

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Aproveitamento de resíduos da indústria moveleira em materiais cimentícios:
sustentabilidade ambiental, mecanismos de hidratação e desempenho
tecnológico de pastas e argamassas**

Roziani Maria Gomes
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

ROZIANI MARIA GOMES

**Aproveitamento de resíduos da indústria moveleira em materiais cimentícios:
sustentabilidade ambiental, mecanismos de hidratação e desempenho
tecnológico de pastas e argamassas**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Jose M. Franco de Carvalho

Coorientadores: Antonio C. G. Tibirica
Jose C. Lopes Ribeiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

G633a
2025
Gomes, Roziani Maria, 1986-
Aproveitamento de resíduos da indústria moveleira em
materiais cimentícios: sustentabilidade ambiental, mecanismos
de hidratação e desempenho tecnológico de pastas e argamassas /
Roziani Maria Gomes. – Viçosa, MG, 2025.
1 tese eletrônica (119 f.): il. (algumas color.).

Orientador: José Maria Franco de Carvalho.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.
Referências bibliográficas: f. 102-119.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.497>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Argamassa. 2. Indústria de móveis - Eliminação de
resíduos. 3. Resíduos como material de construção. 4. Esgotos.
I. Carvalho, José Maria Franco de, 1979-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 691.5

ROZIANI MARIA GOMES

**Aproveitamento de resíduos da indústria moveleira em materiais cimentícios:
sustentabilidade ambiental, mecanismos de hidratação e desempenho
tecnológico de pastas e argamassas**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de abril de 2025.

Assentimento:

Roziani Maria Gomes
Autora

Jose Maria Franco de Carvalho
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 06/08/2025 às 11:15:04 e pelo orientador em 22/08/2025 às 14:49:18. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **PVFV.WJT6.QP36** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Deus, pela saúde e capacidade de vencer os desafios.

Ao meu orientador José Maria Franco de Carvalho, por todos os ensinamentos e apoio ao longo dessa trajetória.

Ao Professor Gustavo Henrique Nalon pelas contribuições fundamentais ao longo dessa pesquisa.

Aos meus coorientadores Antônio Cléber Gonçalves Tibiriçá e José Carlos Lopes Ribeiro pelas sugestões na redação dessa tese.

À indústria Itatiaia Móveis S/A pelo fornecimento dos materiais residuários.

À minha família, pelo apoio e incentivo de sempre.

Aos membros das banca pelas suas valiosas contribuições.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós - graduação.

Ao Grupo de Pesquisa em Construção Sustentável e Inovadora (SICon).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

GOMES, Roziani Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2025. **Aproveitamento de resíduos da indústria moveleira em materiais cimentícios: sustentabilidade ambiental, mecanismos de hidratação e desempenho tecnológico de pastas e argamassas.** Orientador: Jose Maria Franco de Carvalho. Coorientadores: Antonio Cleber Goncalves Tibirica e Jose Carlos Lopes Ribeiro.

Esse trabalho contribui de forma significativa para a ciência ao propor o aproveitamento de resíduos da indústria moveleira - cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE, na formulação de argamassas industrializadas, em substituição parcial do cimento com foco na sustentabilidade ambiental e na eficiência tecnológica. Os resultados obtidos são inéditos quanto à caracterização físico-química e microestrutural desses resíduos, seus efeitos na hidratação e desempenho mecânico das misturas cimentícias, bem como na otimização de traços ecoeficientes. A originalidade do estudo está na abordagem integrada de caracterização, desempenho e sustentabilidade, aplicando técnicas avançadas e inéditas de análise para este tipo de resíduo. A pesquisa preenche lacunas importantes na literatura e abre novas perspectivas para destinação sustentável de resíduos industriais em escala real. Dentre os desafios enfrentados pela humanidade para alcançar uma condição de desenvolvimento sustentável encontra-se a geração e gerenciamento dos resíduos resultantes da atividade humana, com destaque para a atividade industrial. Dentre estas, a indústria da construção se apresenta como uma das mais impactantes, dados os consumos exorbitantes de matéria-prima e energia, além da geração de resíduos e emissões de gases de efeito estufa. A indústria moveleira, embora processe predominantemente material derivado da madeira, considerado renovável e de baixo impacto, também enfrenta uma geração crescente de resíduos, que precisam ser gerenciados de forma eficiente para evitar danos ao ambiente e custos elevados. Nesse contexto, essa pesquisa pretende avaliar a incorporação de resíduos da indústria moveleira na obtenção de argamassas industrializadas para assentamento de alvenarias e revestimento de paredes e tetos, sendo a cinza de fundo de caldeira e o lodo da estação de tratamento de esgoto industrial. Para tanto, estudos de interação com cimento Portland para avaliação dos efeitos dos resíduos na cinética de hidratação e formação de microestrutura foram conduzidos, assim como efeitos na reologia e desempenho mecânico de pastas e argamassas. De posse das informações, aditivos e adições foram avaliados para melhoramento das propriedades tecnológicas de interesse e estudos de otimização em traços de argamassas mistas foram conduzidos. Ao final,

misturas ótimas foram selecionadas e validadas para a produção de argamassas industrializadas. Espera-se com essa pesquisa indicar a viabilidade técnica da incorporação dos resíduos escopo deste trabalho na obtenção de argamassas industrializadas, contribuindo assim com o desenvolvimento sustentável por meio da destinação adequada de rejeitos industriais e redução do consumo de matérias-primas não renováveis.

Palavras-chave: resíduo da indústria moveleira; argamassa industrializada; matriz cimentícia ecoeficiente; cinza de fundo; lodo de ete

ABSTRACT

GOMES, Roziani Maria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2025. **Use of Furniture Industry Waste in Cementitious Materials: Environmental Sustainability, Hydration Mechanisms and Technological Performance of Pastes and Mortars.** Adviser: Jose Maria Franco de Carvalho. Co-advisers: Antonio Cleber Goncalves Tibirica and Jose Carlos Lopes Ribeiro.

This work makes a significant contribution to science by proposing the use of furniture industry waste - eucalyptus chip ash and sewage treatment plant sludge - in the formulation of industrialized mortars, partially replacing cement with a focus on environmental sustainability and technological efficiency. The results obtained are unprecedented in terms of the physical, chemical, and microstructural characterization of these residues, their effects on the hydration and mechanical performance of cementitious mixtures, and the optimization of eco-efficient mixes. The study's originality lies in its integrated approach to characterization, performance, and sustainability, applying advanced and unprecedented analytical techniques for this type of waste. The research fills important gaps in the literature and opens new perspectives for the sustainable disposal of industrial waste on a real scale. Among the challenges facing humanity in achieving sustainable development is the generation and management of waste resulting from human activity, particularly industrial activity. Among these, the construction industry is one of the most impactful, given the exorbitant consumption of raw materials and energy, in addition to the generation of waste and greenhouse gas emissions. The furniture industry, although it predominantly processes wood-based materials, considered renewable and low-impact, also faces increasing waste generation, which must be managed efficiently to avoid environmental damage and high costs. In this context, this research aims to evaluate the incorporation of furniture industry waste into industrial mortars for masonry installation and wall and ceiling cladding, using boiler bottom ash and sludge from industrial sewage treatment plants. To this end, interaction studies with Portland cement were conducted to evaluate the effects of the waste on hydration kinetics and microstructure formation, as well as its effects on the rheology and mechanical performance of pastes and mortars. Based on this information, additives and additions were evaluated to improve the technological properties of interest, and optimization studies were conducted on mixed mortar mixes. Ultimately, optimal mixes were selected and validated for the production of industrialized mortars. This research is expected to demonstrate the technical feasibility of incorporating the waste within the scope of this

work into industrialized mortars, thus contributing to sustainable development through the proper disposal of industrial waste and reducing the consumption of non-renewable raw materials.

