenho mecânico das argamassas para as maiores parcelas de substituição do cimento Portland pelas biomassas. Estes *blends* de cinzas de biomassa foram intitulados de Cmín, Cméd e Cmáx, fazendo alusão aos teores totais de cinzas, sendo, Cmín a menor porcentagem, Cméd a porcentagem média, e Cmáx a porcentagem máxima de substituição ao cimento Portland.

Tabela 3. 1 - *Blends* de cinzas de biomassa

<i>BLENDS</i>	%CCA	%CBCA	%CCE	(%CCA + %CBCA + %CCE)
Cmín	12,50	3,20	0,00	15,70
Cméd	15,65	6,35	4,75	26,75
Cmáx	18,80	9,50	9,50	37,80

Fonte: Baseado em Bonfim (2019).

Além disso, para fins comparativos, o cimento Portland adotado nesta pesquisa foi o de alta resistência inicial CPV-ARI que, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), possui elevado teor de clínquer em sua fabricação, entre 90 a 100%. Assim, é o cimento disponível no mercado, com menores adições em sua composição, sendo empregado em estudos voltados para a real influência das adições minerais em concretos e argamassas, como os realizados por Cabral, Barbosa e Pinto (2022), Gonçalves, Soares e Paula (2021), Castro *et al.* (2020) e Degen *et al.* (2019).

Estão apresentadas no Quadro 3.1 as características fornecidas pelo fabricante do cimento Portland CPV-ARI utilizado nesta pesquisa, material este, que também será empregado na produção dos traços ótimos das argamassas no Estudo 2.

Quadro 3. 1 - Características do cimento Portland CPV-ARI utilizado.

PROPRIEDADE	RESULTADO	LIMITE (NBR 16697:2018)
Finura Blaine (cm ² /g)	4248,00	-
Resíduo na peneira #200 - 75 µm (%)	0,30	≤ 6,0
Resíduo na peneira #325 - 45 µm (%)	3,83	-
Tempo de início de pega (min)	107	≥ 60
Tempo de fim de pega (min)	150	≤ 600,0
Resistência à compressão (1 dias MPa)	23,0	≥ 14,00
Resistência à compressão (3 dias MPa)	34,8	≥ 24,00
Resistência à compressão (7 dias MPa)	40,9	≥ 34,00
Resistência à compressão (28 dias MPa)	49,4	-
Teor de MgO (%)	1,3	≤ 6,5
Teor de SO ₃ (%)	3,4	≤ 4,5
Perda ao fogo (%)	3,9	≤ 6,5
Resíduo insolúvel (%)	-	-

Fonte: Intercement Cezarina (2022).

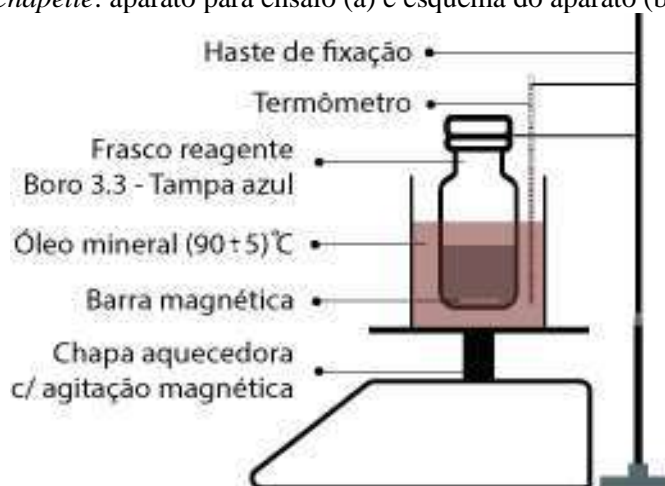
O Estudo 1 teve como principal objetivo realizar a caracterização preliminar das cinzas de biomassa e suas combinações (*blends*), de tal forma a fornecer dados comparativos entre a pasta de cimento isenta de adições e as pastas modificadas com seus respectivos *blends* substituindo o CPV-ARI em suas proporções em massa. Além disso, verificar se a homogeneização, atende as propriedades potenciais para uso das cinzas como material cimentício suplementar em argamassas (MCS). Nesse sentido, no Quadro 3.2 estão apresentadas as metodologias e as propriedades determinadas neste Estudo 1.

O aparato e configuração utilizada no ensaio para obtenção dos índices de pozzolanicidade por meio do método *Chapelle* Modificado estão apresentados na Figura 3.4 .

Figura 3. 4 - Ensaio de pozzolanicidade *Chapelle*: aparato para ensaio (a) e esquema do aparato (b).



(a)



(b)

Fonte: Baseado em Bonfim e Paula (2021).

Quadro 3. 2 - Ensaio de caracterização do Estudo 1.

DESCRIÇÃO	METODOLOGIA	MATERIAIS
Composição granulométrica	Adaptação do método previsto na NBR 17054 (ABNT, 2022) que originalmente é utilizada apenas para agregados.	CCA, CBCA e CCE
Finura	Adaptação do método previsto na NBR 15894-3 (ABNT, 2010) que originalmente é utilizada apenas para metacaulim.	CCA, CBCA, CCE, Cmín, Cméd e Cmáx
Perda ao fogo	Método nº1 NBR NM 18 (ABNT, 2012)	CCA, CBCA, CCE, Cmín, Cméd e Cmáx
Teor de umidade	NBR 17051 (ABNT, 2022)	CCA, CBCA, CCE, Cmín, Cméd e Cmáx
Massa específica	NBR16605 (ABNT, 2017)	CPV-ARI, Cmín, Cméd e Cmáx
Densidade de partículas	Método do balão volumétrico (EMBRAPA, 2017).	CP V-ARI, CCA, CBCA, CCE, Cmín, Cméd e Cmáx
Pasta de consistência normal	Adaptação do método previsto na NBR 16606 (ABNT, 2018) que originalmente é utilizada apenas para cimento Portland.	CP V-ARI, Cmín, Cméd e Cmáx
Início e fim de pega	Adaptação do método previsto na NBR 16607 (ABNT, 2018) que originalmente é utilizada apenas para cimento Portland.	CP V-ARI, Cmín, Cméd e Cmáx
Índice de atividade pozolânica <i>Chapelle</i>	NBR 15895 (ABNT, 2010)	CCA, CBCA, CCE, Cmín, Cméd e Cmáx

Fonte: Autoria própria.

3.2 Estudo 2 – Desempenho Físico e Mecânico dos Traços Ótimos

Esta etapa teve como objetivo realizar a produção e analisar o desempenho dos traços ótimos das argamassas com incorporações de cinzas de biomassa obtidos por Bonfim (2019), fornecendo assim dados que serão utilizados na escolha do traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa proposto posteriormente.

A argamassa referência foi do tipo mista, composta por cimento Portland, cal hidratada, agregado miúdo natural e água tratada, com traço em volume dado por 1:1:6 (cimento:cal:areia). Tal traço é tradicionalmente empregado em obras correntes, apresentando bom desempenho para a produção de argamassas de revestimento (CAMPOS, 2014; CARASEK, 2017).

Para as argamassas modificadas com *blends* de cinzas biomassa, seguiram as porcentagens definidas no Estudo 1, com as porcentagens ótimas de substituição, Cmín, Cméd e Cmáx. Assim, a partir do traço referência (Tref), sem a inserção de cinzas de biomassa, foram definidos os demais traços do Estudo 2, como sendo Tmín, Tméd e Tmáx, totalizando, respectivamente, 15,70%, 26,75% e 37,80% a substituição em massa do cimento Portland.

Os traços em massa dos materiais utilizados para a produção das argamassas estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Traços em massa (kg) para a produção das argamassas.

Traço	Cimento	Blends	Cal	Areia seca	Água	a/c	a/ms
Tref	1,000	0,000	0,66	7,67	1,690	1,69	0,18
Tmín	0,843	0,157	0,66	7,67	1,690	2,00	0,18
Tméd	0,732	0,268	0,66	7,67	1,707	2,33	0,18
Tmáx	0,622	0,378	0,66	7,67	1,716	2,76	0,18

Fonte: Autoria própria.

Nesta etapa da pesquisa, para a determinação da quantidade de água utilizada em cada um dos traços em estudo, Tabela 3.2, foi realizada uma interpolação para os valores pré-estabelecidos por Bonfim (2019). E o índice de consistência, utilizando a mesa de consistência (*flow table*), será determinado após a escolha do traço ideal, no Estudo 4, realizando a dosagem padrão.

O cimento escolhido foi o mesmo apresentado no Estudo 1, o CPV-ARI, suas características estão apresentadas no Quadro 3.1 do Estudo 1.

A cal adotada foi a hidratada com carbonatos, classificada como CH-III, conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003). As características químicas e físicas fornecidas pelo fabricante estão apresentadas no Quadro 3.3.

Quadro 3. 3 - Características da cal hidratada CH-III utilizada.

PROPRIIDADE		RESULTADO	LIMITE (NBR 7175: 2003)
Finura (% retida acumulada)	Peneira 600 μm	0,0%	$\leq 0,5\%$
	Peneira 75 μm	10,47%	$\leq 15\%$
Retenção de água		80	≥ 70
Anidro Carbônico (CO ₂)		12,10%	$\leq 13\%$
Óxidos de Ca e Mg não hidratados		11,82%	$\leq 15\%$
Óxidos totais na base de não voláteis		90,65%	$\geq 90\%$

Fonte: Votorantim Cimentos (2022).

O agregado miúdo utilizado na preparação das argamassas foi a areia natural (AR) seca com denominação comercial “média”. Cabe destacar que, todos os materiais foram selecionados por serem adequados para a produção de argamassas e tradicionalmente utilizados na região, facilitando a sua obtenção. Para a produção das dosagens ótimas, foram definidos os ensaios no estado endurecido para as argamassas em estudo apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3. 4 - Metodologia para a produção dos traços ótimos das argamassas do Estudo 2.

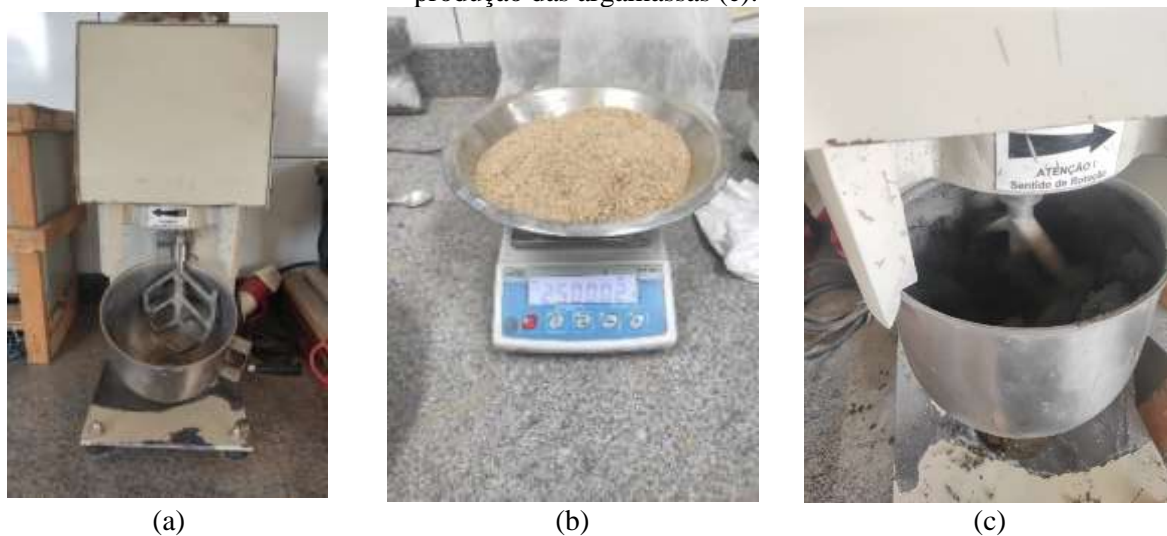
DESCRIÇÃO	METODOLOGIA	MATERIAIS
Preparo da mistura para realização de ensaios	NBR 16541 (ABNT, 2016)	Tref, Tmín, Tméd e Tmáx
Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005a)	
Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)	

Fonte: Autoria própria.

Algumas etapas da produção das argamassas ótimas estão apresentadas na Figura 3.5. As argamassas foram produzidas em um recipiente padrão para todas as misturas, utilizando a argamassadeira, Figura 3.5a, o equipamento foi utilizado tanto na mistura do material seco quanto na mistura da própria argamassa, seguindo as etapas descritas na NBR 16541 (ABNT, 2016).

Os materiais secos utilizados nas argamassas foram pesados e reservados, Figura 3.5b. Cada cuba da argamassadeira comportou 2,5 kg de areia acrescentando seus respectivos materiais, Figura 3.5c, de acordo com os traços, em massa, indicados na Tabela 3.2.

Figura 3. 5 - Produção das dosagens ótimas: argamassadeira (a), pesagem materiais secos (b) e produção das argamassas (c).



Fonte: Autoria própria.

Objetivando entender o desenvolvimento da resistência mecânica da argamassa ao longo do tempo de cura, foram moldados três corpos de prova (cp's) em formato de prisma com dimensões 4x4x16 cm para cada traço (T_{ref} , $T_{mín}$, $T_{méd}$, $T_{máx}$) e definidas quatro idades para estudo de suas propriedades mecânicas, sendo elas: 7, 14, 28 e 56 dias, totalizando 48 cp's. As idades determinadas para a análise da resistência mecânica vão ao encontro das características peculiares das reações pozolânicas, que apresentam resultados consideráveis em idades mais avançadas de cura devido as reações com o cimento serem lentas, segundo Ataie e Riding (2016).

Após a moldagem, os cp's foram envoltos com plástico e submetidos a cura em ambiente laboratorial, sem submersão em água com o intuito de realizar a cura seca. O processo de cura seca dos cp's está apresentado na Figura 3.6. Após 24 horas os mesmos foram desmoldados e envoltos novamente com plástico até o momento da realização dos ensaios de compressão simples, tração na flexão e absorção de água por capilaridade.

O aparato para o ensaio de compressão simples e tração na flexão está apresentado na Figura 3.7. Utilizou-se a prensa universal do laboratório de Estruturas da FENG, modelo WDW-300E com capacidade de carga de até 300 kN, Figura 3.7a. Foram utilizados os apoios necessários para executar os ensaios e o equipamento foi programado com os parâmetros previstos na NBR 13279 (ABNT, 2005a).

Para tanto, para a determinação da resistência à tração na flexão, foi aplicada uma carga com velocidade constante de 50 ± 10 N/s até a sua ruptura. Para a determinação da resistência à compressão simples, foi aplicada uma carga constante de 500 ± 50 N/s até a sua ruptura, registrando a força máxima.

Figura 3. 6 - Cura seca dos cp's de argamassa.



Fonte: Autoria própria.

Conforme prescrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005a), as partes resultantes dos cp's utilizados para ensaio de tração na flexão, Figura 3.7b, foram aproveitados para o ensaio de compressão simples, Figura 3.7c, totalizando 6 amostras para cada traço e idade, ou seja, 96 cp's.

Tanto o ensaio de tração na flexão, quanto o de compressão simples foram feitos conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005a). Para o ensaio de tração os cp's foram dispostos no equipamento com a face rasada voltada para fora dos pontos de apoio e aplicação da carga, evitando o contato com a face mais irregular.

Figura 3. 7 – Ensaio de tração na flexão e compressão simples: prensa universal (a), tração na flexão (b) e compressão simples (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria.

As configurações dos apoios montados para os ensaios também estão apresentadas nas Figuras 3.7b e 3.7c, respectivamente para a realização do ensaio de tração na flexão e para o ensaio de compressão simples. E para a obtenção da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão simples foram utilizadas a Equação 3.1 e Equação 3.2, prescritas pela NBR 13279 (ABNT, 2005a).

$$R_t = \frac{1,5.F_t.L}{40^3} \quad (3.1)$$

Onde:

R_t : resistência à tração na flexão, em MPa;

F_t : carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L : distância entre os suportes, em milímetros;

40^3 : altura x largura², (40 x 40²), em milímetros.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.2)$$

Onde:

R_c : resistência à compressão simples, em MPa;

F_c : carga máxima aplicada, em N;

1600: área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40x40mm, em mm².

O ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias conforme prescrito pela NBR 15259 (ABNT, 2005), está representado na Figura 3.8. Segundo Farinha *et al.* (2018), este ensaio tenta simular a absorção capilar de revestimentos quando colocados em contato com a água externa. Por ser um ensaio não destrutivo, foram utilizados os próprios cp's moldados para serem utilizados no ensaio de compressão simples e tração na flexão aos 56 dias, utilizando 3 cp's para cada traço, totalizado 12 cp's neste ensaio, Figura 3.8a.

Inicialmente, determinou-se a massa de cada corpo de prova (cp) ainda seco e, posteriormente as amostras foram posicionadas sobre peneiras metálicas permitindo o máximo contato superficial da base do prisma com a lâmina d'água constante em imersão parcial de 5 ± 1 mm, dentro de um reservatório de 250 L, Figura 3.8b.

A partir da colocação dos cp's em contato com a água, a massa dos mesmos foi determinada aos 10 min e aos 90 min. A absorção de água foi determinada para cada tempo utilizando a Equação 3.3 para o cálculo. E o coeficiente de capilaridade foi determinado através do cálculo utilizando a Equação 3.4.

$$A_t = \frac{(m_t - m_0)}{16} \quad (3.3)$$

Onde:

A_t : absorção de água por capilaridade, para cada tempo, em g/cm²;

m_t : massa do corpo de prova em cada tempo, em g;

m_0 : massa inicial do corpo de prova, em g;

16: é a área do corpo de prova, em cm².

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (3.4)$$

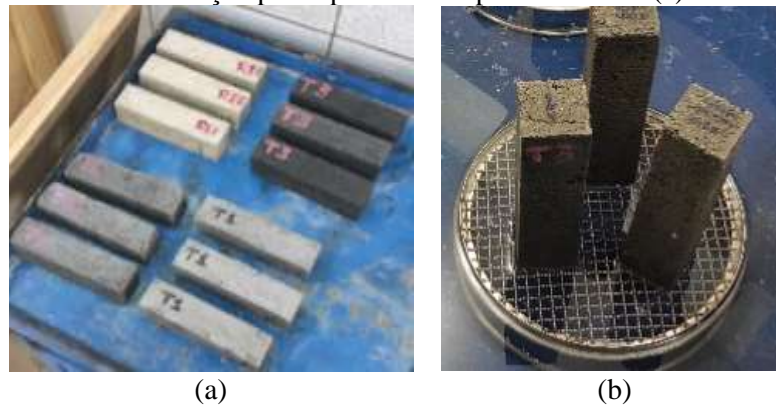
Onde:

C : coeficiente de capilaridade, em g/dm². min^{1/2} ;

m_{90} : massa do corpo de prova no tempo de 90 min, em g;

m_{10} : massa do corpo de prova no tempo de 10 min, em g.

Figura 3. 8 - Ensaio de absorção por capilaridade: cp's aos 28 dias (a) e lâmina d'água (b).



Fonte: Autoria própria.

3.3 Estudo 3 – Escolha do Traço Ideal para a Argamassa Modificada

Os resultados dos ensaios de tração na flexão e compressão simples do Estudo 2, foram avaliados por meio da análise múltipla de médias utilizando o método Scott-Knott (SK) objetivando separar os traços produzidos em grupos com comportamentos estatisticamente semelhantes. Quando a Análise de Variância (ANOVA) indica que os níveis médios de uma fonte de variação se diferem, é necessário identificar quais níveis de fator ou a combinação dos níveis de fatores são especificamente diferentes (PEREIRA *et al.*, 2013). O método de separação de médias SK possui vantagem sobre outros testes, pois separa as médias em grupos discretos, sem que ocorra sobreposição entre os grupos (SCOTT; KNOTT, 1974). Como reiterado por Pinheiro (2017), o método de SK é eficiente na comparação de

diferentes tratamentos em experimentos. Assim, para a análise das médias dos resultados, foi adotado o teste SK com um nível de significância de cinco por cento ($p < 0,05$), utilizando o *software* R.

Além disso, o presente Estudo 3 tem como objetivo identificar a influência sinérgica entre as cinzas de biomassa no comportamento das argamassas modificadas com seus respectivos traços ótimos, elegendo o traço ideal, apresentando uma síntese com as principais características determinadas. O traço eleito como ideal será utilizado no Estudo 4, e os seus constituintes serão misturados à seco, embalados em sacos plásticos, em seguida, ocorrerá as análises de desempenho nos tempos de armazenamento (t_i) pré-definidos.

3.4 Estudo 4 – Desempenho da Argamassa Modificada por Tempo de Estocagem

Após a verificação dos traços otimizados por Bonfim (2019) e escolhido o traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa, iniciou-se o Estudo 4 da presente pesquisa, que tem como principal objetivo verificar o desempenho deste traço ideal com os seus constituintes pré-dosados no decorrer do tempo de armazenamento, com as análises das características da argamassa modificada, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, após diferentes períodos de estocagem.

Dessa forma, foram produzidos, tal como definido na NBR 16541 (ABNT, 2016a), 4 lotes de argamassa modificada com cinzas de biomassa definidos pelo traço $T_{méd}$, o qual foi eleito no Estudo 3 como sendo o traço ideal. A estocagem do material foi realizada conforme parâmetros recomendados pela NBR 14081 (ABNT, 2012a), longe de umidade e luz, aproximando ao máximo do padrão de armazenamento das argamassas industrializadas. O acondicionamento foi realizado em sacos plásticos.

A pré-dosagem e o acondicionamento em sacos plásticos para o traço ideal da argamassa modificada com cinzas de biomassa para posterior estocagem, está representada na Figura 3.9.

Figura 3. 9 - Traço ideal da argamassa modificada com cinzas de biomassa: pré-dosagem (a) e acondicionamento em sacos plásticos (b).



Fonte: Autoria própria.

Os tempos de estocagem $t(i)$ foram definidos como $t_0 = 0$ dia, $t_{30} = 30$ dias, $t_{60} = 60$ dias e $t_{90} = 90$ dias. Para cada um desses períodos de armazenamento dos materiais secos pré-dosados, foram

ensaiados também 4 lotes da argamassa referência, Tref, sem incorporação de cinzas de biomassa, para fins comparativos.

Os quantitativos para os traços Tméd e Tref, das argamassas em estudo, estão indicados no Quadro 3.5. Os materiais constituintes dos respectivos traços foram secos em estufa à uma temperatura de 50°C até apresentarem massa constante. Após o resfriamento os materiais foram pesados, para tanto, foi utilizada uma balança de precisão decimal, exceto para as cinzas de biomassa, que foram pesadas em balança com precisão de 0,0001 g. Feito isso, os materiais constituintes de cada traço foram acondicionados em sacos plásticos nas quantidades especificadas (por saco) em gramas (Quadro 3.5), fechados e misturados manualmente, agitando a própria embalagem até a homogeneização dos materiais, e colocou-se um novo saco plástico para garantir a vedação. Em seguida as embalagens, contendo em torno de 3 kg de argamassa pré-dosada, de Tméd e Tref, foram estocadas, separadas em 4 lotes. Para a aplicação do estudo do tempo de estocagem, cada lote possuía em média 4 embalagens de cada traço pré-dosado, totalizando 12 embalagens de Tméd e 12 embalagens de Tref.

Quadro 3. 5 - Quantitativos dos materiais secos das argamassas Tméd e Tref, pré-dosados, acondicionados e armazenados.

MATERIAIS		QUANTIDADES			PROCEDIMENTOS	TEMPO DE ESTOCAGEM t(i), i=dias	
		POR SACO (g)	POR LOTE (g)	TOTAL (kg)			
ARGAMASSA	Tref	CH-III	215	860	3,44	Pesagem+ Acondicionamento+ Homogeneização+ Armazenamento	
		CPV-ARI	325	1300	5,20		
		AR	2500	10000	40,00		
	Tméd	CH-III	215	860	3,44		*Pesagem+ Acondicionamento+ Homogeneização+ Armazenamento
		CPV-ARI	238	952	3,81		
		CCA	50,847	203,388	0,81		
		Cméd CBCA	20,860	83,44	0,33		
		CCE	15,640	62,56	0,25		
		AR	2500	10000	40,00		
		AR	2500	10000	40,00		

Tméd: traço para argamassa modificada com cinzas de biomassa.

Tref: traço para argamassa referência.

CH-III: cal tipo hidratada com carbonatos.

CPV-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial.

Cméd: *blend* composto pela combinação da cinza da casca de arroz (CCA), cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e da cinza do cavaco de eucalipto (CCE).

AR: areia natural, denominação comercial média.

*A pesagem dos materiais secos foi realizada em uma balança de precisão decimal, exceto as cinzas de biomassa que foram pesadas em balança com precisão de 0,0001g.

Fonte: Autoria própria.

Para cada um dos lotes da argamassa modificada (Tméd) e de referência (Tref), foram realizados os ensaios de índice de consistência pelo método espalhamento na mesa (*flow table*) NBR 13276 (ABNT, 2016b), tração na flexão e compressão simples NBR 13279 (ABNT, 2005a), retração e

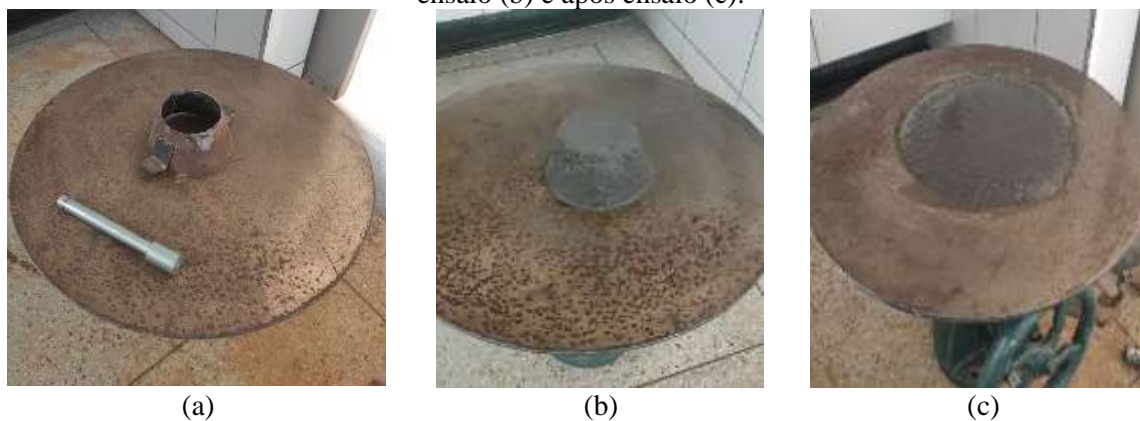
expansão NBR 15261 (ABNT, 2005b), aderência à tração (arrancamento) 13528-2 (ABNT, 2019) e permeabilidade *Test Method No. 11. 4* (RILEM, 1987).

A quantidade de água foi determinada no tempo de estocagem de 0 dia (t_0), por meio do ensaio de consistência, método prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2016b). O preparo da mistura para realização do ensaio seguiu a metodologia contida na NBR 16541 (ABNT, 2016a). Foi fixado o índice de consistência alvo em 265 ± 5 mm para ambos os traços, Tref e Tméd, a fim de determinar uma dosagem padrão para essas argamassas. Este método prevê uma tentativa inicial da quantidade de água necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada, configura-se em um processo iterativo por tentativas da quantidade de água até alcançar o índice de trabalhabilidade desejado. É importante destacar que a argamassa ensaiada em cada tentativa não pode ser utilizada em outros ensaios ou na produção de cp's, posto que, pode interferir em sua reologia e comprometer o seu desempenho. Logo, na realização desta etapa, caso a argamassa ensaiada não atingisse a consistência alvo, a mesma era descartada e então iniciado um novo ensaio.

Dessa maneira, a dosagem padrão foi realizada exclusivamente em t_0 , definindo a quantidade de água utilizada em todos os demais tempos de estocagem, t_{30} , t_{60} e t_{90} , para a produção das argamassas. O objetivo de adotar a dosagem padrão é verificar o tempo ao qual a argamassa ainda manterá as propriedades desejáveis, principalmente a trabalhabilidade, sem necessidade de acréscimos de água.

A configuração do ensaio de consistência da massa pelo espalhamento na mesa (*flow table*) está representada na Figura 3.10.

Figura 3. 10 - Ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa: mesa e molde metálico (a), antes do ensaio (b) e após ensaio (c).



Fonte: Autoria própria.

No entanto, além das dosagens padrão realizadas em t_0 para Tméd e Tref, e mantida para todos os demais tempos de estocagem na produção dos cp's, foi realizada uma adequação das dosagens através do ensaio de consistência (*flow table*) em t_{30} , t_{60} , t_{90} , para registrar o acréscimo de água necessário para atingir o índice de consistência de 265 ± 5 mm, almejando identificar uma faixa para a quantidade de água requerida pela argamassa no decorrer dos 90 dias de estocagem.

Assim, para o ensaio de consistência (*flow table*) a fim de adequar a dosagem, ao término da aferição dos diâmetros, caso necessitasse de água adicional, esta era acrescentada em 5% do volume inicial e misturada por mais 3 minutos na argamassadeira na velocidade de 650 rpm, e assim sucessivamente até atingir o índice de consistência desejado. Diferente do que prescreve a normativa, a argamassa, neste caso, foi reutilizada até atingir o índice de consistência desejado. Esta metodologia foi aplicada em todos os tempos de estocagem t30, t60 e t90, a fim de propor uma faixa para adequar a dosagem ao longo do tempo de estocagem.

Na sequência, com a dosagem padrão definida em t0, foi possível o preparo das argamassas Tref e Tméd para a realização dos ensaios do Estudo 4. Assim, para o preparo de cada argamassa com os traços pré-dosados, Tméd e Tref, para cada lote (t0, t30, t60 e t90) foi aplicada a metodologia prescrita pela NBR 16541 (ABNT, 2016a), a mesma aplicada no Estudo 2 para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref. Os procedimentos metodológicos para a análise do desempenho das argamassas Tméd e Tref, nos tempos de estocagem t(i), estão indicados no Quadro 3.6.

Quadro 3. 6 - Metodologia para análise do desempenho dos lotes das argamassas Tméd e Tref, nos tempos de estocagem t(i).

DESCRIÇÃO	METODOLOGIA	ARGAMASSA	TEMPO DE ESTOCAGEM t(i), i=dias
Determinação do índice de consistência (<i>flow table</i>)	NBR 13276 (ABNT, 2016b)	Tref, e Tméd	t0, t30, t60 e t90
Preparo da mistura para realização de ensaios	NBR 16541 (ABNT, 2016a)		
Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão simples	NBR 13279 (ABNT, 2005a)		
Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear)	NBR 15261 (ABNT, 2005b)		
Determinação da resistência de aderência à tração	NBR 13528 (ABNT, 2019)		
Permeabilidade (cachimbo)	<i>Test Method No. 11. 4 (RILEM, 1987)</i>		

Fonte: Autoria própria.

Objetivando analisar e comparar o desempenho mecânico das argamassas no tempo de cura de 28 dias em cada tempo de estocagem, foram produzidos 3 cp's da argamassa Tméd e 3 cp's da argamassa Tref, a cada 30 dias, totalizando 12 cp's da argamassa modificada e 12 cp's da argamassa referência. O rendimento foi de aproximadamente 6 cp's prismáticos, nas dimensões 4x4x16 cm para cada embalagem contendo 3 kg das argamassas pré-dosadas, Tméd e Tref.

Conforme prescrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005a), as partes resultantes dos cp's utilizados para ensaio de tração na flexão, foram aproveitados para a realização do ensaio de compressão simples. Tanto o ensaio de tração na flexão, quanto o de compressão simples foram feitos conforme prescreve a

NBR 13279 (ABNT, 2005a), e utilizando a Equação 3.1 e a Equação 3.2, do Estudo 2, foi possível realizar o cálculo das resistências de tração na flexão e de compressão simples, respectivamente.

Está representada na Figura 3.11 os cp's prismáticos 4x4x16 cm para Tref e Tméd dosados em t0.

Figura 3. 11 - Corpos de prova (cp's) Tref e Tméd, dosados em t0.



Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que para t90 com 28 dias de cura foram ensaiados apenas 3 cp's na compressão simples, pois as demais partes resultantes foram utilizadas na determinação da umidade das amostras no momento da realização do ensaio. Assim, ao término do ensaio de tração na flexão, em t90 com 28 dias de cura, para as duas partes resultantes de cada cp, uma foi reservada para ensaio na compressão simples e a outra parte embalada em um saco plástico para o ensaio da determinação da umidade da amostra, seguindo a metodologia de ensaio prescrita pela NBR 13528 (ABNT, 2019), adaptada para amostra desta análise. Logo, a determinação da umidade foi calculada utilizando a Equação 3.5, inicialmente as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 105°C para secarem até atingirem massa constante, em seguida as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecador para resfriar e então foram pesadas.

$$U = \frac{(m_u - m_i) - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

U: teor de umidade, em porcentagem de massa de cada cp, em %;

m_i : massa de cada saco plástico utilizado para acondicionar os cp's, em g;

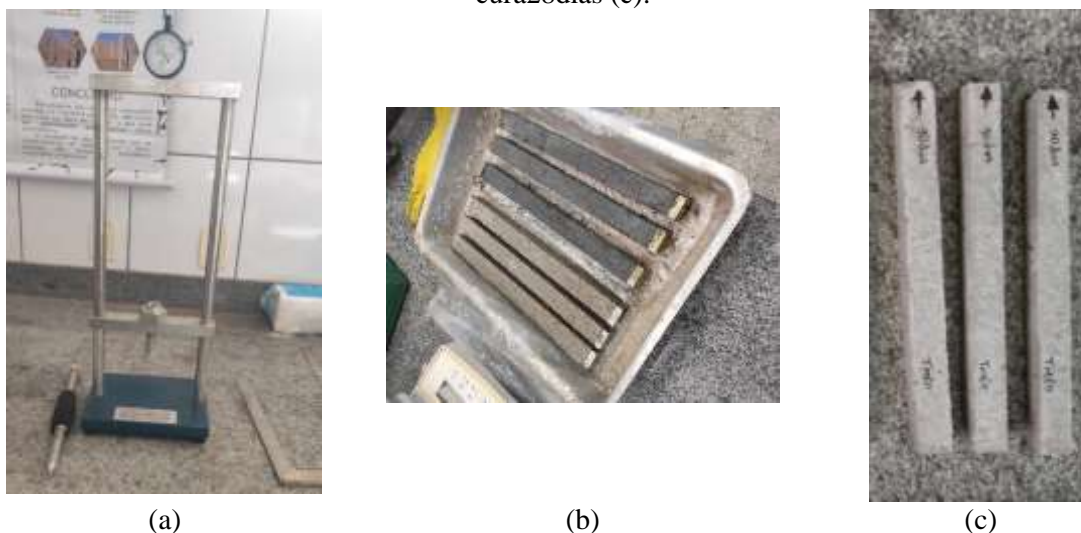
m_u : massa de cada cp com o respectivo saco plástico utilizado para acondicioná-lo, em g;

m_s : massa de cada testemunho após o processo de secagem, em g.