Keywords: furniture industry waste ; industrialized mortar; eco-efficient cementitious matrix; bottom ash; ete sludge

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 Introdução	13
1.2 Objetivo	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa	15
1.4 Hipótese	15
1.5 Indústria moveleira e seus resíduos	15
1.5.1 Cinza de fundo de caldeira	19
1.5.2 Lodo de estação de tratamento de esgoto	21
1.5.3 Resíduos de cinza na produção de argamassa	22
1.5.4 Resíduos de lodo na produção de argamassa	24
2. INFLUÊNCIA DA CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO E DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA INDÚSTRIA MOVELEIRA NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND	25
2.1 Introdução	25
2.2 Materiais e Métodos	28
2.2.1 Materiais	28
2.2.2 Métodos	30
2.2.2.3 Propriedades físicas	32
2.3 Resultados e Discussão	39
2.3.1 Trabalhabilidade	39
2.3.2 Resistência à compressão das argamassas	40
2.3.3 Tempo de pega inicial e final das pastas	42
2.3.4 Calorimetria	44
2.3.5 Difração de raios X (DRX)	45
2.3.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	47
2.4 Conclusões	49
3. ARGAMASSAS CONTENDO CINZA DE CAVACO EUCALIPTO E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: OTIMIZAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA	

UTILIZANDO UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL E A FUNÇÃO DESEJABILIDADE	51
3.1 Introdução	51
3.2 Materiais e Métodos	53
3.2.1 Materiais	53
3.2.2 Métodos	54
3.2.3 Caracterização das argamassas produzidas	56
3.2.4 Análises estatísticas dos resultados	57
3.3 Resultados e Discussão	58
3.3.1 Caracterização e desempenho mecânico	58
3.3.2 Otimização dos compósitos cimentícios	61
3.4 Conclusões	66
4. TEOR DE AR INCORPORADO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO GERADOS NA INDÚSTRIA MOVELEIRA	68
4.1 Introdução	68
4.2 Material e Métodos.....	70
4.2.1 Materiais	70
4.2.2 Métodos	70
4.3 Resultados e Discussão	72
4.4 Conclusões	74
5. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS CONTENDO RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MOVELEIRA	76
5.1 Introdução	76
5.2 Material e Métodos.....	80
5.2.1 Materiais	80
5.2.2 Métodos	81
5.3 Resultados e Discussão	86
5.3.1 Absorção de água por capilaridade.....	86
5.3.2 Coeficiente de capilaridade	87
5.3.3 Densidade de massa aparente	88
5.3.4 Teor de retenção de água	89
5.3.5 Teor de ar incorporado	90

5.3.6 Resistência à tração na flexão.....	92
5.3.7 Resistência à compressão	94
5.3.8 Resistência a aderência à tração	96
5.3.9 Propriedades reológicas.....	96
5.3.10 Análise microestrutural.....	97
5.4 Conclusões	99
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

CORPO DO TEXTO

A organização desta tese foi pensada de forma a apresentar o desenvolvimento sequencial e lógico da pesquisa, de modo que cada capítulo não apenas aprofunde um aspecto do estudo, mas também ofereça subsídios metodológicos e conceituais para a etapa seguinte. O trabalho foi estruturado em cinco capítulos principais, que refletem o avanço cronológico da investigação e a interdependência entre os objetivos específicos.

No capítulo 1 foi realizada uma fundamentação teórica ao apresentar a motivação, hipóteses e fundamentação teórica, mostrando com clareza a necessidade de entender o comportamento dos resíduos da indústria moveleira (cinza e lodo) em matrizes cimentícias.

No capítulo 2, foi feita a caracterização dos materiais e análise em pastas, optando-se por estudar as pastas cimentícias contendo os resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE, de forma isolada, para compreender os mecanismos iniciais de hidratação, o comportamento reológico e os efeitos desses resíduos na formação da microestrutura, fornecendo uma base fundamental para decisões futuras de aplicação em argamassas.

Com base nos resultados obtidos nas pastas, foi possível no capítulo 3 e 4, definir parâmetros técnicos para a segunda etapa da pesquisa, que consistiu na otimização das formulações de argamassas utilizando um delineamento composto central. Nessa fase, buscou-se encontrar as proporções mais adequadas entre cimento, resíduos e aditivos, com foco na ecoeficiência e no desempenho mecânico, visando aplicações reais em argamassas industrializadas.

A terceira etapa consistiu na validação das misturas otimizadas (capítulo 5), aplicadas agora em argamassas para assentamento e revestimento, com avaliação detalhada de propriedades físicas, mecânicas, microestruturais e de durabilidade. Esta fase consolidou a viabilidade técnica do uso dos resíduos nas condições propostas e gerou os resultados finais que confirmam as hipóteses iniciais da pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais da pesquisa, destacando que a tese foi estruturada de forma lógica e sequencial, iniciando pela caracterização dos resíduos da indústria moveleira (cinza de cavaco de eucalipto e lodo de estação de tratamento de esgoto), passando pela análise de seu comportamento em pastas cimentícias, pela otimização de traços para argamassas e culminando na produção e validação de argamassas industrializadas para assentamento e revestimento. A abordagem metodológica adotada permitiu uma compreensão aprofundada dos efeitos dos resíduos nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais dos compósitos, evidenciando sua viabilidade técnica como substituintes parciais do cimento e/ou agregados. Os resultados obtidos demonstram que o aproveitamento desses resíduos contribui

para a produção de materiais cimentícios mais sustentáveis, tecnicamente eficientes e com menor impacto ambiental, preenchendo lacunas relevantes na literatura e oferecendo uma alternativa viável para o gerenciamento de resíduos da indústria moveleira, especialmente em polos produtivos como o de Ubá/MG.

Assim, a estrutura da tese reflete um encadeamento lógico e metodológico progressivo, que parte da análise básica dos resíduos, avança para estudos de comportamento em compósitos simples (pastas), culmina em formulações otimizadas e sua aplicação prática. Essa abordagem permitiu uma compreensão aprofundada e validada das potencialidades de aproveitamento dos resíduos da indústria moveleira na produção de argamassas industrializadas sustentáveis.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Introdução

A Revolução Industrial marcou o início de uma nova realidade acerca da geração e da disposição de resíduos sólidos, em quantidades cada vez maiores. A partir da segunda metade do século 20, a questão passou a ser reconhecida como o atual desafio em questões de avanço tecnológico para gerar produtos e processos que demandam gerenciamento adequado. Assim, com a demanda crescente da sociedade, a indústria e a academia unem esforços buscando formas ecoeficientes de gerir esses resíduos (Barbosa et al., 2020). A destinação adequada dos resíduos sólidos industriais é de grande relevância e preocupação das indústrias que os geram, quanto a ações para gestão, aproveitamento e preservação do meio ambiente. Isso indica possibilidades e demanda a busca de alternativas para transformá-los em novos materiais, reduzir impactos ambientais e dar um destino adequado aos diversos tipos de resíduos, com ganho econômico-ambiental para as indústrias.

O setor moveleiro é formado por pequenas e médias empresas, que utilizam madeira maciça e painéis recompostos de madeira como matéria-prima básica em seus produtos. No entanto, em seus processos produtivos, as indústrias se deparam com grandes volumes de resíduos que entram em conflito com as questões ambientais (Almeida; Giannetti, 2012). Assim, a indústria moveleira precisa gerenciar um volume crescente de matéria-prima florestal que processa, gerando grandes quantidades de resíduos sólidos. Por utilizar principalmente produtos derivados da madeira, tais indústrias ainda não deram a devida importância às questões ambientais (Maffessoni, 2012). É importante destacar que não somente resíduos derivados da madeira são gerados pela indústria moveleira. Dentre os resíduos, encontram-se cinzas, lodo químico do tratamento do esgoto industrial, serragem, resíduos de tinta e solvente, dentre outros, alguns apresentando elevada toxicidade.

A indústria da construção é uma grande consumidora de recursos naturais e energia (Kamali et al., 2019; Vieira et al., 2016; Xia et al., 2020) além de ser uma grande emissora de gases de efeito estufa (Kamali et al., 2019; Vieira et al., 2016; Xia et al., 2020). Para minimizar este efeito negativo, alternativas ao cimento e agregados convencionais vêm sendo buscadas. Ressalta-se que a poluição é causada não apenas pelo consumo de energia, mas também pela grande quantidade de resíduos que são produzidos (González-Kunz et al., 2017). Nesse sentido, a substituição total ou parcial dos constituintes de concretos e argamassas por subprodutos de diferentes setores industriais vem se destacando como alternativa viável para mitigar os

impactos da indústria da construção ao mesmo tempo que oferece destinação adequada a resíduos (Xiao et al., 2018). Dentre os materiais residuais de diferentes indústrias que vem sendo estudados como substitutos parciais do cimento e agregados em matrizes cimentícias, estão a escória siderúrgica (Ismail e Hassan, 2016; Zhao et al., 2015), cinza volante (Celik et al., 2015; H. Wang et al., 2016), resíduos agrícolas (Madurwar et al., 2013), rejeitos de mineração (Rebello et al., 2019), dentre outros.

Estudos de otimização e interação de diferentes resíduos da indústria moveleira em matrizes cimentícias mistas focados na aplicação em argamassa industrializadas não foram encontrados na literatura. Desta forma, esta pesquisa pretende preencher essa lacuna, avaliando a viabilidade técnica da incorporação de resíduos da indústria moveleira em matrizes cimentícias por meio de estudos de substituição e otimização voltados ao desenvolvimento de misturas para argamassas industrializadas indicadas para o assentamento de alvenarias e revestimento de tetos e paredes.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Obter e validar mistura(s) de argamassa(s) industrializada(s) para assentamento de alvenarias e revestimento de tetos e paredes contendo resíduos da indústria moveleira em substituição parcial dos agregados e/ou ligantes convencionais.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, a pesquisa está dividida em etapas, cujos objetivos específicos são listados a seguir:

- Avaliar o uso mais apropriado dos resíduos de cinza de cavaco de eucalipto misturados com lodo da estação de tratamento de esgoto da empresa Itatiaia Móveis S/A, por meio de sua incorporação na produção de argamassas;
- Descrever os efeitos dos resíduos estudados na cinética de hidratação e formação de microestrutura em pastas de cimento Portland;
- Descrever os efeitos dos resíduos estudados no comportamento reológico e desempenho mecânico de pastas e argamassas de cimento Portland;
- Descrever os efeitos de aditivos e adições em pastas e argamassas de cimento Portland contendo os resíduos estudados.

- Identificar proporções otimizadas de cimento, agregados, resíduos e aditivos para obtenção de argamassas adequadas à assentamento de alvenarias e revestimento de paredes e tetos.

1.3 Justificativa

Materiais residuários de indústrias de móveis, se de um lado podem ser considerados um problema, de outro podem ser reprocessados e transformados para se tornar novos produtos aplicáveis tanto em partes constituintes de edificações como em partes da linha de produção das indústrias moveleiras.

Lodo e cinza residuários de indústrias de móveis são potencialmente combináveis com outros materiais convencionais usados em argamassas de revestimento ou assentamento. A cinza pode ser incorporada à argamassa em substituição parcial do cimento. Assim, a incorporação desses resíduos como matéria-prima para elementos construtivos apresenta-se como uma oportunidade para preservar o meio ambiente, e para reduzir o custo de materiais da construção civil.

Em edificações, como novo produto, vislumbram-se possibilidades para uso em argamassas, nesse sentido, ao se aprofundar na prospecção de aspectos tecnológicos, ambientais e econômicos dos resíduos da indústria moveleira, a pesquisa também pode indicar oportunidades para investimentos e empreendimentos para a criação e produção de novos materiais utilizáveis nos processos produtivos da construção civil.

1.4 Hipótese

Resíduos da indústria moveleira do Polo industrial de Ubá/MG, especificamente cinza de caldeira e lodo químico da estação de tratamento do esgoto industrial, poderão ser utilizados na produção de argamassas industrializadas tecnicamente viáveis, com baixo impacto ambiental e com algumas características tecnológicas melhoradas.

1.5 Indústria moveleira e seus resíduos

Indústrias do setor moveleiro estão se preocupando cada vez mais com o gerenciamento dos seus resíduos em benefício de uma minimização dos impactos ambientais. Com isso, todo material descartado, considerado sem utilidade, pode se transformar em novos produtos. Com a evolução tecnológica, cada vez mais vai se mostrando possível dar maior aproveitamento à totalidade da matéria-prima que um dia foi retirada da sua fonte (Brito; Cunha, 2009).

Segundo Lima e Silva (2005), os resíduos gerados pela indústria moveleira podem ser divididos em dois grupos de maior impacto ambiental: os resíduos sólidos e os resíduos líquidos. Dentre os resíduos sólidos, têm-se os derivados diretos da madeira (aparas, cepilhos e serragem) e os originados das embalagens de matéria-prima (papéis, plásticos, metais, latas de tinta e solvente, grampos e fitas metálicas). No grupo dos resíduos líquidos, estão os solventes de tinta, a borra de tinta e a água utilizada em cabines de pintura. No caso da incineração de resíduos de madeira da indústria moveleira, resultam resíduos gasosos e as cinzas. Também há os resíduos provenientes dos processos de lixamento.

Diariamente, milhares de toneladas de resíduos sólidos gerados pelos diversos processos produtivos são descartados nos aterros sanitários, controlados e comuns. A natureza da deposição dos resíduos acarreta problemas ambientais e sociais. Dentre os resíduos sólidos suscetíveis de reciclagem, a construção civil é um setor com grande capacidade de absorver resíduos em seus processos.

Fernandez et al. (2018) afirmam que a indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pela extração e utilização dos recursos naturais para a fabricação de materiais. De maneira geral, os processos de fabricação dos materiais tradicionais se caracterizam por ações agressivas ao meio ambiente. A busca por soluções ambientalmente corretas se faz necessária com o desenvolvimento de materiais com a incorporação de resíduos e baseados em matérias-primas alternativas, que reduzam o consumo de materiais associados a grandes impactos ambientais. Kibert (2007), apresenta sete princípios para a construção sustentável: redução do consumo de recursos; reutilização de recursos; utilização de recursos recicláveis; proteção da natureza; eliminação de tóxicos; aplicação de análises de ciclo de vida em termos econômicos; e ênfase na qualidade.

O gerenciamento de resíduos é questão em foco na área industrial, não só pelo intuito de proteger o meio ambiente como também garantir uma redução no desperdício de matéria-prima (Brito; Cunha, 2009). Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), tais resíduos como os da madeira têm como algumas características específicas a combustibilidade e a biodegradabilidade. Assim, quando estocados de maneira inadequada, próximos às instalações ou aglomerações urbanas, podem ter a propriedade de alta combustibilidade acentuada. A isso se acrescenta o fato de o consumo de materiais estar crescendo juntamente ao aumento da população, sem contar o excesso de descartes no meio ambiente. Como resultado do desenvolvimento e da grande demanda de materiais de construção, há a necessidade de se obter materiais de diferentes fontes (Buselatto et al., 2019).

Na produção de edificações e obras de infraestrutura há consumo de grandes volumes de recursos naturais e energia. Entre os materiais mais utilizados pelo setor de construção civil encontra-se o cimento. A reciclagem de resíduos em materiais para construção civil traz vários benefícios ambientais, entre eles a destinação final por meio da estabilização/solidificação e a diminuição do consumo de recursos naturais não renováveis. Em alguns casos, pode-se, inclusive, melhorar o desempenho dos materiais com a incorporação do resíduo (Brehm et al., 2013).

Resíduos orgânicos normalmente são queimados para reduzir seu volume ou para obter energia; finalizado o processo, são descartados em aterros sanitários. Compostos contaminantes como metais pesados constituem parte desses resíduos, sendo agressivos ao meio ambiente.

Assim, a utilização de materiais de construção ecoeficientes e a reutilização/reciclagem são grandes desafios para a arquitetura e engenharia civil atuais. Para minimizar este efeito negativo, é fundamental encontrar alternativas ao cimento convencional. Ressalta-se que a poluição é causada não apenas pelo consumo de energia, mas também pela grande quantidade de resíduos que são produzidos (González-Kunz et al., 2017).

Uma das indústrias que mais afeta o meio ambiente é a construção civil, com alto índice do consumo de recursos naturais e geração de gases de efeito estufa, especialmente CO₂ na produção de cimento Portland. Estima-se que 11 bilhões de toneladas de concretos são usados no Brasil a cada ano (Resende, 2013). Apesar de ser um grande produtor de resíduos que requerem tratamento adequado e destinação correta, a enorme quantidade de materiais que a construção civil requer, também oferece grande potencial para incorporar subprodutos na produção dos referidos materiais (Couto et al., 2019). Mundialmente, a indústria cimentícia é responsável por aproximadamente 5 a 8% da emissão de CO₂, provocando significativo impacto ambiental (González-Kunz et al., 2017).

O cimento Portland tradicional é composto basicamente por clínquer e gesso, substâncias que fundidas em alta temperatura em fornos transformam-se tradicionalmente em um dos principais aglomerantes. Grãos de clínquer são moídos com gipsita até virarem pó. Estima-se que para cada tonelada de clínquer são emitidos entre 800 e 1000 kg de CO₂, incluindo o CO₂ gerado pela decomposição do calcário e pela queima do combustível fóssil (60 a 130 kg por tonelada de clínquer) (Gluitz et al., 2013).

É crescente a busca por materiais alternativos que possam substituir parcial ou totalmente o clínquer. Esses materiais começaram a ser usados nas misturas de concretos e argamassas devido ao seu custo mais barato e à necessidade de se dar um destino apropriado aos resíduos

de vários setores industriais e diminuir a utilização de cimento Portland, por seu potencial poluidor. Além desses benefícios, os materiais alternativos podem promover melhor hidratação do cimento aplicado, otimizando seu desempenho, e contribuir para o aumento da resistência mecânica e da durabilidade de matrizes cimentantes, podendo reduzir, assim, a quantidade de cimento aplicado para obter concretos e argamassas de boa qualidade (Bortoletto et al., 2017). A utilização pela indústria da construção civil dos resíduos gerados em outros setores pode se tornar vantajosa devido à redução do emprego de matérias-primas não renováveis que são necessárias às atividades da construção civil. Estima-se que grande parte desse resíduo gerado pode ser incorporado, de modo a produzir novos materiais de construção, econômicos e sustentáveis, atendendo à crescente demanda de materiais que este setor exige (Bernardes, 2013).