Para a determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear), foram produzidos 3 cp's com dimensões 25 x 25 x 285 mm, com comprimento efetivo de 250 mm entre as extremidades

internas dos pinos, conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005b), para cada traço em cada idade de estocagem. Os mesmos foram desmoldados após 48 horas e mantidos em condições de temperatura e umidade controladas, temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5) \%$, até o momento de ensaio. Na Figura 3.12 está represento o aparato utilizado no ensaio de retração.

Figura 3. 12 - Ensaio de retração: aparelho comparador (a), cp's Tref e Tmed (b) e cp's Tmed-t90dias-cura28dias (c).



Fonte: Autoria própria.

A primeira leitura e determinação da massa dos cp's foi realizada logo após a desforma (L_0 e m_0), e as demais leituras aos 7 e 28 dias (L_i e m_i) contando da leitura inicial. A variação dimensional e a variação de massa é obtida utilizando respectivamente, a Equação 3.6 a Equação 3.7, para os cálculos.

$$\varepsilon_i = \frac{(L_i - L_0)}{0,25} \quad (3.6)$$

Onde:

ε_i : é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão quando positiva) na idade "i", arredonda ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro;

L_i : é a leitura efetuada na idade final, em milímetros;

L_0 : é a leitura efetuada após a desforma, em milímetros;

i: é a idade de leitura.

$$\Delta m = \frac{(m_i - m_0)}{m_0} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Onde:

Δm : é a variação de massa, arredondada ao décimo mais próximo, em porcentagem;

m_f : é a massa na idade final, em gramas;

m_0 : é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas.

A determinação da aderência à tração foi realizada seguindo o procedimento descrito pela NBR 13528 (ABNT, 2019) utilizando como substrato o componente de alvenaria tijolo cerâmico de 6 furos com dimensões de 9x19x29 cm. Esses tijolos sem chapisco foram recobertos por uma camada com aproximadamente 2 cm de espessura com as argamassas em estudo, Tref e Tméd, por serem argamassas tipo mista, a referida normativa prescreve um tempo de cura de 28 dias para os cp's. Assim, a produção dos cp's contabilizou em pelo menos 4 amostras para o ensaio de aderência, sendo 2 em cada tijolo cerâmico, para cada argamassa em estudo (Tref e Tméd) e em cada tempo de estocagem (t0, t30, t60 e t90 dias), totalizando 16 amostras para Tref e 16 amostras para Tméd, ao longo do período de estocagem.

A preparação dos furos nos cp's seguiu o padrão normativo respeitando a distância mínima de 50 mm entre um furo e outro, dos cantos e das quinas. Após marcados, utilizando uma furadeira de bancada da marca Vonder modelo FBV 013, à qual foi acoplada uma serra copo com as mesmas dimensões das pastilhas de arrancamento. Foi realizada a perfuração, possibilitando a separação da amostra do restante da argamassa de revestimento.

Para a colagem da pastilha, foi realizada a limpeza da superfície da argamassa com um pincel de cerdas finas, a fim de garantir que não houvesse nenhuma poeira sobre o substrato no momento da colagem da pastilha. Foi utilizada a massa plástica em camada única e após a secagem foi acoplado o tripé do equipamento de arrancamento. Na sequência, para a realização do ensaio foi posicionada a célula de carga na extremidade da pastilha, e em movimento uniforme aplicou-se a carga até a ruptura do corpo de prova.

Assim ao término do ensaio, registrou-se a força e o tipo de ruptura, e então a resistência de aderência foi determinada utilizando a Equação 3.8 para o cálculo, segundo a NBR 13528-2 (ABNT, 2019).

$$R_a = \frac{F}{A} \quad (3.8)$$

Onde:

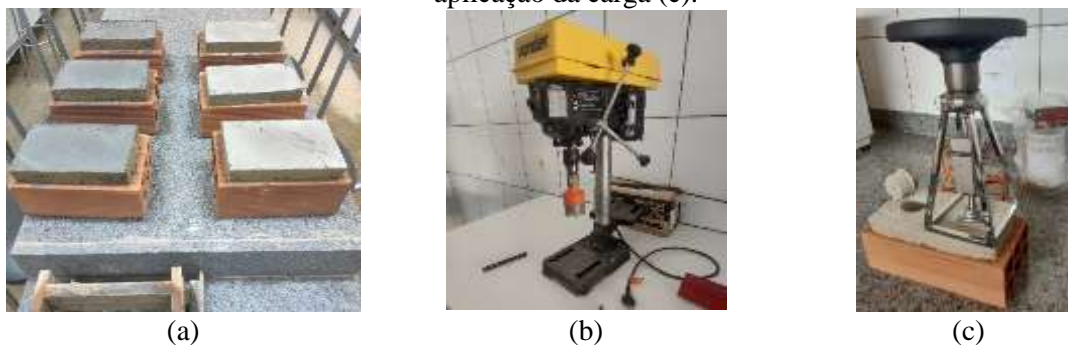
R_a : é a resistência de aderência a tração ao substrato, expressa em megapascals (MPa);

F : é a força de ruptura, expressa em newtons (N);

A : é a área do corpo de prova, expressa em milímetros quadrados (mm²).

O aparato utilizado no ensaio de aderência à tração está representado na Figura 3.13.

Figura 3. 13 - Ensaio de aderência à tração ao substrato: cp's componente de alvenaria sem chapisco com argamassa T_{méd} e T_{ref} para t₀ dia (a), equipamento utilizado para furos (b) equipamento para aplicação da carga (c).



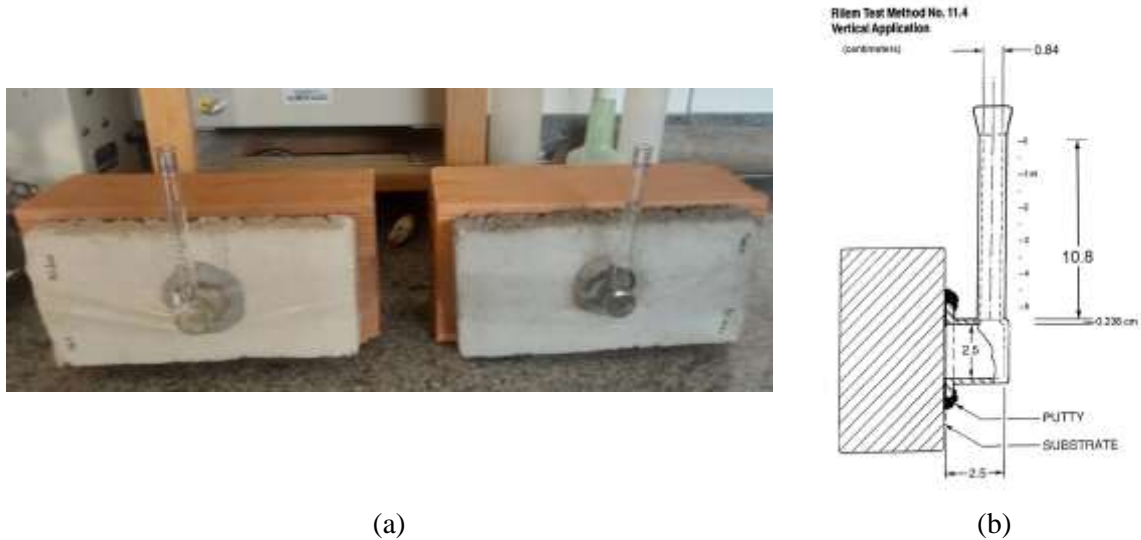
Fonte: Autoria própria.

Para a determinação da permeabilidade (cachimbo) seguiu-se a metodologia prescrita pelo *The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures - Rilem Test Method No. 11.4*, RILEM (1987). Este ensaio caracteriza-se por ser um método de maior facilidade de execução, complementar aos ensaios de absorção por capilaridade, permitindo a avaliação em laboratório ou *in loco* da quantidade de água que penetra no material.

O procedimento consiste na fixação na superfície vertical, de um tubo de vidro em forma de L graduados de 0 a 4 cm³, denominados Tubos de Carsten. Este tubo possui uma parte inferior em formato cilíndrico cujo fundo é fechado. A seção do tubo que encosta na superfície de ensaio é aberta, com 5,7 cm² e constitui um bordo circular plano onde é fixado o tubo, por meio da aplicação de silicone e massa de calafetar, na superfície a ensaiar. O total da altura da coluna de água a aplicada à superfície, medida desde o meio da seção até a graduação superior, é de 9,8 cm, o que corresponde a uma pressão de 961,38 Pa, ou ainda a uma pressão dinâmica de vento de 39,6 m/s ou 142,6 Km/h.

Para este ensaio foram moldados 2 cp's para cada argamassa em estudo (T_{ref} e T_{méd}), em cada tempo de estocagem (t₀, t₃₀, t₆₀ e t₉₀ dias). A moldagem dos cp's seguiu igualmente aos cp's preparados para o ensaio de arrancamento. E, aos 28 dias de cura, as amostras foram deixadas na estufa até atingirem constância de massa, depois, fixou-se os tubos graduados (cachimbos), após 20 minutos, preencheram-se os tubos com água até à graduação 0 cm³ e então foram feitas a leituras em cada um dos cachimbos, verificando o deslocamento da lâmina d'água nestes tubos aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos, para a verificação do volume de água que percolou nos cp's. Sugere-se repor a água durante o ensaio, caso necessário, segundo o *Test Method No. 11.4* (RILEM, 1987), porém estes intervalos são sugestivos, e podem ser alterados conforme a porosidade do material a ser ensaiado. Dessa forma, a fim de garantir uma leitura apropriada, padronizou-se a leitura com o registro do tempo necessário para que percolasse os 4 cm³ (4 ml) do Tubo de Carsten, sem a necessidade de repor a água a cada verificação. A Figura 3.14 representa o aparato utilizado no ensaio de permeabilidade (cachimbo).

Figura 3. 14 - Ensaio de absorção de água sob baixa pressão ou permeabilidade (cachimbo): aparato para ensaio (a) e esquema do Tubo de Carsten para superfícies verticais (b).



Fonte: Baseado em *Test Method No. 11.4*, RILEM (1987).

Ao término da análise dos desempenhos dos lotes em seus tempos de estocagem, as amostras com 56 dias de cura de T_{méd} e T_{ref} dosados com as embalagens do último lote (t₉₀), foram submetidas aos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), pela Rede de Laboratórios Multiusuários (RELAM) da Universidade Federal de Uberlândia – UFU, utilizando o microscópio eletrônico de varredura, marca Tescan, modelo VEJA 3 LMU. Esta técnica permitiu identificar a morfologia das amostras através de imagens com aparência tridimensional, além disso, por ter acoplado o detector por microanálise, foi possível identificar os elementos químicos presentes.

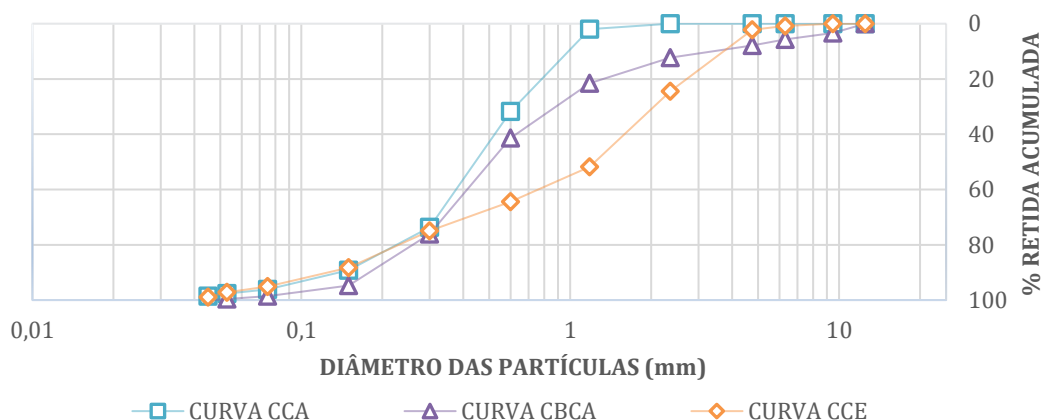
4 RESULTADOS

Os resultados advindos do Estudo 1, Estudo 2 e Estudo 3, direcionaram a escolha do traço ideal para a argamassa modificada com cinzas de biomassa no Estudo 4, verificando o desempenho entre as idades de armazenamento.

4.1 Estudo 1- Caracterização das Cinzas e *Blends* de Biomassa

As cinzas de biomassa e suas combinações (*blends*) foram caracterizadas com os procedimentos descritos nos métodos de avaliação do Estudo 1, apresentados no Quadro 3.2, e os resultados são apresentados nos itens subsequentes. Na Figura 4.1 são apresentados os resultados obtidos para análise granulométrica das cinzas de biomassa coletadas. Verifica-se através das curvas granulométricas (CCA, CBCA e CCE) que aproximadamente 25% das partículas passaram na peneira de malha 0,3mm.

Figura 4. 1 - Distribuição granulométrica da CCA, CBCA e CCE.



Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos ensaios de caracterização granulométrica as amostras de cinzas de biomassa foram dispostas separadamente, como ilustrado na Figura 4.2 para a CCA (Figura 4.2a), CBCA (Figura 4.2b) e CCE (Figura 4.2c).

No entanto, foi possível observar que as cinzas de biomassa coletadas não se enquadram nos requisitos para classificação granulométrica como materiais pozolânicos. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), uma pozolana deverá apresentar no máximo 20% de material retido na peneira 45 μ m. Para tanto, com o intuito de aproveitar os resíduos agroindustriais coletados em sua totalidade, as amostras das biomassas foram submetidas a uniformização proposta no Estudo 1.

Após a etapa preliminar de análise granulométrica das amostras de cinzas de biomassa coletadas em suas respectivas plantas industriais, foi possível obter os resultados de caracterização quanto à finura (F). Os resultados para a finura (F) estão apresentados no Quadro 4.1. Dessa forma, para a determinação da porcentagem de material retido na peneira 45 μ m, das cinzas e *blends* de cinzas de biomassa, foram

determinadas a finura (F) das cinzas de biomassa antes e após a homogeneização, e dos *blends* C_{mín}, C_{méd} e C_{máx}, como indicados no Quadro 4.1.

Figura 4. 2 - Amostras das cinzas de biomassa após ensaios de distribuição granulométrica: CCA (a), CBCA (b) e CCE (c).



Fonte: Autoria própria.

Quadro 4. 1 - Resultados da finura (F).

AMOSTRA	PROCEDIMENTO	F (%)
CCA	Secar (50 °C) + Peneirar (#4)	86,3
CBCA		94,6
CCE		85,1
CCA	Secar (50 °C) + Peneirar (#4) + Processar (30 rpm)	47,0
CBCA		66,9
CCE		45,0
C _{mín}	<i>Blends</i>	52,5
C _{méd}		53,5
C _{máx}		53,1

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da perda ao fogo (PF) e teor de umidade (U) estão indicados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Resultados do teor de umidade (U) e perda ao fogo (PF).

Amostra	U (%)	PF (%)
CCA	0,5	21,3
CBCA	0,8	40,5
CCE	1,8	72,3
C _{mín}	2,5	25,1
C _{méd}	2,7	33,3
C _{máx}	3,3	38,0

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se no Quadro 4.1, que o procedimento adotado para a uniformização, apesar de melhorar a finura das partículas, não foi suficiente para fragmentá-las de forma a atender aos requisitos da referida normativa. Apesar de não serem classificadas como pozolanas pelo índice de finura, é

possível observar na Tabela 4.1, que os teores de umidade estão dentro do limite de 3% para essa classificação, segundo NBR 12653 (ABNT, 2014).

Em contrapartida, os elevados resultados obtidos para perda ao fogo (PF), Tabela 4.1, podem prejudicar a reatividade das cinzas, pois segundo Fernandes *et al.* (2016) a maior quantidade de carbono está ligada a menor quantidade de sílica disponível.

Essa maior quantidade de matéria orgânica não queimada, além de proporcionar um maior teor de umidade (U) às cinzas, também influi em uma maior porosidade aos sistemas cimentícios, aumentando a demanda de água necessária para o molhamento das partículas, modificando a sua reologia (FRANÇA *et al.*, 2016; MARTIRENA; MONZÓ, 2018). No entanto, segundo Resende (2013), para valores de PF até 30%, as adições minerais podem ser aplicadas em argamassas sem prejuízo em sua resistência final.

O resultado para a densidade de partículas (Dp) está apresentado na Tabela 4.2 e a massa específica (μ) indicada na Tabela 4.3.

Tabela 4. 2 - Resultados para a densidade de partículas (Dp).