A referida indústria realizou em 2019, por meio da Engequisa - Engenharia Química Sanitária e Ambiental Ltda (Engequisa, 2019), relatório de classificação de resíduo. Foram apresentados os ensaios e determinações quantitativas realizadas em amostras dos resíduos listados na Tabela 1.1, gerados na indústria. Esses relatórios tiveram por objetivo classificar o resíduo identificado quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, visando auxiliar no seu gerenciamento adequado, forma de armazenamento temporário e disposição final.

A classificação do resíduo tipo lodo da estação de tratamento de efluentes industriais deu-se por meio de ensaios de caracterização, realizados pelo Centro de Biologia Experimental Oceanus e Hidroquímica, na qual foram utilizadas três amostras. De acordo com os valores máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004) na primeira amostra, e de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) na segunda amostra, que discorre sobre limite máximo de concentração no extrato obtido no ensaio de lixiviação, os parâmetros satisfazem os limites permitidos. E ainda para o ensaio da terceira amostra de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004), que discorre sobre limite máximo de concentração no extrato obtido no ensaio de solubilização, os parâmetros alumínio total, ferro total, índice de fenóis, manganês total, substâncias tensoativas que reagem com o azul de metileno e sulfato ultrapassam os limites máximos permitidos. Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo deve ser considerada como classe II A, resíduo não inerte.

Tabela 1.1 - Resultados de ensaios de classificação dos resíduos.

Resíduo	Cinza	Sucata - limpeza fossa sanitária
Aspecto	Sólido em pó	Lodo ETE
Armazenamento	Caçamba	Tanque de tratamento

Destinação	Aterro industrial, reaproveitamento e reciclagem	Aterro industrial, incineração, co-processamento, reaproveitamento e reciclagem
Resultado	Apresentou teor de cloretos, sódio total, sulfatos e surfactantes acima dos limites do anexo G da NBR 10.004:2004	Não apresentou inflamabilidade, corrosividade e/ou reatividade
Classificação	Não Perigoso - Classe IIA	Não perigoso - Classe II

1.5.1 Cinza de fundo de caldeira

As cinzas de resíduos de madeira são geradas pela combustão da madeira, geralmente para a produção de energia. Resíduos de madeira são combustíveis propícios para fornos de biomassa, porque em comparação com outros resíduos herbáceos e agrícolas, produzem menos materiais residuais (Cheah; Ramli, 2011).

Segundo a definição da NBR 5736 (ABNT, 1991), as cinzas volantes são materiais finamente divididos provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado. Finamente particulado, compõe-se de partículas esféricas simples, cenosféricas ou angulosas. Por suas características químicas, são materiais sílico-aluminosos, sílico-cálcicos ou sulfo-cálcicos, cuja composição varia de acordo com as impurezas contidas na queima do carvão da usina de energia.

França et al. (2016) afirmam que a pressão sobre as indústrias de construção pela adoção de práticas consideradas ambientalmente adequadas ou sustentáveis são cada vez maiores e que uma possibilidade está na redução da fabricação do cimento mediante a utilização de materiais pozolânicos, tais como sílica ativa, cinza volante e cinzas de biomassa como materiais cimentícios suplementares.

Grandes quantidades de cinzas produzidas na geração de energia em caldeiras têm como destinação final os aterros sanitários, nos quais a deposição, além de ocupar grandes territórios é feita de maneira incorreta, pode causar impactos ambientais, podendo trazer danos a natureza e a população local (Resende, 2013).

Anualmente, em todo o mundo, aproximadamente 480 milhões de toneladas de cinzas da combustão de biomassa são geradas (Vassilev et al., 2012). Esta quantidade está se tornando comparável à de cinzas de carvão (780 milhões de toneladas/ano atualmente) (Izquierdo; Querol, 2012). Devido às rígidas regulamentações ambientais impostas pelos órgãos reguladores ambientais, a deposição em aterro de cinzas de biomassa florestal tem se tornado

cada vez mais difícil; este cenário é uma oportunidade para estudar as diversas formas de reciclagem desses resíduos (Cheah; Ramli, 2012).

Sendo um resíduo com baixo valor agregado e grande quantidade de sílica, as cinzas são uma alternativa atraente e viável para substituição da areia na construção civil. O uso de cinzas para atividade pozolânica diminui o impacto ambiental e o custo da preparação de materiais cimentícios, pois substitui compostos de maior custo, evitando a disposição das cinzas no ambiente e tornando o processo de fabricação de materiais cimentícios mais sustentável (Cacuro; Waldman, 2015).

O uso de cinzas residuais de biomassa em argamassas ou concreto é permitido pelas normas ASTM. A sua utilização está em constante estudo; sua reciclagem na produção de materiais à base de cimento pode ter um impacto benéfico no ambiente, desde que seja possível indicar que os produtos resultantes têm boas propriedades mecânicas, longa durabilidade e baixa liberação de elementos perigosos por ebulição (Maschio et al., 2011).

Vamvuka (2009) assegura que os metais pesados contidos nos resíduos de cinzas podem representar um risco significativo para o meio ambiente devido à possível lixiviação em águas subterrâneas e superficiais, afetando a saúde. A reciclagem dessas cinzas permite prolongar sua vida útil, reduzir os resíduos poluentes acumulados em aterros sanitários e melhorar a sustentabilidade.

O cimento é um produto constituído principalmente de material calcário, sílica e alumina; quando hidratado, funciona como uma cola que irá ligar as partículas de agregados entre si. A utilização de cinzas volantes tende a aumentar a resistência mecânica e rigidez do produto (Silva, 2017).

A maior experiência brasileira de reuso de produtos gerados por indústrias na produção de materiais de construção civil é conduzida pela indústria cimenteira, que recicla uma parte das escórias de alto-forno e cinzas volantes. Pesquisas estimam que a indústria cimenteira brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes ou escórias granuladas reduziu a geração de CO₂ em 29% e obteve uma economia de combustível de 28% (Matos; Alencar, 2018).

Grande parte das cinzas de biomassa, como as provenientes da madeira de eucalipto, produzidas em usinas térmicas são descartadas em aterros, na maioria das vezes sem nenhum controle, ou são reutilizadas nas florestas, e até mesmo na agricultura, para melhorar a alcalinidade dos solos, porém esta utilização é em pequena escala diante da produção existente. Buscando evitar a poluição do ar e consequentemente problemas respiratórios nas pessoas que são atingidas, é

necessário planejamento eficaz e aterros adequados para o descarte das cinzas (Ramos et al., 2013).

Ramos et al. (2013) concluíram que as cinzas de madeira de eucalipto podem ser utilizadas em compostos cimentícios substituindo a areia ou o cimento devido a ocorrência de atividade pozolânica. O material pozolânico, de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2014) é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, a temperaturas ambientes, para formar compostos com propriedades cimentantes.

1.5.2 Lodo de estação de tratamento de esgoto

Pela NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos são materiais que resultam de processos das diversas atividades de uma comunidade. Podem ter diversas origens e apresentar-se nos estados sólido, líquido ou gasoso. Incluem-se nessa definição os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de água, os gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos d'água, ou exijam, para isto, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

De acordo com a Lei Federal 12.305:2010 (Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos), Artigo 3º, Inciso XVI, o conceito de resíduos no estado sólido ou semissólido tornam está atrelado à inviabilidade de seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água. A destinação ambientalmente adequada baseia-se na reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético. São denominados rejeitos os “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”, sendo a distribuição ordenada dos resíduos em aterros.

Os resíduos líquidos gerados pelas indústrias de móveis são mais impactantes que os resíduos sólidos, devendo ter uma destinação adequada, pois os impactos ambientais causados demandam mais tempo para serem recuperados. O lodo gerado nas cortinas d'água das cabines de pintura ou envernizamento e os lodos de ETEs, quando não armazenados corretamente, contaminam o solo e subsolo, além de contaminarem os cursos d'água e até mesmo os lençóis freáticos (Nahuz, 2005).

O lodo pode ser utilizado para fabricar materiais da construção civil. Além de custo baixo, resistência e durabilidade, o principal benefício está em reduzir os impactos ambientais. O lodo é considerado um grande problema para as ETAs no Brasil, pois é preciso ter um descarte adequado e são poucas as cidades no País em que esse descarte é realizado de forma correta (Bastos et al., 2018).

Seu uso como matéria-prima para a construção civil é visto como uma boa alternativa. Ao ser incorporado na linha de produção de algum tipo de material, o lodo diminui os gastos com a matéria-prima que normalmente é utilizada, diminuindo o risco de contaminação de recursos naturais (Silva et al., 2014).

Visentin et al. (2017) afirmam, de modo geral, que os resíduos do lodo geram uma preocupação quanto à disposição final, pelas grandes quantidades e sem gerenciamento adequado, pode comprometer até 50% do orçamento operacional de um sistema de tratamento e ainda apresentar elevado potencial de carga poluidora, capaz de gerar problemas socioambientais.

Diversos estudos apontam que a utilização ecologicamente adequada de resíduos, ainda promove melhoria na qualidade dos materiais utilizados pela indústria da construção civil. Estudos desenvolvidos por (Beatriz et al., 2012) recomendam que o uso de materiais de construção produzidos com o lodo é mais viável para ambientes internos, pois produtos contendo lodo na fabricação têm maior capacidade de absorção da água, o que inviabiliza o uso externamente em construções (exposição às intempéries).

Independentemente da origem e finalidade, o lodo deve ser tratado tanto para reduzir seu volume e quantidade de água, quanto para garantir a estabilização da matéria orgânica e evitar problemas ambientais posteriores com o não aproveitamento ou disposição final inadequada (Samya de Freitas et al., 2019).

Soluções técnicas, economicamente viáveis e ambientalmente corretas representam oportunidade para reduzir impactos associados a esses resíduos. Dentre as possibilidades de reutilização ou destinação final dos resíduos de ETEs, está a de aplicação em materiais de construção civil, se conhecidas suas propriedades e potenciais usos.

1.5.3 Resíduos de cinza na produção de argamassa

Várias são as contribuições que as argamassas proporcionam para a engenharia e o setor da construção civil, como a do assentamento de pedras e tijolos entre si, formando as alvenarias e favorecendo a distribuição dos esforços, e a da colagem de revestimentos cerâmicos e pétreos em paredes e pisos. Argamassas também servem como revestimento, atuando como reguladoras

e protetoras da superfície de paredes e pisos, o que inclui características de isolamento térmico e acústico, contribuem para o preenchimento de lacunas nas alvenarias, são excelentes para compor *mastic* de rejunte, além de participar como consolidantes em fraturas de alvenarias, em microfissuras de revestimento (Ribeiro, 2009).

Mais construções no meio urbano e a industrialização induzem mais consumo de concreto e matérias-primas e grandes gastos energéticos pela construção civil. A cinza de madeira de eucalipto é uma possível solução para questões ambientais e a substituição parcial de compostos do concreto ou argamassas, implicando diminuição da emissão de gases do efeito estufa. Cinzas geralmente contêm metais e produzem potenciais danos ao meio ambiente e à saúde humana. Uma alternativa tecnológica para diminuir impactos ambientais oriundos da liberação indiscriminada de resíduos é o uso das cinzas em produtos relacionados à construção civil, pelas grandes quantidades produzidas no País e por suas características químicas e físicas poderem proporcionar atividade pozzolânica ao produto desenvolvido (Borlini et al., 2005).

Estudos de Barbosa et al. (2013); Kwan e Li (2013); Maschio et al. (2011); e Wang e Baxter (2007) mostram que o uso de cinzas volantes e de biomassa como materiais cimentícios suplementares melhora as propriedades no estado fresco e no endurecido e a durabilidade de concretos e argamassas. Resultados obtidos por esses autores mostram que a cinza de eucalipto pode ser utilizada em adição ou substituição, em massa, ao cimento Portland nas argamassas e concretos, melhorando o desempenho mecânico devido ao efeito filler, além de ser adequada alternativa ambiental para a destinação desse resíduo. He et al. (2012) afirmam que a utilização de cinzas volantes tende a aumentar a resistência mecânica e rigidez do produto.

Embora viável o uso de cinzas residuais em cimentos, concretos e argamassas, é necessário durabilidade equivalente e propriedades mecânicas apropriadas, ou seja, os produtos devem ter capacidade de resistir adequadamente aos esforços solicitantes. Isso demanda estudos que atestem a possibilidade de uso de um determinado resíduo em compósitos cimentícios (Modolo et al., 2013).

França et al. (2016) verificaram por ensaios que a cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento não altera significativamente as propriedades de argamassas no estado fresco e não apresenta reatividade significativa, sendo tecnicamente uma alternativa viável de uso.

Cinzas provenientes de atividades agroindustriais também podem ser utilizadas como pozolanas, pois possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante. Também possuem potencial para serem empregadas como adição mineral na produção de novos

materiais de construção, econômicos e sustentáveis, atendendo à demanda deste setor (Gluitz et al., 2013).

Em geral, uma argamassa adequada ao uso é composta por uma mistura ideal de aglomerantes de boa reatividade, com agregado de boa qualidade e variedade e água limpa. São aspectos importantes, ainda, procedimentos corretos e condições ambientais apropriadas para a mistura dos materiais componentes (qualidade da argamassa), a aplicação na alvenaria e o processo de cura (Fontes, 2013).

1.5.4 Resíduos de lodo na produção de argamassa

Diniz e Melo (2019) afirmam que a utilização do lodo de ETE após tratamento adequado pode apresentar diversos benefícios ecológicos que justificam os custos do seu tratamento. Destaca-se o potencial econômico e ambiental da utilização do lodo como substituto ao cimento em obras de pavimentação de concreto, tendo em vista que este tipo de obra emprega elevadas quantidades de concreto em grandes extensões.

Brehm et al. (2013) realizaram um trabalho sobre lodo de fosfatização - LF, gerado no tratamento de efluentes do processo de revestimento fosfático de aço. Trata-se de um resíduo sólido classe IIA, não inerte, geralmente disposto em aterro industrial. Afirmou que ambientalmente é possível empregar o LF em materiais de construção civil, sendo a caracterização ambiental dos resíduos de materiais produzidos à base de cimento Portland, com incorporação de LF, não é alterada em relação aos resíduos dos materiais de referência, empregados usualmente. A viabilidade da incorporação do LF em matrizes à base de cimento Portland requer uma avaliação técnica relacionada ao desempenho mecânico e durabilidade dos materiais.

2. INFLUÊNCIA DA CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO E DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA INDÚSTRIA MOVELEIRA NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE PASTAS DE CIMENTO PORTLAND

RESUMO

Esse estudo apresenta a primeira etapa experimental da pesquisa, voltada à investigação do comportamento das pastas de cimento Portland incorporando cinza de cavaco de eucalipto e lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) gerados pela indústria moveleira. Essa etapa teve como objetivo compreender, de forma isolada, os efeitos físico-químicos e microestruturais dos resíduos sobre a matriz cimentícia, servindo como base técnica para o desenvolvimento posterior das argamassas. Foram conduzidas análises de caracterização detalhada dos resíduos, incluindo composição química, granulometria, morfologia e perda ao fogo, além de ensaios de consistência, resistência mecânica, tempo de pega e técnicas complementares como difração de raios X (DRX), espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), calorimetria e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados demonstraram que a presença dos resíduos altera de forma significativa a cinética de hidratação, a formação da microestrutura, e a evolução da resistência mecânica, especialmente em maiores teores de substituição. Este capítulo forneceu dados fundamentais para direcionar a etapa seguinte da pesquisa, focada na otimização das formulações, além de contribuir para o entendimento dos mecanismos de interação entre os resíduos e o cimento, reforçando a viabilidade de seu uso em compósitos cimentícios com foco na sustentabilidade e na valorização de rejeitos industriais.

Palavras - chave: Cinza de cavaco de eucalipto; Lodo de ETE; Pastas de cimento Portland; Cinética de hidratação; Caracterização físico-química; Microestrutura.

2.1 Introdução

A fabricação de cimento é intensiva em emissões, não apenas porque consome grandes quantidades de energia, mas também porque envolve processos que liberam CO₂ diretamente na atmosfera. Diante da considerável parcela de responsabilidade da indústria de produção de cimento no total de emissão mundial de CO₂, tem-se como grandes desafios atuais traçar estratégias que reduzam a utilização do cimento, sem prejuízo ao desempenho mecânico e a

durabilidade dos compósitos cimentícios (Brito e Kurda, 2021; Nwankwo et al., 2020; Ofosu-Adarkwa et al., 2020).

A produção moveleira envolve aspectos e impactos sociais e ambientais como todos os setores produtivos, na medida em que a sua atividade demanda o uso de recursos naturais, na forma de matérias-primas, insumos e energia; gera resíduos e outros riscos à saúde com seus processos produtivos; e mantém elos em sua cadeia com diversas atividades que exercem pressões no meio ambiente e na sociedade decorrentes de seus próprios processos (Riul, 2011; Utama et al., 2022; Zutshi et al., 2016). Esses resíduos gerados no setor moveleiro, no entanto, podem ser aproveitados, minimizando danos causados ao meio ambiente.

Essa abordagem tecnológica é fundamentada no polo moveleiro de Ubá, MG, pela razão de existirem matérias-primas residuárias que tem gerado situações consideradas problemáticas para o meio ambiente (Gomes et al., 2023), particularmente cinzas de cavaco de eucalipto e lodos das estações de tratamento de esgoto (ETE).