Amostra	Dp (g/cm ³)
CCA	2,02
CBCA	1,63
CCE	1,60
Cmín	1,60
Cméd	1,53
Cmáx	1,36
CPV-ARI	2,84

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4. 3 -Resultados para a massa específica (μ).

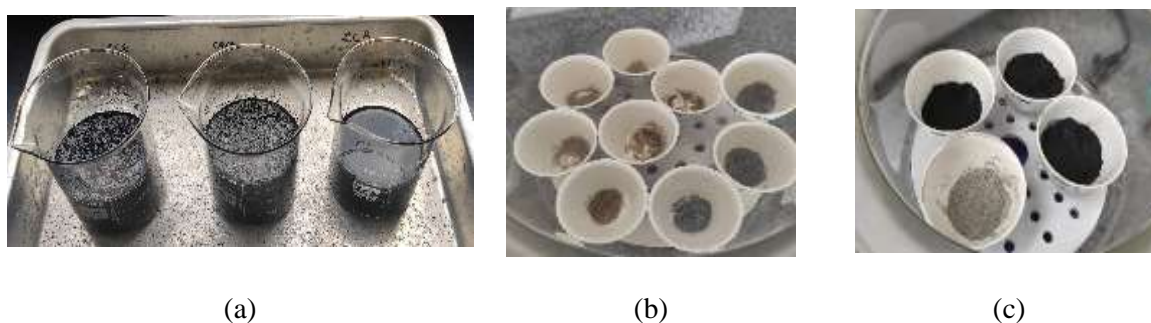
Amostra	μ (g/cm ³)
Cmín	1,96
Cméd	1,91
Cmáx	2,03
CPV-ARI	3,13

Fonte: Autoria própria.

A densidade de partículas (Dp) é uma grandeza que envolve massa e volume, assim sendo, percebe-se que a CCA ocupa menor volume comparado as outras cinzas e *blends*. Além disso, verifica-se que o Cmáx por ser menos denso, ocupará maior volume ao ser utilizado. De acordo com Aprianti *et al.* (2016), a substituição de materiais cimentícios por diferentes volumes de cinzas irá afetar os resultados devido a ação sinérgica entre elas, em que o volume pode aumentar ou diminuir de acordo com a Dp da cinza e do cimento e, com isso, segundo Martirena e Monzó (2018) afetar a reologia do sistema de maneira significativa. Porém, os resultados estão coerentes aos encontrados na literatura para os valores de densidade de partículas da CCA (CASTRO *et al.*, 2020), ou massa específica da CBCA (KAZMI *et al.*, 2017; MOURÃO; PAULA, 2022) e da CCE (RESENDE, 2013).

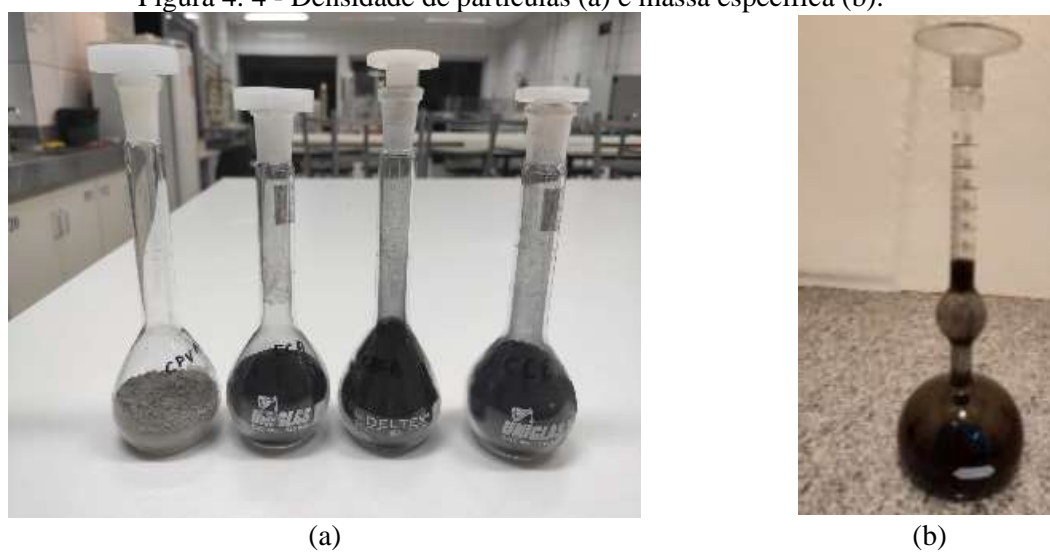
Algumas amostras de cinzas de biomassa estão apresentadas na Figura 4.3 durante a realização dos ensaios para a finura (Figura 4.3a), para a perda ao fogo (Figura 4.3b) e para o teor de umidade (Figura 4.3c). Já na Figura 4.4, está ilustrada algumas etapas da realização para os ensaios de densidade de partículas, Figura 4.4a, e massa específica, Figura 4.4b.

Figura 4. 3 – Finura (a), perda ao fogo (b) e teor de umidade (c).



Fonte: Autoria própria.

Figura 4. 4 - Densidade de partículas (a) e massa específica (b).



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4.4 é apresentado um resumo dos resultados obtidos para o índice de atividade pozolânica *Chapelle* modificado, NBR 15895 (ABNT, 2010a), que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado ($I_{Ca(OH)_2}$), expresso em miligramas (mg) de $Ca(OH)_2$ por grama (g) das cinzas e *blends* de biomassa estudados nesta pesquisa. Os resultados de caracterização até aqui discutidos vão ao encontro do índice de atividade pozolânica *Chapelle* ($I_{Ca(OH)_2}$) apresentado por cada uma das cinzas e *blends* de biomassas estudadas.

Raverdy *et al.* (1980) estabelece o limite mínimo de 330 mg CaO/g de amostra (equivalente a 436 mg de $Ca(OH)_2$ /g de amostra) para a classificação de uma adição mineral como material pozolânico. Este método determina diretamente o teor de cal fixado por atividade pozolânica, com a interação da

adição mineral com o hidróxido de cálcio, proporcionando o máximo potencial reativo da adição (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

Tabela 4. 4 - Índice de atividade pozolânica *Chapelle*.

Amostra	$I_{Ca(OH)_2}$
CCA	838,40
CBCA	31,34
CCE	54,85
Cmín	915,29
Cméd	534,20
Cmáx	380,16

Fonte: Autoria própria.

Nesse sentido, a CCA, com consumo de 838,40 mg de $Ca(OH)_2/g$ de amostra, trata-se de um material com elevada atividade pozolânica, assim como elucidado nas pesquisas de Bonfim e Paula (2021). Além disso, o Cmín apresenta-se com um consumo de 915,29 mg de $Ca(OH)_2/g$ de amostra, indicando efeito sinérgico entre a CCA e CBCA. O mesmo não ocorre para o Cméd, mas ainda assim, enquadra-se na classificação como material pozolânico, com um consumo de 534,20 mg de $Ca(OH)_2/g$ de amostra. Observa-se que Cmáx não atingiu o limite mínimo, essa condição pode ser justificada pela maior PF e menor Dp deste *blend* (Tabela 4.1 e Tabela 4.2, respectivamente), que possui maior porcentagem de CCE em sua composição (Tabela 3.1), a qual apresenta as partículas mais grossas entre as cinzas de biomassa estudadas, Figura 4.1.

Para analisar a influência no tempo de pega da pasta de cimento e das pastas modificadas com inserção dos *blends* de cinzas de biomassa, foi realizado o ensaio prescrito pela NBR 16606 (ABNT, 2018a) e pela NBR 16607 (ABNT, 2018b) para determinação da quantidade de água (A), em porcentagem, necessária para a obtenção das pastas de consistência normal. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.5, que também exibe os tempos de início de pega (IP) e de fim de pega (FP), além do intervalo de pega (Δ_p) para a pasta referência (Ref), sem inserção de cinzas de biomassa, e as pastas com taxas graduais de substituições ao cimento Portland pelos *blends* Cmín, Cméd e Cmáx.

Tabela 4. 5 - Resultados da quantidade de água (A), início de pega (IP), fim de pega (FP) e intervalo de pega (Δ_p).

Pasta	A (%)	IP (min)	FP (min)	Δ_p (min)
Ref	36	158	190	32
Cmín	60	115	165	50
Cméd	72	113	195	82
Cmáx	98	194	255	61

Fonte: Autoria própria.

Nota-se, pelos resultados apresentados na Tabela 4.5, que a quantidade de água necessária para a obtenção da pasta de consistência normal aumentou gradativamente conforme aumentava o teor de substituição de cimento por cinzas de biomassa. Isso se deve ao fato que o maior teor de cinza contribui para a queda da trabalhabilidade, pois suas partículas são maiores que a do cimento, além disso a

quantidade de matéria orgânica não queimada na composição das cinzas é maior, o que requer maior quantidade de água para atingir uma trabalhabilidade adequada, conforme elucidado por Rajamma *et al.* (2009) e Aprianti *et al.* (2016).

Na Figura 4.5 está representado o aparato para o ensaio de determinação da pasta de consistência normal.

Figura 4.5 - Determinação da pasta de consistência normal (a), início de pega (b) e fim de pega (c).



Fonte: Autoria própria.

Para IP e FP, tanto a pasta Ref, quanto as pastas $C_{mín}$, $C_{méd}$ e $C_{máx}$, apresentaram dentro dos limites indicados para o CPV-ARI, sendo 60 min o tempo mínimo para IP, e 600 min o tempo máximo para FP, prescritos pela NBR 16697 (ABNT, 2018c).

Observa-se que os valores de IP para a pasta contendo os *blends* $C_{mín}$ e $C_{méd}$ foram menores que o valor de IP da pasta Ref, e que o valor de FP para a pasta $C_{méd}$ ficou bem próximo da pasta Ref. De modo geral, observa-se que ocorreu uma ampliação no intervalo de pega para todas as pastas com os *blends* de cinzas de biomassa, comparadas à pasta Ref, isso pode ser justificado pelo aprisionamento da água intersticial devido a microporosidade das cinzas de biomassa (PAULA *et al.*, 2009).

Para a pasta $C_{máx}$ em relação a pasta Ref ocorreram acréscimos nos tempos de IP e FP de 22,78% e 34,21%, respectivamente. Este retardo pode ser explicado devido a maior porcentagem de CCE presente neste *blend*, que apresenta maiores partículas em sua composição granulométrica, e maior perda ao fogo se comparada a CCA e a CBCA, conseqüentemente maior presença de matéria orgânica

não queimada. Essa tendência foi observada de modo similar nas pesquisas com maior substituição do cimento Portland por CBCA apresentando maior teor de carbono presente na pasta (MOURÃO; PAULA, 2022; GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007; CORDEIRO; KURTIS, 2017).

Frente aos resultados obtidos nos ensaios, optou-se neste Estudo 1 selecionar o traço com a maior quantidade de cinzas em substituição ao cimento sem comprometer a pozolanicidade do material. Neste caso, o traço T_{méd} com o *blend* C_{méd} mostrou-se o mais próximo dessas características.

4.2 Estudo 2 – Desempenho Físico e Mecânico dos Traços Ótimos

A argamassa Tref e as argamassas modificadas com cinzas de biomassa T_{mín}, T_{méd} e T_{máx} utilizando respectivamente os *blends* de cinzas de biomassa C_{mín}, C_{méd} e C_{máx}, foram caracterizadas por meio dos procedimentos descritos nos métodos de avaliação do Estudo 2, e os resultados estão apresentados a seguir.

No estado endurecido, os resultados encontrados para a resistência à compressão simples e para a resistência à tração na flexão dos traços T_{mín}, T_{méd}, T_{máx} e Tref, aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura dos cp's de argamassa, estão apresentados na Figuras 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

Observa-se nos resultados obtidos para a resistência à compressão de T_{mín}, T_{méd}, T_{máx} e Tref, Figura 4.6, um aumento na resistência ao longo do tempo de cura aos 7, 14 e 28 dias. Apesar de T_{mín} e Tref aos 56 dias de cura continuarem aumentando a resistência à compressão, o mesmo não ocorreu com T_{méd} e T_{máx}. T_{méd} sofreu uma redução e o T_{máx} manteve-se praticamente sem ganho e sem queda em sua resistência à compressão.

Cabe ressaltar que os resultados do ensaio de início de pega (IP) e fim de pega (FP), Tabela 4.5, do Estudo 1, mostram que as pastas utilizando C_{méd} e C_{máx}, os mesmos *blends* utilizados em T_{méd} e T_{máx}, respectivamente, requerem mais água para obtenção da pasta de consistência normal, e, considerando o intervalo de tempo de pega (Δ_p) dos *blends*, quanto maior o intervalo do tempo de pega menor foi a resistência obtida pela argamassa modificada apresentada na Figura 4.6. Essa relação aponta para a adequação da dosagem, a fim de garantir os compostos hidratados das pastas modificadas com cinzas de biomassa.

Nos resultados da resistência à tração na flexão, Figura 4.7, percebe-se que tanto T_{mín} quanto T_{méd} sofreram uma redução da resistência à tração aos 56 dias de cura. Enquanto T_{máx} e Tref continuaram crescendo com valores superiores aos obtidos aos 28 dias de cura.

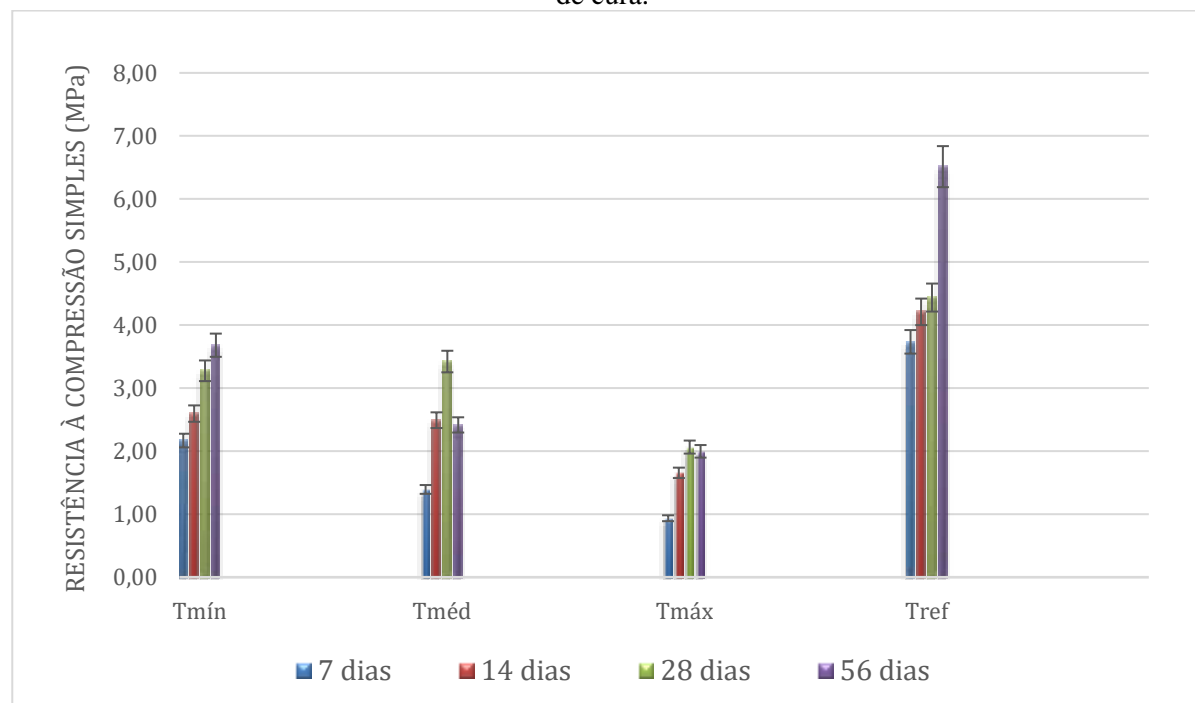
Ainda observando os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 4.6 e 4.7, é possível concluir que tanto a resistência da tração na flexão quanto na compressão simples, são grandezas que dependem diretamente da quantidade de cimento na mistura, posto que, quanto maior a porcentagem de cimento presente na argamassa, maior foi o resultado obtido para essas resistências aos 56 dias de cura.

Ainda, a NBR 13281 (ABNT, 2023) possibilita a classificação das argamassas conforme sua resistência à compressão simples (Quadro 2.7 e 2.8) e à tração na flexão (Quadro 2.5). Assim pode-se observar que de acordo com essa normativa, para o resultado da resistência à compressão (f_a) a

argamassa Tref pode ser designada, pela NBR 13281-2 (ABNT, 2023), como argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE), com $5,0 \text{ MPa} \leq f_a < 8,0 \text{ MPa}$, enquanto, Tmín, Tméd e Tmáx, podem ser classificadas em argamassa inorgânica para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, apenas vedação (AAV), com $2,0 \text{ MPa} \leq f_a < 5,0 \text{ MPa}$, ou para fixação horizontal da alvenaria, apenas encunhamento (AAF), com $1,5 \text{ MPa} \leq f_a < 5,0 \text{ MPa}$.

Para a resistência à tração na flexão (R_f), através dos intervalos de classificação apontados pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas de revestimento de paredes e tetos, Tref classifica-se em R3, com R_f variando entre 1,5 a 3,0 MPa, Tmín, Tméd e Tmáx classificam-se em R2, com R_f variando de 0,5 a 1,5 MPa.