Goyal et al. (2019) avaliaram o efeito do percentual de substituição de cimento por lodo têxtil na resistência à compressão de misturas de argamassa aos 3, 7 e 28 dias. Os autores mostraram que a resistência à compressão da mistura de argamassa com 5% de lodo têxtil é comparável a amostra de referência em todas as idades de verificação. Na idade de 3 dias de cura, amostras atingiram teor máximo de 98% de resistência à compressão. Aos 7 dias de cura, atingiram máximo de 97% de resistência à compressão em comparação com a correspondente mistura, e aos 28 dias, o maior nível de resistência foi de 97% da mistura de referência. A diminuição da resistência à compressão com o aumento do lodo têxtil indica reação de hidratação lenta, o que levou a conclusão de que até 5% do cimento pode ser substituído por lodo têxtil sem deterioração das propriedades da argamassa e da pasta.

Nadeem et al. (2013) realizaram uma investigação experimental para avaliar o desempenho de argamassas com cinzas volantes e metacaulim em temperaturas elevadas. As variáveis do programa de teste incluem substituição parcial do cimento por metacaulim de 5% a 20%, cinzas volantes de 20% a 60%, e temperaturas de 27°C a 800°C. Resultados mostraram que para todas as misturas a resistência à compressão diminuiu com o aumento da temperatura de 27°C para 800°C. Para todas as misturas, a maior perda de resistência e durabilidade ocorreu após 400°C. Portanto, 400°C pode ser considerada como temperatura crítica do ponto de vista da perda de resistência e durabilidade. Em geral, a mistura de cinzas volantes 20% apresentou melhor desempenho em todos os aspectos.

Moon et al. (2016) investigaram o efeito das propriedades físico-químicas das cinzas volantes, incluindo o tamanho das partículas e a composição química da fase amorfa na resistência à compressão de argamassas de cinzas volantes de alto volume, nas quais 50% do cimento Portland comum foi substituído por cinza volante. Seis tipos de cinzas volantes foram comparados com base em testes de resistência à compressão realizados ao longo de 365 dias. O aumento da resistência à compressão das argamassas de cinza volante de alto volume foi observado devido à reação pozolânica após 7 dias de hidratação. Verificou-se, também, que isso dependia de uma combinação de fatores, incluindo o teor de SiO_2 e Al_2O_3 , amorfos, alcalinidade e área de superfície por volume de cinza volante.

Supit et al. (2014) avaliaram o efeito das cinzas volantes ultrafinas (CVUF) no desenvolvimento da resistência à compressão de argamassas contendo cinzas volantes classe F de alto volume como substituição parcial do cimento. Foi usado argamassa de cimento, onde o cimento Portland (PC) tipo I foi substituído por CVUF no nível de 5%, 8%, 10%, 12% e 15% (em massa). Foram preparadas argamassas de cimento e de cinzas volantes de alto volume (CVAV) contendo 40%, 50%, 60% e 70% de cinzas volantes classe F e utilizadas como argamassas de controle. O nível de CVUF que exibiu maior resistência à compressão foi selecionado e usado na parte dois, onde o efeito do CVUF na substituição de alto volume de cinzas volantes foi avaliado. O estudo revelou que as argamassas de cimento com 8% de CVUF em substituição ao cimento resultou em maior resistência à compressão aos 7 e 28 dias comparadas com as argamassas de referência. Houve também melhora na resistência à compressão das argamassas CVAV, principalmente nas primeiras idades. A microestrutura e a identificação de fases após 28 dias também foram apresentadas com base em imagem de elétrons retroespalhados obtida em microscópio eletrônico de varredura (BSE) e análise de difração de raios x (XRD) de amostras de pasta. Os resultados indicaram a eficácia do CVUF na obtenção de alta densidade de empacotamento e na aceleração da atividade pozolânica, que produziu mais CSH consumindo hidróxido de cálcio (CH) para melhorar as propriedades mecânicas das argamassas CVAV.

A avaliação do efeito de redução de impactos ambientais provocados por resíduos da indústria moveleira propicia a implementação de medidas para promover opções sustentáveis. Logo, buscou-se nesse trabalho verificar possibilidades de aproveitamento dos resíduos industriais em substituição parcial do cimento Portland na produção de pastas e argamassas. Com base na aplicação dessa alternativa no setor moveleiro, pode-se também adotá-lo em outras indústrias a fim de mitigar impactos ambientais causados por esses resíduos.

Observou-se que estudos anteriores, ainda não apresentaram uma investigação da possibilidade de avaliação da cinética de hidratação nas primeiras idades e de determinação de tempos de pega em pastas compostas de resíduos de cinza e lodo de ETE, utilizando métodos de propagação ultrassônica. Além disso, também não foi possível encontrar na literatura pesquisas sistemáticas que possibilitem a avaliação e comparação da trabalhabilidade e do desempenho mecânico em argamassas com diferentes tipos de resíduos provindos de indústria moveleira. Portanto, esse trabalho tem como objetivo fazer essas investigações para preencher essas lacunas. Além de contribuir para que indústrias moveleiras que geram esses resíduos, tenham uma destinação correta, tornando mais sustentável a indústrias moveleira, em especial as plantas que não possuem um sistema de destinação adequado para esses resíduos. Além disso, é válido destacar que essa pesquisa está voltada para estudos analíticos e investiga não somente do tempo de pega e desempenho mecânico dos compósitos, mas também aplica uma combinação de diferentes técnicas de avaliação microestrutural (MEV, calorimetria, DRX e FTIR), ensaios físicos como granulometria, perda ao fogo e calorimetria, buscando explicar na microescala os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos, trazendo uma contribuição significativa para o atual estado da arte.

2.2 Materiais e Métodos

2.2.1 Materiais

Um cimento Portland (PC) de alta resistência inicial (equivalente ASTM Tipo III) foi usado para produzir as pastas e argamassas. No Brasil, esse cimento é especificado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018) como CP V. A escolha desse cimento foi atribuída a sua menor adição mineral, tendo em vista que para estudos analíticos o ideal é fazer uso de um cimento que não contenha outras adições. As características tecnológicas, bem como as propriedades físicas, mecânicas e químicas do lote de cimento foram obtidas do fabricante e estão apresentadas na Tabela 2.1.

Os materiais residuários utilizados para composição das pastas e das argamassas foram a cinza proveniente do processo de incineração de cavacos de eucalipto usado nos aquecedores, e o lodo de ETE advindo da estação de tratamento de esgoto, ambos fornecidos pela indústria Itatiaia Móveis S/A, localizada na cidade de Ubá, MG.

Tabela 2.1 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland utilizado.

Parâmetro	Valor
Óxido de Magnésio - MgO, %	1.33

Parâmetro	Valor
Trióxido de Enxofre - SO ₃ , %	3.92
Óxido de sódio - Na ₂ O, %	0.07
Óxido de potássio - K ₂ O, %	0.83
Equivalente Alcalino - Na ₂ O _{eq} , %	0.62
Perda ao fogo - PF, %	4.02
Resíduo insolúvel - RI, %	0.65
Massa Específica, g/cm ³	3.10
Área Específica (Blaine), cm ² /g	4462
Expansibilidade à quente, mm	0.0
Água de consistência da pasta, %	29.8
Início de pega, min.	142
Final de pega, min.	202
Resistência à compressão (1/ 3/ 7/ 28 dias), MPa	29.3/39.2/45.2/54.6

2.2.1.1 Classificação ambiental

Nos testes de lixiviação, após análises quantitativas, o resíduo de cinza não apresentou em seu extrato lixiviado quaisquer dos parâmetros listados em teores acima dos previstos no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004). Nas análises feitas no extrato solubilizado, o mesmo resíduo apresentou em seu extrato teor de cloretos, sódio total, sulfatos e surfactantes acima dos limites estabelecidos no anexo G da mesma norma (ABNT, 2004).

Logo o resíduo de cinza classifica-se como *Resíduo Não Perigoso Classe II A – Não Inerte*, de modo que, para disposição, deverão ser seguidos os critérios estabelecidos pela NBR 11174 (ABNT, 1990) - Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e classe III - inertes. Os critérios para definição da destinação final do resíduo deverão considerar, dentre outros, os fatores relacionados à quantidade e características físicas, destacando a possibilidade de disposição em aterros industriais.

O lodo não apresentou nenhuma das condições preliminares, ou seja, inflamabilidade, corrosividade e/ou reatividade. Para os testes de lixiviação, após análises quantitativas, o resíduo não apresentou em seu extrato lixiviado teores acima do limite estabelecido no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004).

A NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004), não se aplica a resíduo no estado líquido. Logo, por não ter apresentado teores acima do limite estabelecido no anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo de lodo de ETE é classificado como resíduo não perigoso - classe II. Para sua disposição temporária, deverão ser seguidos os critérios estabelecidos pela NBR 10174 (ABNT, 1990)

Armazenamento de resíduos classes II - não inertes e classe III - inertes. Os critérios para definição da destinação final do resíduo deverão considerar, dentre outros, os fatores relacionados à quantidade e características físicas, destacando a possibilidade de disposição em aterros industriais.