Figura 4. 6 - Resistência à compressão simples para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14 28 e 56 dias de cura.



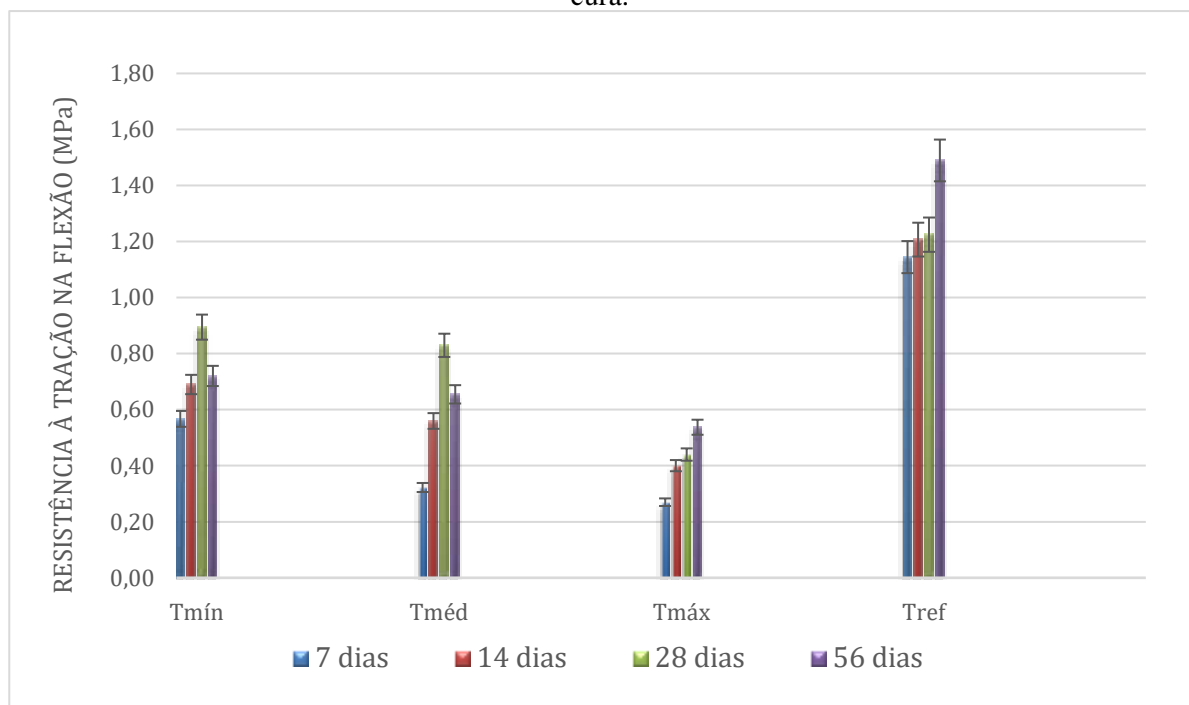
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o Tmín foi o único traço modificado com cinzas de biomassa que não teve queda em sua resistência à compressão simples aos 56 dias, o que pode ser explicado pela isenção de CCE no *blend* Cmín (12,50%CCA + 3,20%CBCA + 0,00%CCE), neste caso a CCE pode ter interferido negativamente na resistência à compressão simples dos traços Tméd com *blend* Cméd (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75% CCE) e Tmáx com o *blend* Cmáx (18,80%CCA + 9,50%CBCA + 9,50%CCE). Além disso, por demandarem por mais água na obtenção da pasta de consistência normal, Estudo 1, e um maior intervalo de pega, a relação a/ms pode ter sido insuficiente para garantir compostos hidratados. Este fator pode ter sido agravado pela cura realizada sem a submersão, cura seca. Também, Tméd e Tmáx possuem maiores teores de substituição do cimento, esse fato está diretamente ligado a perda de resistência comparado a Tref. relação água/materiais secos em 0,18, Tabela 2.4, foi ineficiente. Este

fator pode ter sido agravado pela cura realizada sem a submersão, cura seca, dos cp's para aproximar ao comumente empregado na aplicação das argamassas nas obras.

Para a resistência à tração na flexão, aos 56 dias de cura, apenas Tmáx manteve-se ganhando resistência, isso pode ser justificado pela menor porcentagem de cimento e maior porcentagem de cinzas garantindo um melhor desempenho mecânico.

Figura 4. 7 - Resistência à tração na flexão para Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 7, 14, 28, e 56 dias de cura.

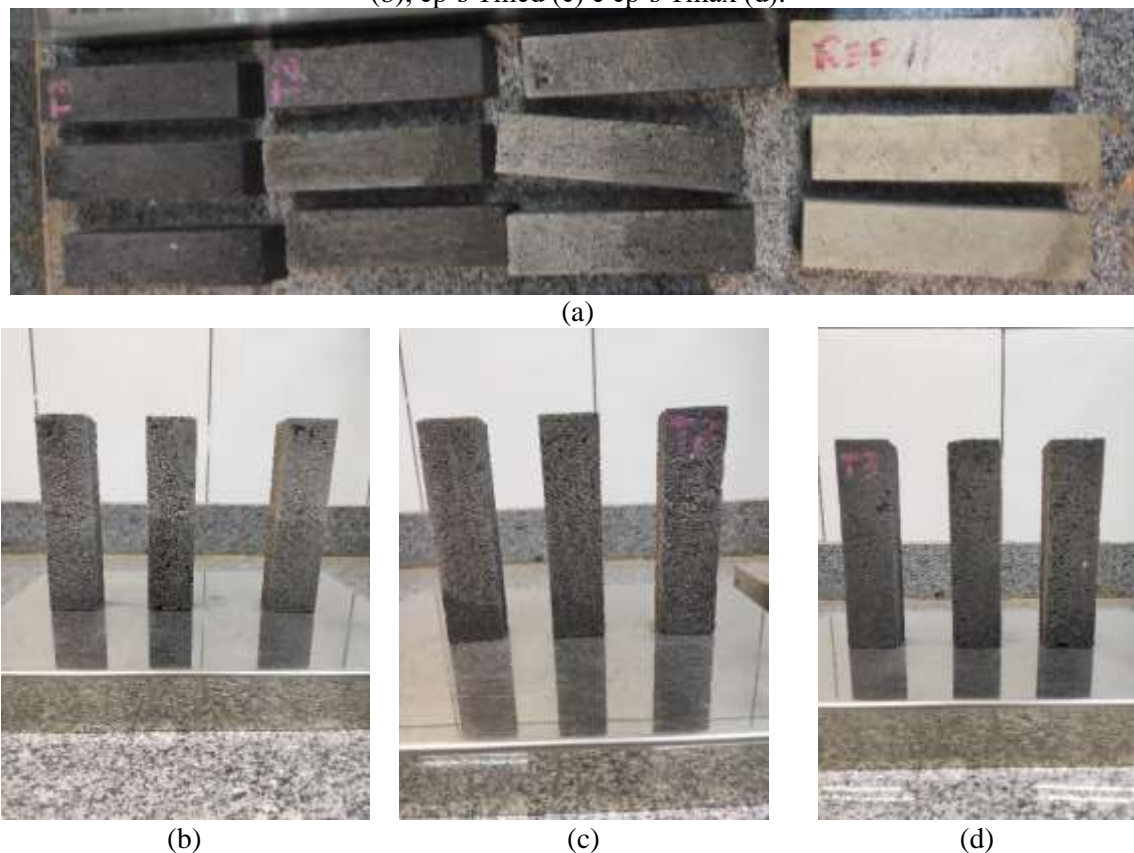


Fonte: Autoria própria.

No estado endurecido, os resultados encontrados para o ensaio de absorção por capilaridade, dos traços Tmín, Tméd, Tmáx e Tref aos 28 dias de cura dos estão apresentados na Tabela 4.6.

Pelo resultado do coeficiente de absorção por capilaridade (C^*), Tabela 4.6, nota-se que a ausência da CCE no *blend* Cmín culminou em uma maior velocidade de absorção de água por capilaridade no traço Tmín, enquanto que para Tméd e Tmáx pode ter ocorrido um melhor preenchimento da matriz cimentícia pelos diferentes tamanhos das partículas, pois tanto o *blend* Cméd quanto o *blend* Cmáx possuem em sua composição a CCA, CBCA e CCE. Além disso, observa-se que o aumento da porcentagem das cinzas no Tmáx com o *blend* Cmáx (18,80%CCA + 9,50%CBCA + 9,50%CCE), comparado ao Tméd com o *blend* Cméd (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75% CCE), resultou em um acréscimo no coeficiente de capilaridade do Tmáx. Assim, relacionando os resultados para o coeficiente de capilaridade, Tabela 4.6, com os resultados apresentados no Quadro 4.1, para a finura, é possível observar que a menor finura para o *blend* Cmín, no valor de 52,5%, apresentou o maior coeficiente de capilaridade, $4,6 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$, e que a maior finura para o *blend* Cméd, no valor de 53,5% apresentou o menor coeficiente de capilaridade, $3,2 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

Figura 4. 8 - Cp's Tmáx, Tméd, Tmín e Tref após ensaio de absorção por capilaridade (a), cp's Tmín (b), cp's Tméd (c) e cp's Tmáx (d).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4. 6 - Resultados da absorção e coeficiente de capilaridade.

Traço	cp	Absorção por capilaridade (g/cm ²)		Coeficiente de capilaridade (C)			C* Se DP>20%
		10 min	90 min	C (g/dm ² .min ^{1/2})	Cmédia (g/dm ² .min ^{1/2})	DP (%)	
Tref	I	0,013	0,031	0,3	1,1	27,3	1,3
	II	0,019	0,112	1,5			
	III	0,019	0,088	1,1			
Tmín	I	0,206	0,613	4,5	4,5	68,9	4,6
	II	0,069	0,263	3,1			
	III	0,231	0,525	4,7			
Tméd	I	0,281	0,537	4,1	3,2	128,1	3,2
	II	0,094	0,294	3,2			
	III	0,200	0,400	3,2			
Tmáx	I	0,481	0,725	3,9	3,7	75,7	3,8
	II	0,281	0,456	2,8			
	III	0,381	0,613	3,7			

Fonte: Autoria própria.

A NBR 13281 (ABNT, 2005) possibilita a classificação das argamassas de acordo com o coeficiente de capilaridade, Quadro 2.6. Assim, as argamassas com traços Tref classifica-se em C1 (coeficiente de capilaridade $\leq 1,5 \text{ g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$), Tmín em C4 (variando entre 3,0 a 7,05 $\text{g/dm}^2.\text{min}^{1/2}$),

e por fim $T_{méd}$ e $T_{máx}$ em C3 (variando entre 2,0 a 4,0 g/dm².min^{1/2}). Enfatizando o melhor desempenho entre as argamassas modificadas com cinzas de biomassa, o $T_{méd}$, utilizando o *blend* $C_{méd}$.

4.3 Estudo 3 – Síntese das Características para o Traço Ideal da Argamassa Modificada

Diante das discussões apresentadas nos Estudos 1 e 2, foi possível concluir que o traço $T_{méd}$ pode ser escolhido como o traço ideal para o desenvolvimento de uma argamassa modificada com cinzas de biomassa, pois este traço contém o *blend* $C_{méd}$ que apresentou o melhor perfil pozolânico e melhor desempenho físico e mecânico no estado endurecido ao considerar a maior quantidade de cinzas de biomassa incorporadas no traço da argamassa, promovendo uma maior sustentabilidade.

Está apresentada na Tabela 4.7 os resultados médios obtidos para ensaio de resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão e respectivos desvios padrões, nas idades de cura de 7, 14, 28 e 56 dias dos corpos de prova (cp's).

Tabela 4. 7- Resultado médio e desvio padrão da resistência à compressão simples e tração na flexão (Método Scott-Knott, p=0,05).

Traço	Resistência à compressão simples (MPa)											
	7 dias		14 dias		28 dias		56 dias					
Tref	3,69	(±0,18)	Ab	4,32	(±0,30)	Ab	4,22	(±0,53)	Ab	6,56	(±0,75)	Aa
Tmín	2,17	(±0,19)	Bd	2,55	(±0,25)	Bc	3,29	(±0,17)	Bb	3,83	(±0,37)	Ba
Tméd	1,4	(±0,09)	Cc	2,45	(±0,16)	Bb	3,38	(±0,21)	Ba	2,43	(±0,34)	Cb
Tmáx	0,91	(±0,07)	Dc	1,64	(±0,20)	Cb	1,99	(±0,29)	Ca	1,99	(±0,14)	Ca

Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)											
	7 dias		14 dias		28 dias		56 dias					
Tref	1,15	(±0,06)	Aa	1,17	(±0,07)	Aa	1,26	(±0,09)	Aa	1,60	(±0,12)	Aa
Tmín	0,59	(±0,07)	Ba	0,72	(±0,14)	Ba	0,86	(±0,18)	Ba	0,74	(±0,10)	Ba
Tméd	0,33	(±0,04)	Cb	0,56	(±0,03)	Ba	0,77	(±0,13)	Ba	0,65	(±0,08)	Ba
Tmáx	0,26	(±0,03)	Cc	0,38	(±0,05)	Cb	0,46	(±0,07)	Ca	0,54	(±0,03)	Ba

As letras maiúsculas mostram a comparação entre os traços (linhas) e as letras minúsculas a comparação entre as idades (colunas).

Fonte: Autoria própria.

As letras maiúsculas, Tabela 4.7, mostram a comparação entre os traços Tref, Tmín, Tméd e Tmáx (linhas), e as letras minúsculas, a comparação entre as idades 7, 14, 28 e 56 dias (colunas), separando os traços produzidos em grupos com comportamentos estatisticamente semelhantes, avaliados por meio da análise múltipla de médias utilizando o método Scott-Knott (SK). Estatisticamente, nota-se na Tabela 4.7 que o desempenho à compressão simples aos 56 dias da argamassa Tref, sem substituição do cimento pelos *blends* de cinzas de biomassa, foi superior (grupo A), em seguida Tmín apresentou o melhor desempenho (grupo B) entre os traços com os *blends* de cinzas de biomassa, e por fim Tméd e Tmáx apresentaram comportamentos equivalentes (grupo C). No entanto, quanto ao desempenho mecânico da tração na flexão, aos 56 dias, todos os traços com *blends* de cinzas de biomassa (Tmín, Tméd e Tmáx) apresentaram semelhança estatística (grupo B).

Ainda na Tabela 4.7, verifica-se que o desempenho à compressão simples para Tref aumentou gradativamente com o tempo de cura, estatisticamente a resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias estão no mesmo patamar (grupo b) e apenas aos 56 dias ocorreu uma melhora significativa no desempenho da argamassa Tref (grupo a). Observa-se que os valores da resistência à compressão simples para T_{mín}, Tabela 4.7, convergiram de modo crescente, do menor desempenho (grupo d) aos 7 dias, para 14 dias (grupo c), 28 dias (grupo b), obtendo o melhor desempenho aos 56 dias de cura, com resistência à compressão simples de 3,83 MPa (grupo a), demonstrando que o tempo de cura é muito importante para o ganho de resistência. Nota-se que T_{méd} obteve seu melhor desempenho mecânico à compressão aos 28 dias com 3,38 MPa (grupo a), porém ocorreu redução do patamar aos 56 dias de cura para 2,42 MPa (grupo b). Enquanto T_{máx}, tanto para 28 dias quanto para 56 dias apresentaram o melhor desempenho mecânico quanto a resistência à compressão simples (grupo a). No entanto, para o desempenho da tração na flexão, a partir dos 28 dias todos os traços, Tref, T_{mín}, T_{méd} e T_{máx}, em sua respectiva idade de cura, encontram-se com seus melhores desempenhos (grupo a).

Diante dos resultados apontados para o traço T_{méd}, e escolhido como ideal entre as argamassas modificadas com inserção de cinzas de biomassas, no Quadro 4.2 está apresentada a síntese de suas características obtidas nos Estudos 1, 2 e 3.

Quadro 4. 2 - Síntese das características do traço ideal da argamassa modificada T_{méd}.

Blend Cméd 15,65% CCA + 6,35% CBCA + 4,75% CCE		Pasta Cméd							
Finura (%)	53,5	Quantidade de água (%)		72					
Perda ao fogo (%)	33,3	Início de pega (min)		113					
Teor de umidade (%)	2,7	Fim de pega (min)		195					
Massa específica (g/cm ³)	1,91	Intervalo de pega (min)		82					
Densidade de partículas (g/cm ³)	1,53								
Índice de atividade pozolânica (mg de Ca(OH) ₂ / g da amostra)	534,20								
Argamassa T _{méd}									
Traço em massa (kg)	cimento	blend	cal	Areia	água	a/c	a/ms	Classificação conforme o requisito estudado	
	0,732	0,268	0,66	7,67	1,69	2,33	0,18	NBR 13281 (ABNT, 2005)	NBR 13281 (ABNT, 2023)
Resistência à compressão simples	(dias)	7	14	28	56	P2	AAV	AAF	
	(MPa)	1,4	2,45	3,38	2,43				
Resistência à tração na flexão	(dias)	7	14	28	56	R1	R2		
	(MPa)	0,33	0,56	0,77	0,65				
Coeficiente de capilaridade (g/dm ² . min ^{1/2})							3,2	C3	-

Fonte: Autoria própria.

4.4 Estudo 4 – Desempenho da Argamassa Modificada por Tempo de Estocagem

Os resultados das caracterizações no estado fresco e no estado endurecido da produção das argamassas Tméd e Tref, estão apresentados nos subitens a seguir.