2.2.2 Métodos

2.2.2.1 Difração de raios X - DRX

A técnica de difração de raios X (DRX) foi utilizada para identificar as fases mineralógicas existentes nos resíduos. O equipamento utilizado foi o Bruker D2 Phaser, com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,789 \text{ \AA}$), configurado com os seguintes parâmetros - faixa de varredura 2θ de $5^\circ - 70^\circ$; passo de $0,05^\circ$ por segundo; com 30 rotações do spinner por minuto. Para este ensaio, após o beneficiamento dos materiais, a amostra foi peneirada na peneira #325 ($45 \mu\text{m}$) e prensada em porta amostra próprio do equipamento. Os ensaios foram feitos no NanoLab/UFOP.

Nos ensaios realizados com resíduos puros (Figura 2.1), foi verificado na análise dos picos a presença da calcita, etringita, singenita e quartzo na cinza, e no lodo a calcita e quartzo. Essas mesmas fases cristalinas foram verificadas pelos autores (Areias et al., 2017; Goyal et al., 2019) quando avaliaram a substituição parcial do cimento por lama têxtil. (Bayuseno; Schmahl, 2011; Silva et al., 2021) observaram a presença da singenita na caracterização de cinzas volantes e cinzas de biomassa de madeira respectivamente.

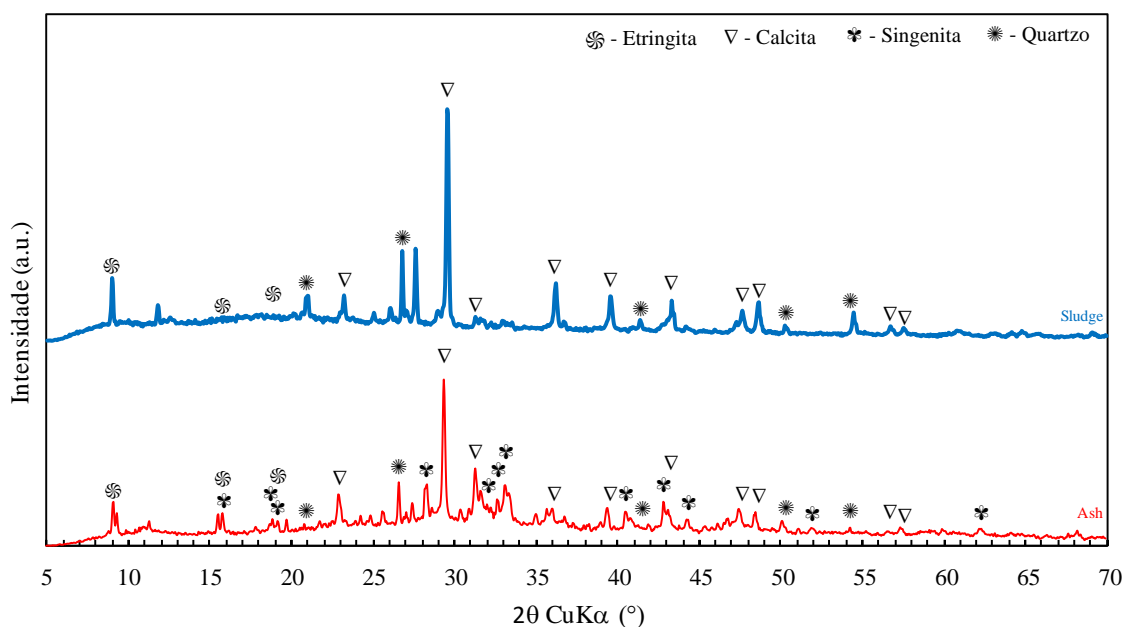


Figura 2.1 - Resultado de DRX dos resíduos.

2.2.2.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O equipamento utilizado para o ensaio foi o espectrômetro modelo Nicolet iS5, do fabricante Thermofishe. O preparo das pastilhas consistiu na prensagem de 1% de material em 100 mg de KBr. Ambos materiais foram colocados no almofariz de ágata e moídos até completa homogeneização, em seguida o material foi levado ao pastilhador e aplicada uma carga de 25 kN. As pastilhas foram identificadas e armazenadas no vácuo até o dia da coleta do espectro (Figura 2.2).

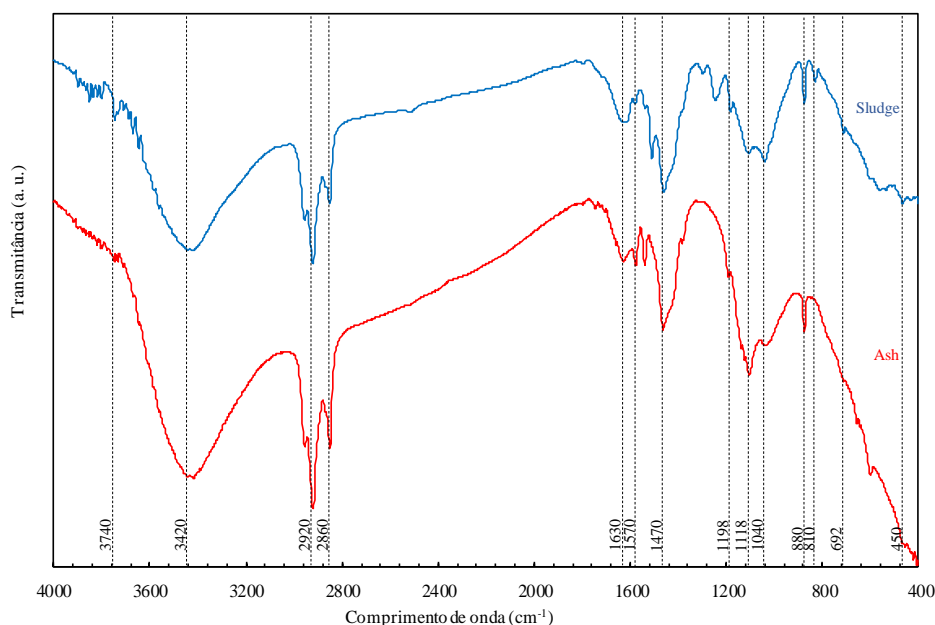


Figura 2.2. Resultado de FTIR dos resíduos

Esses espectros revelaram bandas de alta intensidade relacionadas à presença de carbonato de cálcio em 880 cm^{-1} e 1300 cm^{-1} e 600 cm^{-1} , o que pode ser atribuído aos modos de vibração simétrico (ν_2 e ν_4) e assimétricos (ν_3) (Medina et al., 2018; Nalon et al., 2023; Nasrazadani et al., 2016). Portanto, os resultados das análises de FTIR estão em acordo com os resultados de DRX.

Foram identificadas bandas associadas aos modos de vibração Si-O relacionados com as partículas de quartzo presentes nos resíduos de lodo, aproximadamente 450 cm^{-1} , 692 cm^{-1} , e 810 cm^{-1} (Malathy et al., 2022; Nalon et al., 2023; Tyagi et al., 2006).

Da mesma forma, observou-se bandas intensas em torno de $3400\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ e $1600\text{--}1685\text{ cm}^{-1}$ devidas a presença de água quimicamente ligada aos compostos hidratados (Mollah et al., 2004; Nasrazadani et al., 2016; Trezza e Lavat, 2001).

2.2.2.3 Propriedades físicas

Finura e massa específica

O índice de finura foi medido de acordo com o método NBR 11579 - Determinação da finura por meio da peneira #200 (ABNT, 2013), com resultados de material retido de 60,9% para a cinza e 67,0% para o lodo de ETE.

A massa específica foi determinada pelo método do frasco volumétrico de Le Chatelier NBR 16605 (ABNT, 2017). O reagente líquido utilizado foi o querosene, por não reagir quimicamente com o material, além de ter massa específica igual ou maior que $0,731 \text{ g/cm}^3$ a 15°C , e inferior à massa dos materiais a serem ensaiados. Os resultados obtidos para densidades dos resíduos de cinza e lodo foram de $2,96 \text{ g/cm}^3$ e $1,82 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

Granulometria a laser

Esse ensaio foi realizado com os materiais componentes das argamassas – cimento e areia, além dos resíduos de cinza e lodo. O método utilizado foi por meio dispersão das partículas em água destilada. O equipamento utilizado foi o Bettersize 2000.