4.4.1 Avaliação das propriedades no estado fresco

As argamassas foram avaliadas no estado fresco pelo método do espalhamento na mesa (*flow table*), NBR 13276 (ABNT, 2016b), e os valores obtidos com a dosagem inicial (dosagem padrão), relação água/materiais secos (a/ms) para Tméd e Tref, foram 0,24 e 0,20, respectivamente. O ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa está representado na Figura 4.9.

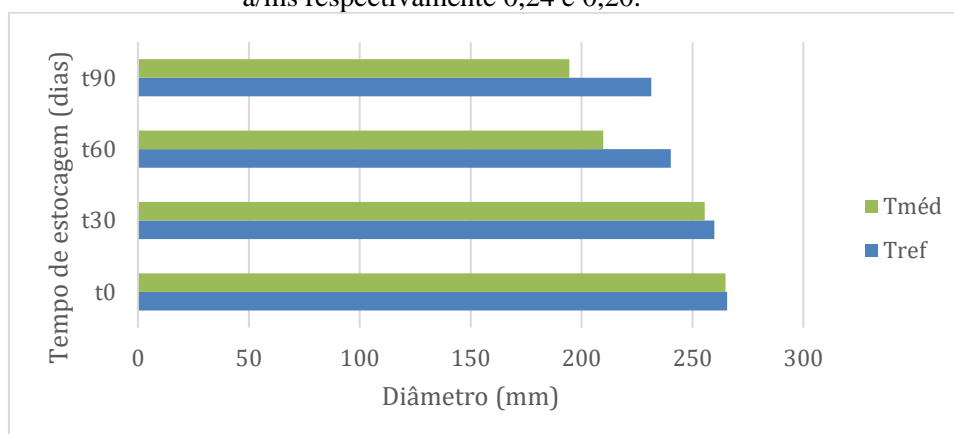
Figura 4. 9 - Ensaio de consistência pelo espalhamento na mesa: antes do ensaio (a), após ensaio (b) e medição (c).



Fonte: Autoria própria.

Logo, para a mesma dosagem padrão, a/ms de 0,24 para Tméd e de 0,20 para Tref, definida inicialmente em t0 e replicada para t30, t60 e t90 dias, resultados apresentados na Figura 4.10, foi possível verificar a redução da trabalhabilidade das mesmas no ensaio de consistência (*flow table*), para Tméd e Tref. Entretanto, até os 30 dias de estocagem, tanto Tméd quanto Tref mantiveram boa trabalhabilidade, acima de 256 mm.

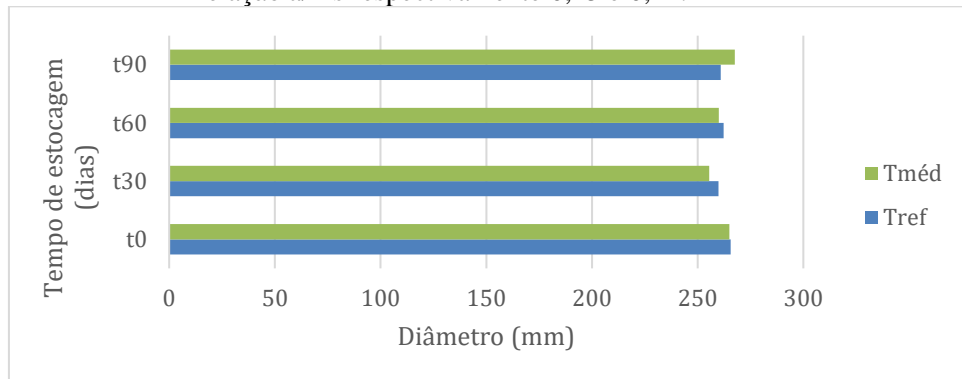
Figura 4. 10 - Dosagem padrão: resultados obtidos no ensaio *flow table*, para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,24 e 0,20.



Fonte: Autoria própria (2023).

Para a nova dosagem realizada, chamada de adequação da dosagem, a relação água/materiais secos (a/ms) para Tméd e Tref, são respectivamente de 0,25 e 0,21. Os resultados podem ser observados na Figura 4.11.

Figura 4. 11 - Adequação da dosagem: Resultados obtidos no ensaio *flow table*, para Tméd e Tref, relação a/ms respectivamente 0,25 e 0,21.

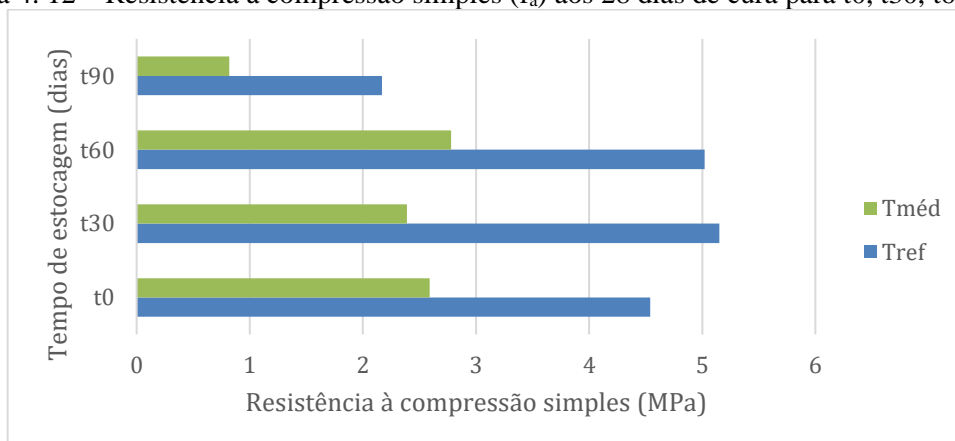


Fonte: Autoria própria (2023).

4.4.2 Avaliação das propriedades no estado endurecido

Na Figura 4.12 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de compressão simples aos 28 dias de cura das argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias. Nota-se uma redução considerável da resistência à compressão (f_a) aos 90 dias, tanto para Tméd, quanto para Tref.

Figura 4. 12 – Resistência à compressão simples (f_a) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.



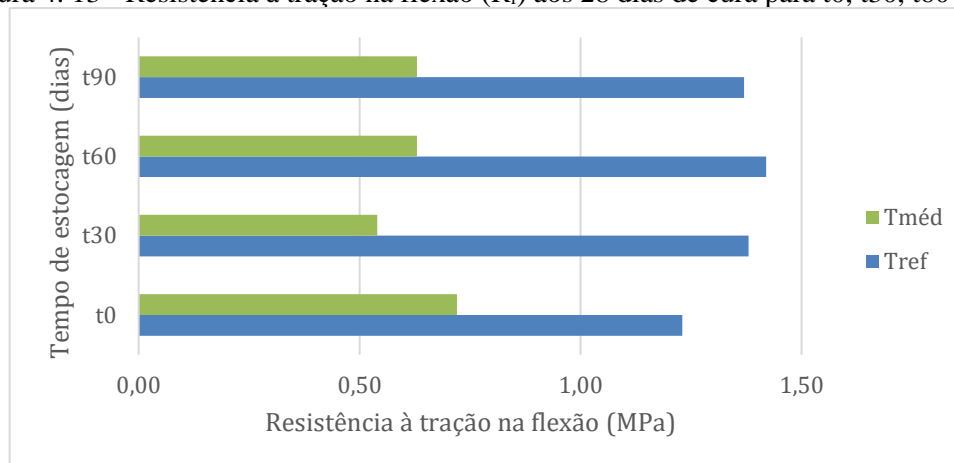
Fonte: Autoria própria.

Entretanto, até os 60 dias, essas argamassas se enquadram em argamassas de assentamento e fixação para as unidades de alvenaria. Logo, para o requisito, segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023), a argamassa Tref pode ser classificada como argamassa AAE (argamassa para assentamento de unidades

de alvenaria estrutural, $f_a \geq 5,0$ MPa), enquanto Tméd pode ser classificada em AAV (argamassa para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, apenas vedação, $2,0 \leq f_a < 5,0$ MPa) ou AAF (apenas para fixação horizontal da alvenaria, encunhamento, $1,5 \leq f_a < 5,0$ MPa) até o tempo de estocagem de 60 dias.

Na Figura 4.13 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão das argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem.

Figura 4. 13 - Resistência à tração na flexão (R_f) aos 28 dias de cura para t0, t30, t60 e t90.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados apresentados na Figura 4.13 foram obtidos do ensaio de tração na flexão aos 28 dias de cura das argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias. Observa-se que em todos os tempos de estocagem as argamassas atingiram a classificação R2 ($0,5 \leq R_f < 1,5$ MPa), e podem ser designadas, requisito informativo, em argamassas para revestimento de tetos e paredes, segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023).

Os resultados para a umidade dos cp's ensaiados em t90 dias de estocagem para as argamassas Tméd e Tref, aos 28 dias de cura, foram respectivamente, 7,08% e 5,49%. Esses valores vão ao encontro dos resultados obtidos nos ensaios de compressão simples e tração na flexão, uma vez que, maior o teor de umidade do cp menor foi a resistência obtida para Tméd.

A variação dimensional, é requisito classificatório para as argamassas de revestimento de paredes e tetos (ARV-I, ARV-II, ARV-III e AET), o requisito também é aplicado na classificação de argamassas para assentamento (AAV e AAE) e fixação (AAF), segundo a NBR 13281 (ABNT, 2023). Assim, analisando os resultados obtidos para o ensaio de retração ou expansão linear (ϵ_i) apresentados no Quadro 4.3, as argamassas Tméd e Tref ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, podem ser classificadas tanto em VD4 (retração entre 0 e 0,70) para argamassas de revestimento de paredes e tetos, segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), quanto em argamassas para assentamento e fixação (retração menor ou igual a 0,80), segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Ainda, no Quadro 4.3, está apresentado o resultado para a variação de massa (Δ_i) dos cp's utilizados no ensaio de retração. Nota-se que os cp's moldados com as argamassas Tméd e Tref

estocadas por 90 dias e ensaiados conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005b), apresentaram maiores retrações e perda de massa concomitantemente, mas ainda assim permaneceram dentro da classificação VD4, AAV, AAE e AAF.

Quadro 4.3 - Resultados obtidos para a variação dimensional (ϵ_i) e variação de massa (Δ_{28}).

Traço	Idade de cura dos cp's (i = 28 dias)							
	ϵ_{28} (mm/m)				Δ_{28} (%)			
	Tempo de estocagem (dias)				Tempo de estocagem (dias)			
	t0	t30	t60	t90	t0	t30	t60	t90
Tref	-0,20	-0,21	-0,27	-0,46	-2,05	-2,08	-2,30	-2,90
Tméd	-0,17	-0,17	-0,19	-0,44	-2,14	-2,23	-2,43	-3,94

Fonte: Autoria própria.

Os resultados para a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a) no tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, utilizando o método de ensaio prescrito pela NBR 13528-2 (ABNT, 2019) estão apresentados no Quadro 4.4. Nota-se que até os 30 dias para a estocagem (t30) a argamassa Tméd e Tref atingiram o melhor desempenho, com 0,18 MPa para Tméd e 0,20 MPa para Tref. No entanto, apenas Tref alcançou o requisito mínimo ($R_a \geq 0,20$ MPa) para ser classificadas na classe RA1 como argamassa de revestimentos interno de paredes e tetos destinados à aplicação de pintura e/ou textura (ARV-I, ARV-II e ARV-III), segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), ou em argamassas para assentamento (AAV e AAE) e fixação (AAF) segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Quadro 4.4 - Resultados obtidos no ensaio de arrancamento.

Resistência potencial de aderência à tração ao substrato - R_a (MPa)				
TRAÇO	Tempo de estocagem (dias)			
	t0	t30	t60	t90
Tref	0,25	0,24	0,10	0,02
Tméd	0,10	0,18	0,04	0,03

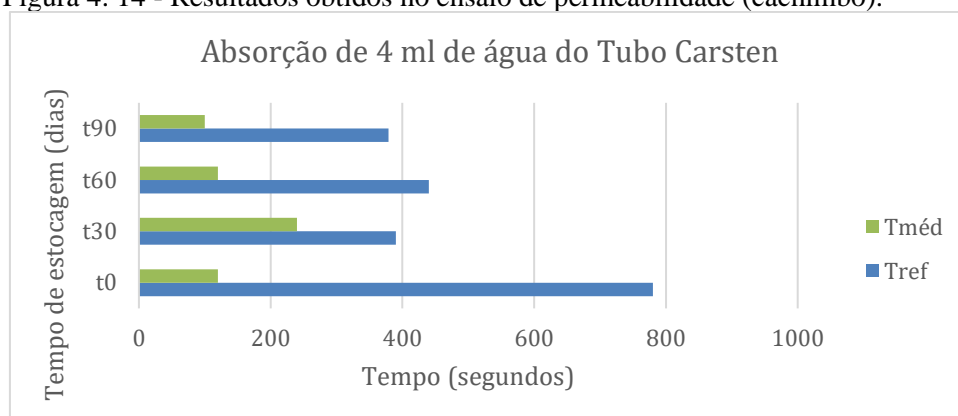
Fonte: Autoria própria.

Ainda, é importante salientar que apesar do principal aspecto estudado no ensaio de arrancamento ser o valor obtido da resistência de aderência (R_a), a análise do tipo de ruptura também é um fator importante, os valores são menos preocupantes, apenas nos casos em que forem muito baixos (CARASEK, 2010). Logo, foram registrados o tipo de ruptura de cada cp, conforme prescrito pela NBR 13528-2 (ABNT, 2019), os resultados contabilizados, em sua totalidade, ocorreram na interface argamassa/substrato (ruptura Tipo B).

Os resultados da permeabilidade para as argamassas Tméd e Tref nos tempos de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias, estão apresentados na Figura 4.14.

Através dos resultados da Figura 4.14 é possível observar que aos 28 dias de cura Tméd apresentou sua melhor estanqueidade no tempo de estocagem 30 dias (t30), e os demais resultados foram similares para t0, t60 e t90 dias. As cinzas de biomassa presentes no traço da argamassa Tméd a partir da composição do *blend* Cméd, Estudo 1, por terem apresentado em sua composição partículas mais grossas que o cimento Portland, podem justificar o comportamento mais poroso da matriz cimentícia em Tméd, comparados aos resultados de Tref.

Figura 4. 14 - Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade (cachimbo).



Fonte: Autoria própria.

4.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

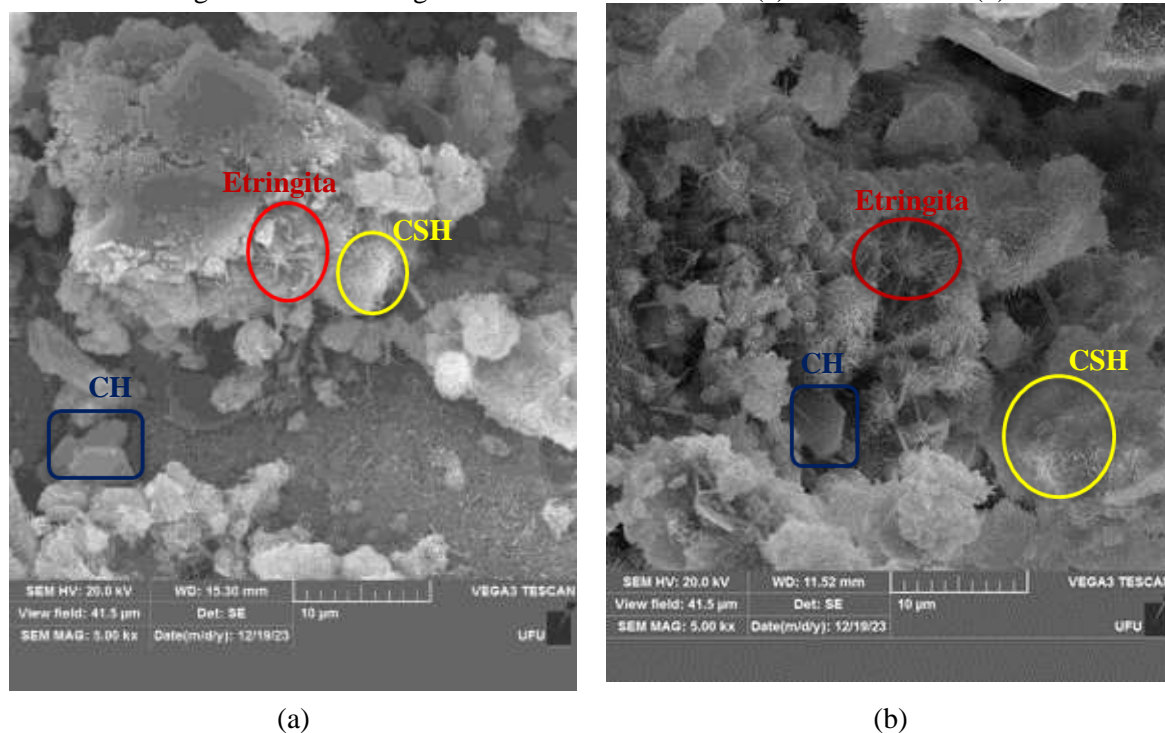
Os resultados das análises realizadas na microestrutura das argamassas Tref e Tméd, estão representadas na Figura 4.15a e na Figura 4.15b, respectivamente, contendo a avaliação microestrutural com aproximação de 5000x, aos 56 dias de cura das argamassas dosadas aos 90 dias (t90), referente ao último lote em estudo para o tempo de estocagem.

Estão indicados na Figura 4.15 alguns produtos de hidratação nos poros das matrizes das argamassas Tref e Tméd, sendo eles o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), o CH (hidróxido de cálcio, conhecido como portlandita), e a etringita (o trissulfoaluminato de cálcio, $C_6A\bar{S}_3H_{32}$). O C-S-H apresenta-se com estruturas pequenas e fibrilares pouco cristalinas e até mesmo redes reticulares (PONTES, 2019). O CH apresenta grandes cristais com morfologia prismática hexagonal (CASCUDO *et al.* 2018). E a etringita com cristais de morfologia prismática aciculares (agulhas) (ZHANG *et al.* 2020).

Verifica-se que a argamassa modificada (Tméd) por ter em sua composição as cinzas de biomassa com estrutura mesoporosa, promovem a absorção da água e liberação continuamente ao sistema para as reações de hidratação, que por serem reações lentas contribuem para promover a cicatrização dos poros, uma vez que a alta quantidade desses aglutinantes permanecem não hidratados, mesmo em maiores idades. Além disso, as pozolanas tendem a diminuir o CH na composição da pasta cimentícia (FERRARA *et al.*, 2016; AMIN *et al.*, 2019).

Essas reações pozolânicas apresentam tanto importância química, com a formação do gel de C-S-H secundário, como importância física, pois este produto preenche os poros maiores, favorecendo assim à durabilidade e à resistência mecânica (DAL MOLIN, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 4. 15 – Micrografia via MEV: Tref-5000x (a) e Tméd-5000x (b).



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise química semiquantitativa por meio da Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) para as amostras Tref e Tméd, estão apresentadas na Tabela 4.8, com os elementos constituintes das amostras Tref e Tméd, e os seus valores encontrados estão expressos em porcentagem de massa.

Tabela 4. 8 - Composição química semiquantitativa das argamassas Tref e Tméd (% em massa) via EDS/MEV.

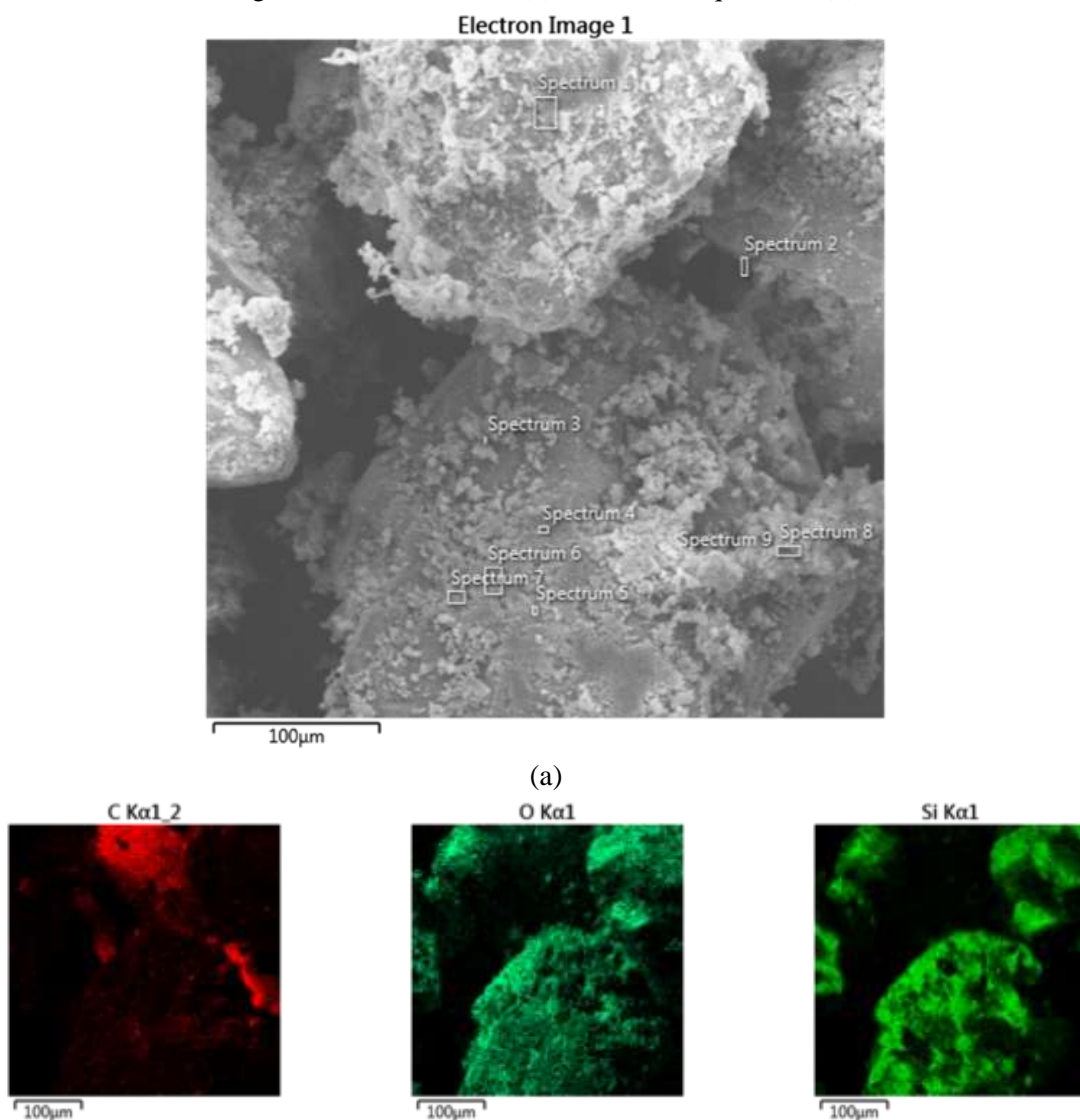
Elemento	Argamassa Tref (%)	Argamassa Tméd (%)
C	32,16	7,65
O	44,03	53,97
Mg	0,33	0,71
Al	0,68	2,20
Si	13,15	10,24
S	0,28	0,70
K	0,00	0,38
Ca	8,70	21,87
Fe	0,39	1,75
Cu	0,10	0,00
Yb	0,18	0,54

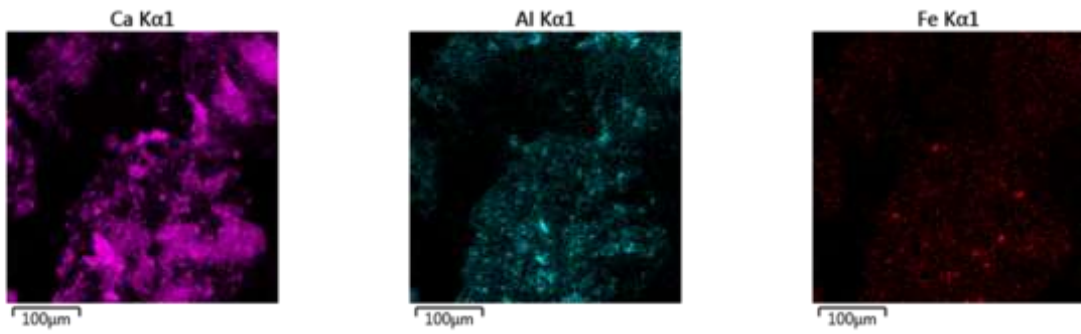
Fonte: Autoria própria.

Quando comparadas as composições químicas de Tméd com Tref, nota-se uma baixa concentração para o elemento C, e uma maior concentração do elemento Ca. O elemento O mostra-se como a maior porcentagem em ambas, e as porcentagens do elemento Si são semelhantes nas duas amostras.

Estão apresentadas nas Figuras 4.16a e 4.17a as amostras das argamassas Tref e Tméd, respectivamente, com aproximação de 500x, apresentando na sequência as Figuras 4.16b e 4.17b o mapeamento de elementos químicos na amostra, cada imagem com cor específica representa um elemento presente na referida argamassa.

Figura 4. 16 - Tref-500x (a) e elementos químicos (b).

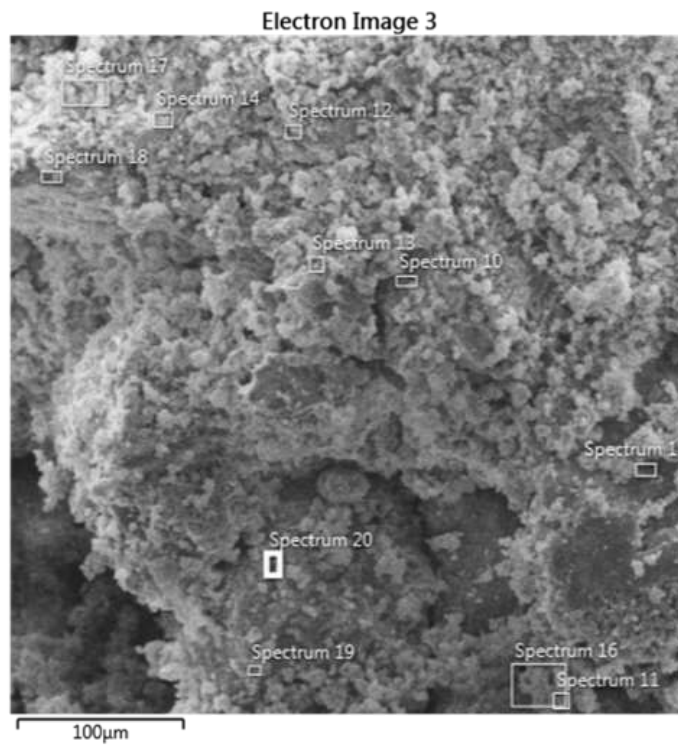




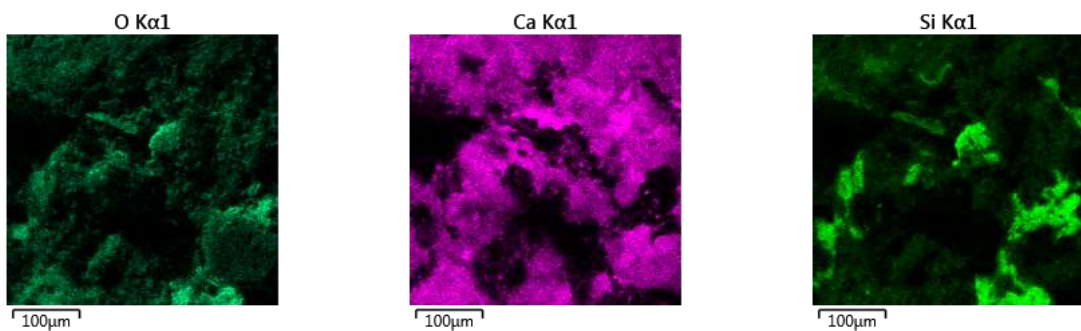
(b)

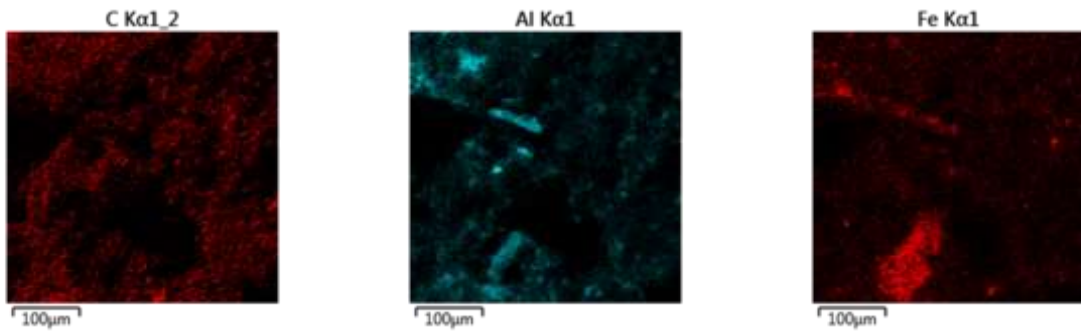
Fonte: Autoria própria.

Figura 4. 17 - Tméd-500x (a) e elementos químicos (b).



(a)





(b)
Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível afirmar que, fisicamente as cinzas e *blends* de biomassa não atenderam às características para efeito fíler como adições minerais inertes. Entretanto, notou-se efeito sinérgico entre a CBCA e a CCA no *blend* Cmín, culminando no maior índice de atividade pozolânica *Chapelle* ($I_{Ca(OH)_2}$). Já o *blend* Cmáx, com o maior teor de cinzas em sua composição, não apresentou perfil pozolânico. Enquanto, o Cméd mostrou-se como o melhor *blend* para o desenvolvimento de um material cimentício, por apresentar-se como maior porcentagem em substituição ao cimento dentro das faixas de otimização do traço de argamassas de assentamento e revestimento com adições de CCA, CBCA e CCE.

Para as pastas cimentícias observou-se que ocorreu uma ampliação no intervalo do tempo de pega para todas as pastas com os *blends* de cinzas de biomassa, comparadas à pasta referência. As pastas cimentícias utilizando Cméd e Cmáx, os mesmos *blends* utilizados nas argamassas modificadas com cinzas de biomassa, Tméd e Tmáx, respectivamente, necessitaram de uma quantidade maior de água para obtenção das pastas de consistência normal.

Entre as argamassas modificadas com cinzas de biomassa Tmín, Tméd e Tmáx utilizando respectivamente os *blends* de cinzas de biomassa Cmín, Cméd e Cmáx, notou-se quanto a absorção por capilaridade, a melhor classificação como argamassa de assentamento e revestimento, o Tméd. Porém, necessita-se de um estudo mais aprofundado caso este traço seja empregado como argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas, uma vez que, ao considerar os requisitos mínimos prescritos pela normativa NBR 14081-1 (ABNT, 2012a), o valor máximo de absorção por capilaridade não deve exceder 0,5 kg/m², enquanto a argamassa modificada Tméd atingiu 2,2 kg/m².

A utilização da argamassa modificada com cinzas de biomassa, Tméd, foi avaliada ao longo do tempo de estocagem t0, t30, t60 e t90 dias em condições que se aproximam ao padrão de argamassas industrializadas, com seus materiais secos pré-dosados. Observou-se que no estado fresco a argamassa Tméd manteve uma boa trabalhabilidade, com índice de consistência de massa acima de 256 mm, até a dosagem realizada aos 30 dias de estocagem (t30). No estado endurecido, para a resistência à compressão simples (f_a), aos 28 dias de cura, Tméd apresentou f_a variando entre 2,0 a 5,0 MPa, até os 60 dias de estocagem (t60), após esse tempo houve queda considerável na resistência, mas ainda assim podem ser classificadas em AAV (argamassa para assentamento de unidades de alvenaria sem função estrutural, vedação), ou AAF (argamassas apenas para fixação horizontal da alvenaria, encunhamento). Diferentemente, a resistência à flexão (R_f) apresentou em todas as idades de estocagem a classificação R2 para argamassas de revestimento de paredes e tetos, com R_f variando entre 0,5 a 1,5 MPa.

Ainda, no estado endurecido, a retração linear (ϵ_i) aos 28 dias de cura aumentou concomitantemente ao tempo de estocagem do material, mesmo assim manteve-se dentro dos requisitos classificatórios para as argamassas de assentamento e revestimento. No entanto, a resistência potencial de aderência à tração ao substrato (R_a), atingiu a classificação mínima para argamassa de revestimentos interno de paredes e tetos destinados à aplicação de pintura e/ou textura ou em argamassas para

assentamento e fixação segundo a NBR 13281-2 (ABNT, 2023), apenas até o tempo de estocagem aos 30 dias (t_{30}).

Para utilização dessa argamassa modificada como argamassa colante industrializada para aplicação de revestimentos de placas cerâmicas faz-se necessário um estudo mais aprofundado, uma vez que, apesar dos valores obtidos para resistência à compressão de $T_{méd}$, até os 90 dias apresentar-se dentro dos valores mínimos para utilização como argamassa colante industrializada para revestimento de placas cerâmicas (0,5 MPa para áreas internas e 1,0 MPa para áreas externas), prescritos pela NBR 14081 (ABNT, 2012), no que tange a resistência à tração na flexão, a argamassa $T_{méd}$ não atingiu o mínimo requerido (1,0 MPa para áreas internas e 1,5 MPa para áreas externas). De modo similar, apesar da variação dimensional aos 28 dias de cura não ultrapassar em nenhum dos tempos de estocagem o valor da retração (áreas internas 0,5 mm/m e áreas externas de 1,0 mm/m), a argamassa modificada não atingiu o valor mínimo para seu uso como argamassa colante no quesito resistência potencial de aderência à tração ao substrato em áreas internas ou externas de 0,3 MPa. Esses valores são importantes para garantir que a argamassa colante tenha a resistência necessária para suportar as cargas e as solicitações mecânicas as quais será submetida durante a vida útil do revestimento cerâmico, evitando problemas como o descolamento das peças.

Por tudo isso, a argamassa modificada com o traço $T_{méd}$ substituindo 26,75% a massa do cimento Portland por cinzas de biomassa (15,65%CCA + 6,35%CBCA + 4,75%CCE), tem sua utilização até os 60 dias de estocagem de seus materiais pré-dosados para uso em dosagens de argamassas de assentamento e revestimento, sem comprometimento do desempenho físico e mecânico. Por fim, sugere-se para futuros trabalhos:

- Adequar a dosagem a/ms de 0,25, proposta nesta pesquisa, para a produção dos cp's e análise do desempenho ao longo do tempo de estocagem;
- Realizar os ensaios para determinação das características físicas e mecânicas da argamassa modificada com cinzas de biomassa no estado endurecido para as idades mais avançadas de cura;
- Determinar a influência do tempo de estocagem nas propriedades da argamassa modificada utilizando exclusivamente a cinza da casca de arroz;
- Analisar o desempenho da argamassa modificada com cinzas de biomassa para utilização como argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas;
- Aplicar a metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para comparar o desempenho ambiental do traço da argamassa modificada com cinzas de biomassa com as argamassas tradicionais;
- Verificar os impactos para 1m² de parede de alvenaria utilizando a argamassa modificada com cinzas de biomassa como metodologia para aplicação do conceito sustentabilidade, possibilitando a designação de produto ecoeficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIZADEH, R. A. **Nanostructure and Engineering properties of basic and modified calcium-silicate-hydrate systems**, 250, 2009. Ottawa, Ont, Department of Civil Engineering, University of Ottawa. 2009. <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-13206>
- ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- APRIANTI, E. *et al.* Introducing an effective curing method for mortar containing high volume cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 365-377, 2016. ISSN: 0950-0618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.100>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015a.
- _____. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 11172**: Aglomerantes de origem mineral - Terminologia. Rio de Janeiro, 1990.
- _____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos, versão corrigida. Rio de Janeiro, 2015b.
- _____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005b.
- _____. **NBR 13281**: Argamassas inorgânicas - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR 14081-1**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012a.
- _____. **NBR 14081-3**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 3: Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 2012b.
- _____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005d.
- _____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45m. Rio de Janeiro, 2010a.
- _____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010b.
- _____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

- _____. **NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018a.
- _____. **NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018b.
- _____. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018c.
- _____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022a.
- _____. **NBR 17051**: Determinação pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2022b.
- ATAIE, F. F.; RIDING, K. A. Influence of agricultural residue ash on early cement hydration and chemical admixtures adsorption. **Construction and Building Materials**, v.106, p. 274-281, 2016. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.091>.
- BARBOSA, T. G.; ALMEIDA, M. M. O. G. **Construção sustentável: contributo as ferramentas de avaliação**. Curitiba: CRV, 2016.
- BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. (Editor). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, 2011. Cap 6, p. 185-231.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- BEAUDOIN, J.; ODLER, I. Hydration, setting and hardening of portland cement. In: PETER, C. H.; LISKA, M. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 5. ed. London: Elsevier, 2019. Cap. 5, p. 157-250.
- BEZERRA, A. C. S. *et al.* Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane on the properties of mortars. **Revista Matéria**, v.22, n.1, 2017. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0117>
- BEZERRA, I. M. T. *et al.* Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011. ISSN 1807-1929. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600015>
- BEZERRA, I. M. T. *et al.* Coating mortar using rice husk ash as binding. **Materials Science Forum**, Trans Tech Publications, v. 727-728, p. 1502-1507, 2012.
- BONFIM, W. B. **Otimização do teor de incorporação de cinzas de biomassa para produção de argamassas**. Orientador: Heber Martins de Paula. 2019. 110f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Catalão - GO, 2019.
- BONFIM, W. B.; PAULA, H.M. Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 291, p.125869, 2021. ISSN: 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021>
- BORJA, E. V. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Construção Sustentável. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidadessustentaveis/urbanismosustentavel/constru%C3%A7%C3%A3osus tent%C3%A1vel>>. Acesso em: 17 ago.2021.
- CABRAL, S. C.; BARBOSA, F. A.; PINTO, E. L. Análise comparativa de resistência à compressão uniaxial de traço de argamassa autoadensável e concreto celular espumoso com incorporação de sílica ativa ou cinza de madeira de eucalipto. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE

- MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, IV, 2022, Salvador. **Anais eletrônicos** [...] Feira de Santana: ABMTENC, 2022. p. 384-397. ISBN: 978-65-00-55912-5. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1_2JsuXiKwPpGW9AG35aFz6SmWk6BFtE/view.
- CAMPOS, M. O. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- CAMPOS, P. A.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Ação conjugada da sílica de casca de arroz e hidróxido de cálcio em compósitos de cimento Portland: porosidade, compostos hidratados, reserva alcalina e resistência a compressão. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, 2022. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0018>.
- CANOVA, J. A.; MIOTTO, J. L.; MORI, L. M. D. Avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Ciência e Engenharia**, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, v. 24, n. 1, p. 125-134, 2015. <http://dx.doi.org/10.14393/19834071.2015.27888>
- CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- CARASEK, H. *et al.* Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**. v. 21, n.3, p. 714-732. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0068>
- CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. In: [S.l.]: IBRACON, 2017. cap. 28, p. 1–37.
- CARASEK, H., CASCUDO, O., SCARTEZINI, L.M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV, Brasília, 2001. **Anais...** Brasília, UnB, ANTAC, 2001.
- CARDARELLI, F. Cements, concrete, building stones, and construction materials. In: CARDARELLI, F. **Materials Handbook**. 3. ed. Montréal: Springer, 2018. Cap. 15, p. 1421-1439.
- CARRASCO, B. *et al.* An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. **Fuel**, v. 118, p. 272–280, 2014. ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.077>.
- CASCUDO, O. *et al.* Contribuição à caracterização nanoestrutural de pastas de cimento por meio da técnica de microscopia de força atômica. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762018000100408. Acesso em: 22 out. 2020.
- CASTRO, M. F. *et al.* Incorporação de cinza de casca de arroz para preparação de argamassas de assentamento e revestimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVIII, 2020, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...] Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. ISBN: 978-65-00-13688-3. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/issue/view/16>
- CHOWDHURY; MISHRA; SUGANYA. The incorporation of wood waste ash as a partial cement replacement material for making structural grade concrete: an overview. **Ain Shams Engineering Journal**, v.6, n.2 p. 429-437, 2015. ISSN 2090-4479. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2014.11.005>.
- CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolanas. In: ISAIA, G. C. (Editor). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, 2011. Cap 11, p. 381-413.
- CINCOTTO, M. A. **Tecnologia de Edificações: utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. São Paulo: PINI / IPT, 1988.

- CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**. v. 97, 41-49, 2017.
- CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 488 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (ed). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, IBRACON, 2011, pp.261-309.
- DEGEN, M. K. *et al.* Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, VI, 2019, Belém. **Anais eletrônicos** [...] Belém: ENARC, 2019. p. 340-356. ISSN 2175-1870. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1LogcpPckZWJ7mRUqXl_T60pX6kQqFjJ/view
- FARINHA, C. B. *et al.* Wastes as Aggregates, Binders or Additions in Mortars: Selecting Their Role Based on Characterization. **Materials**, v. 11, n. 3, p. 453, 2018. ISSN: 1996-1944. <https://doi.org/10.3390/ma11030453>.
- FERNANDES G. R. *et al.* Multi-Scale Modelling for Bending Analysis of Heterogeneous Plates by Coupling BEM AND FEM. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 51, p.1-13, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2014.10.005>
- FERREIRA, E. G. A. *et al.* 10000 years cement: can hydrated cement last as much as long-lived radionuclides? **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 103, p. 339–352, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.016>
- FRANÇA, D. F. S. *et al.* Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 153-166, 2016. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300098>
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**. v. 29, n. 6, 515-524. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- GESTA, L. S. F.; SANTOS, C. Q. S.; SOUZA, P. S. L. Permeabilidade e microscopia de concretos com resíduos de corte de mármore e granito como *filler*. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL – ENARC, VI, 2019. **Anais eletrônicos** [...] Belém: ENARC, 2019. p. 616-628. ISSN 2175-1870.
- GIVI, A. N. *et al.* Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: A review. **Journal of American Science**, v. 6, n. 3, 2010. ISSN: 1545-1003.
- GONÇALVES, C. F.; SOARES, A. F.; PAULA, H. M. Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar. **Revista ALCONPAT**, v. 11, n. 2, p. 1-16, 2021. ISSN 2007-6835. <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.484>
- GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000.135f. Dissertação (mestre em engenharia civil).
- GUEDERT, L. O. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da cinza da casca de arroz como material pozolânico**. 1989. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.
- HODUL, J.; ŽIŽKOVÁ, N.; BORG, R. P. The influence of crystalline admixtures on the properties and microstructure of mortar containing by-products. **Buildings**, v. 10, 146, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings10090146>
- HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chappelle modificado. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, 2017. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170003.0206>.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censos Demográficos**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2021.
- INTERCEMENT CEZARINA. Boletim de ensaios de cimento. s.l., 2022. 1 p.
- ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 2. São Paulo: Editora IBRACON, 2011.
- ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: Editora IBRACON, 2010.
- JAMIL, M. N. N. *et al.* Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**. v.128, p.185-198, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.029>.
- KAZMI, S. M. S. *et al.* Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 231-240, 2017. ISSN: 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025>
- KIELING, A. *et al.* Influência da adição de cinza de casca de arroz na aderência de argamassas de revestimento. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, UNISINOS - Universidade do Vale do Rio Dos Sinos, v. 5, n. 2, p. 157-170, 2009.
- KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, n. 61, p. 270-277, abr. 2014. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.022>
- LAGUNA, L. A.; IKEMATSU, P. A influência da temperatura na desforma do concreto. **Revista Técnica**, São Paulo, v.150, 2011.
- LIMA, C. J. F. *et al.* Durability, life cycle cost and life cycle assessment of binary mixtures with fly ash, rice husk ash and concrete demolition waste. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 161-166, 2022. ISSN: 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212022000100585>.
- LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. Orientadora: Alessandra Lorenzetti de Castro. São Carlos, 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. 1989. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5)
- MALAGONI, M; SCARTEZINI, V. **Análise dos resultados de resistência de aderência em revestimentos de argamassas**. Orientadora: Helena Carasek. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia - GO, 2013.
- MARTIRENA, F.; MONZÓ, J. Vegetable ashes as supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**. v. 114, p. 57–64, 2017. ISSN 0008-8846. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.015>
- MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631, 1998.
- MATOS, W. E. C. *et al.* Utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. **Revista Matéria**. v. 26. n.4, Rio de Janeiro, 2021. ISSN 1517-7076. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322>
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.
- MENEZES, R. R. *et al.* Atividade pozzolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 795-801, 2009. ISSN 1807-1929.
- MODOLO, R. C. E. *et al.* Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 275–281, 2013. ISSN 0950-0618.
- MONTES-HERNANDEZ, G. *et al.* Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 161, n. 2-3, p. 1347-1354, 2009.
- MOODI, F.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; SAFAVIZADEH, A. S. Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins. **Scientia Iranica A**, v. 18, n. 4, p. 906-912, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.scient.2011.07.011>
- MORAES, C. A. M. *et al.* Life cycle analysis (lca) for the incorporation of rice husk ash in mortar coating. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1170-1176, 2010. ISSN 09213449. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.012>
- MORAES, J. C. B. *et al.* Increasing the sustainability of alkali-activated binders: The use of sugar cane straw ash (SCSA). **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 148-154, 2016. ISSN 0950-0618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.090>.
- MORAES, M. J. B. de. *et al.* Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 208, p. 369-380, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.007>
- MORAIS, B. B. *et al.* Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, p. 5–25, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenhariacivil/tipos-de-cimento>.
- MOURÃO, A. B.; PAULA, J. N. Utilização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça como substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, IV, 2022, Salvador. **Anais eletrônicos [...]** Feira de Santana: ABMTENC, 2022. p. 606-619. ISBN: 978-65-00-55912-5. Disponível em:
https://drive.google.com/file/d/1_2JsuXiKwPpGW9AG35aFz6SmWk6BFtE/view.
- NAQI, A.; JANG, J. G. Recent progress in green cement technology utilizing lowcarbon emission fuels and raw materials: a review. **Sustainability**, Switzerland, v. 11, n. 2, 2019.
<https://doi.org/10.3390/su11020537>
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NONAT, A. A Hidratação do Cimento. In: OLLIVIER, J.; VICHOT, A. **Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2014.
- PARIS, J. M. *et al.* A review of waste products utilized as supplements to portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1-18, 2016. ISSN 0959-6526.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>.
- PAULA, M. O. *et al.* Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial ao cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n. 3, 353-357. 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019>
- PAYÁ, J. *et al.* Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v.77, n.3, p. 321-325, 2002.
<https://doi.org/10.1002/jctb.549>.

- PEREIRA, R. R. **Planejamento experimental e otimização de processos na definição de traço de concreto com resíduos para produção de tijolos**. Dissertação (Mestrado) -Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Catalão, 2017.
- PET CIVIL - GRUPO DO PROGRAMA DE EDUCAÇÃO TUTORIAL DE ENGENHARIA CIVIL. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Disponível em: blogdopetcivil.com/2012/05/11/adicoes-minerais-ao-concreto-de-cimento-portland/
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1998.
- PINHEIRO, N. O. **Aplicação do método Scott-Knott em estudo de Brusone no trigo**. Departamento de Estatística da Universidade de Brasília UnB (Monografia), Brasília, 2017.
- PONTES, V. C. P. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Paraíba, João Pessoa, 2019.
- QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; COELHO, A. C. V.; CINCOTTO, M. A. Métodos de ensaio indiretos e método *Chapelle* direto para determinação do consumo de cal pelos materiais pozolânicos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2015.
- RAJAMMA, R. et al. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, n. 2, p. 1049–1060, 2009. ISSN 0304-3894
- RAMOS, T.; MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 343-351, 2013. ISSN 0950-0618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>.
- RAVERDY, M. *et al.* **Appreciation de i°activite pouzzolanique des constituants secondaires**. In: 7th International Congress Chemical Cement, v.3, p. 36-41, Paris, 1980. Paris: [s.n.], 1980.
- RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- RIBEIRO, J. P. *et al.* Characteristics of ash and particle emissions during bubbling fluidized bed combustion of three types of residual forest biomass. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10018-10029, 2017. ISSN 0944-1344, 1614-7499. <http://link.springer.com/10.1007/s11356-016-8099-6>.
- RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX - RILEM. Water absorption under low pressure. Pipe method. **Test No.11. 4**. Recommandations provisoires, Paris, 1987.
- ROSELLÓ, J. *et al.* Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. **Industrial Crops and Products**, v. 103, p. 39-50, 2017. ISSN 0926-6690. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>.
- SAMIEI, R. R. *et al.* Properties of cement–lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, Elsevier BV, v. 84, p. 84-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.042>
- SANTOS, A. C. D. **Investigação do efeito da incorporação de resíduos de PET em compósitos cimentícios**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Mecânica Universidade Federal de São João Del Rei, 2012. Disponível em: www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Anine_Detomi.pdf
- SCOTT, A. J; KNOTT, M. A. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, p. 507-512, 1974.
- SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A Practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Florida: Taylor & Francis, 2016.
- SILVA, D. O. F. **Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

- SILVA, E. J. **Utilização do método de condutividade elétrica para análise da pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.
- SILVA, V. S.; LIBÓRIO, J. B. L. Avaliação do efeito da sílica extraída da casca de arroz na aderência de argamassas e chapiscos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, V, 2003. p. 385-399, **Anais...**, São Paulo: [s.n.], 2003.
- SILVA, R. B. *et al.* Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 321-334, 2015. ISSN 1678-8621. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>
- SINGH, P. Waste handling in liquid absorbent-based post-combustion capture processes. In: Paul H. M. F. **Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide**. Australia: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 21, p. 505-517.
- SINGH, R. Understanding the role of hydration water and nano C-S-H colloids in concrete. In: LIEW, M. S. **Smart nanoconcretes and cement-based materials: properties, modelling and applications**. London: Elsevier, 2020. Cap. 6, p. 157-182.
- SOKOLOVICZ, B. C. **Microstructure and durability of a chloride prototypes with concrete gray rice husk with and without prior grind**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- TAVARES, J. C. **Potencialidade do uso da cinza da folha de bananeira como substituição parcial do cimento Portland em concretos**. Dissertação (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Orientadora (Luciana de Figueiredo Lopes Lucena) Natal, 2019.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.
- UKRAINCZYK, N.; VRBOS, N.; KOENDERS, E. A. B. Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 30, n. 2, p. 13–148, 2016. <http://dx.doi.org/10.15255/CABEQ.2015.2231>.
- VASSILEV, S. V. *et al.* An Overview of the Chemical Composition of Biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010.
- VASSILEV, S. V. *et al.* An Overview of the Composition and Application of Biomass Ash: part 1, phase–mineral and chemical composition and classification. **Fuel**, v. 105, p. 40-76, 2013.
- VAZ, F. H. B.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimento de argamassa – contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas do tema. **Cerâmica**. v.65, p. 303-318. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132019653742508>.
- VIANA J. H. M.; TEIXEIRA W. G.; DONAGEMMA G. K. Densidade de partículas – Método do balão volumétrico. In: TEIXEIRA C. P.; DONAGEMMA G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. cap. 8, p. 76-81, 2017.
- VOTORANTIM CIMENTOS. Boletim de análises da cal. s.l., 2022. 1 p.
- ZHANG, Y. *et al.* Effects of temperature on performances and hydration process of sulphoaluminate cement-based dual liquid grouting material and its mechanisms. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 139, n. 1, p. 47-56, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-019-08426-y#Fig10>