Apresentam-se na Figura 2.3 as curvas granulométricas dos materiais utilizados. A areia utilizada nos estudos com argamassas é do tipo quartzosa, passante na peneira de $1180 \mu\text{m}$ de abertura de malha (#14). Este material apresentou os maiores tamanhos de partícula, com um D50 próximo a $350 \mu\text{m}$. O cimento foi se mostra o material mais fino, com D50 de aproximadamente $12 \mu\text{m}$. Importante destacar que a maior finura do cimento está relacionada com maior reatividade, e isso é uma característica típica de cimentos de alta resistência inicial. O lodo se mostrou um material um pouco mais fino que a cinza, com um D50 de aproximadamente $55 \mu\text{m}$. Com um D50 pouco menor que $80 \mu\text{m}$, a cinza de eucalipto apresentou uma distribuição um pouco mais uniforme que a do lodo, mas pode-se considerar que as curvas foram próximas, sugerindo que ganhos ou perdas de desempenho dos dois materiais estejam menos relacionados com a granulometria.

Zmamou et al. (2021) e Asante et al. (2021) também realizaram a comparação do tamanho dos grãos de cinza, dos componentes para mistura de cimento com utilização de cinza de lodo de papel e cinzas volantes, respectivamente, verificando que o tamanho dos grãos também se mostraram menores que $2000 \mu\text{m}$. O mesmo ocorreu de acordo com Silva et al. (2020) usando lodo de estação de tratamento de água, ficando os grãos entre $1 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$.

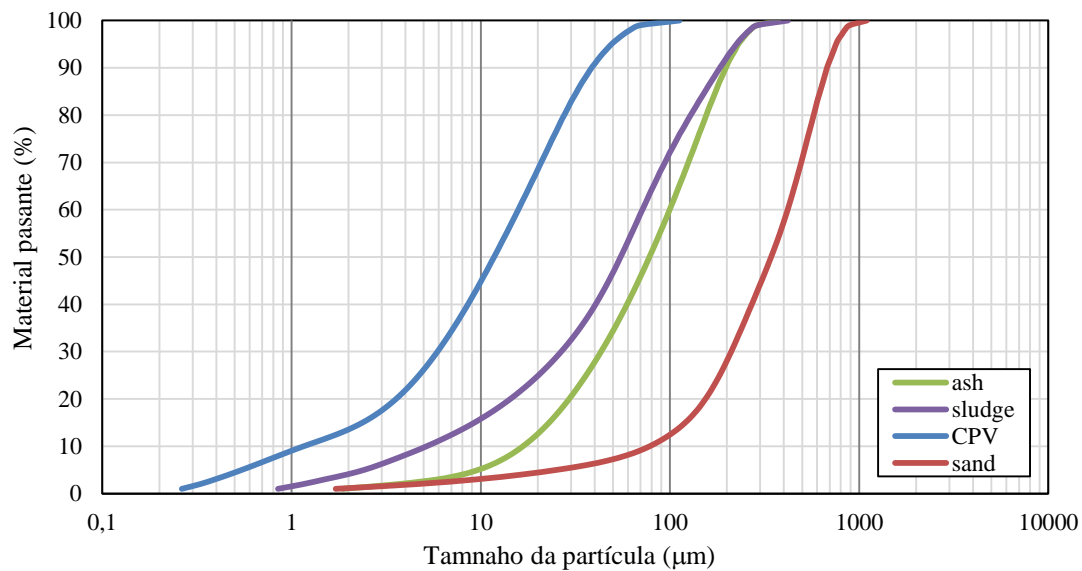


Figura 2.3. Ensaio de granulometria a laser.

Morfologia – Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizado no Núcleo de Microscopia e Microanálise (NMM) da Universidade Federal de Viçosa. As amostras foram depositadas em stubs e metalizadas com ouro usando o equipamento Quorum Q150RS. Para a obtenção das imagens, as amostras foram secas em estufa a 100° C por 24h (cinza) e 48h (lodo), uma vez que o último apresenta uma umidade mais elevada. Foram utilizadas frações passantes na peneira #48 (300μm).

Para observar a morfologia dos materiais, foi aplicada uma tensão de 15 kV para a geração de imagens de elétrons secundários. A ampliação foi realizada de acordo com o limite do aparelho e limitada a 3000 vezes. As partículas maiores de cinza de cavaco de eucalipto apresentaram superfícies predominantemente lisas e arredondadas, porém, partículas menores, mais rugosas, angulosas e planares, também foram observadas (Figura 2.4a). A amostra de lodo de ETE aparentou partículas mais rugosas e pouco arredondadas (Figura 2.4b). Maior rugosidade e porosidade superficial estão relacionadas a maior aderência com a matriz cimentícia. Por outro lado, partículas mais rugosas e porosas têm maior superfície específica e menor mobilidade em compósitos particulados no estado fresco, demandando maiores volumes de água e levando a matrizes endurecidas mais porosas. De modo geral, partículas arredondadas facilitam o empacotamento, contribuindo para uma matriz mais densa e menos porosa.

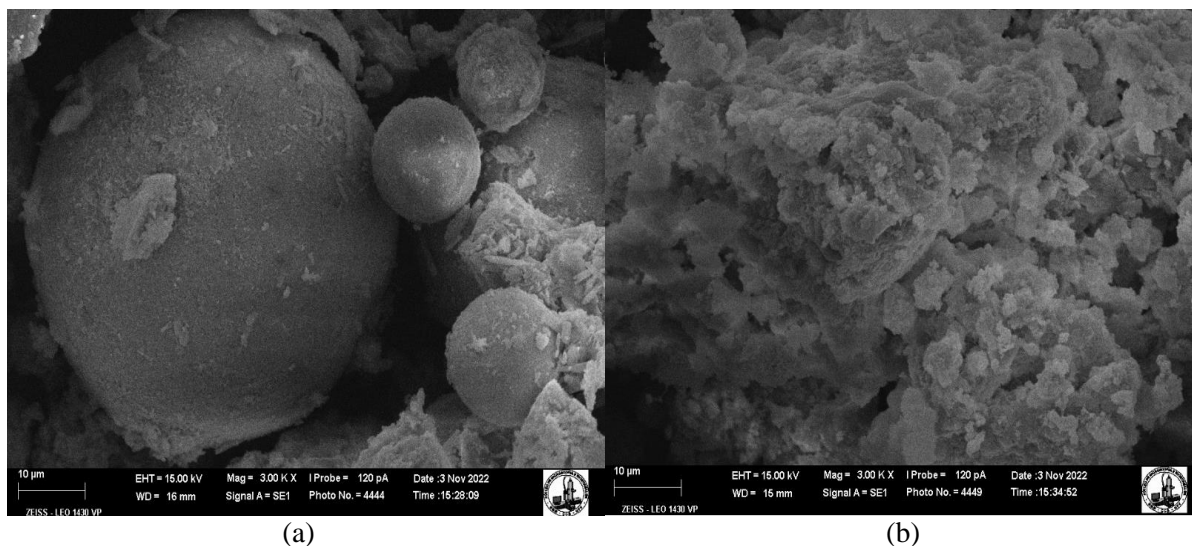


Figura 2.4. Imagens de microscopia eletrônica de varredura: a) Cinza de cavaco de eucalipto; b) lodo de ETE.

Caracterização química - Espectroscopia de Raios X

Análises químicas também foram feitas utilizando EDS. Essas análises possibilitam fazer a determinação das porcentagens dos elementos químicos observados numa determinada região do material. Os resultados estão listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição química dos materiais.

Elementos químicos	Resíduos	
	Cinza (%)	Lodo (%)
Carbono (C)	14.81	19.81
Oxigênio (O)	34.27	39.64
Sódio (Na)	2.81	1.41
Alumínio (Al)	4.34	10.16
Silício (Si)	6.26	4.82
Enxofre (S)	4.33	3.29
Potássio (K)	5.98	1.78
Cálcio (Ca)	22.79	13.03
Manganês (Mn)	0.69	0.19
Ferro (Fe)	3.71	5.86

Os dados obtidos a partir da análise de Fluorescência de raios X - FRX são apresentados na Tabela 2.3. Eles mostram que as cinzas de madeira e o lodo apresentaram altas porcentagens de SiO_2 , CaO e Al_2O_3 . Esses resultados estão em boa concordância com aqueles obtidos a partir das análises de EDS conduzidas neste trabalho e com os resultados relatados por (Rumman et al., 2023), que também revelaram maiores teores de cálcio (Ca), silício (Si), alumínio (Al) e oxigênio (O) em ambos os tipos de resíduos.

Tabela 2.3 - Resultados de análises de FRX.

Óxidos (%)	Cinza	Lodo
MgO	4.276	0.364
Al ₂ O ₃	9.837	11.511
SiO ₂	17.110	6.857
SO ₃	5.727	4.450
K ₂ O	3.332	0.993
CaO	24.297	12.753
TiO ₂	4.762	5.900
Fe ₂ O ₃	4.715	3.414
Outros óxidos	5.864	3.078
LOI	20.080	50.680

Perda ao fogo

Para realização do ensaio, inicialmente o material foi seco em estufa à 80°C, em seguida peneirado (peneira 75 µm). A primeira determinação foi realizada levando a mufla a uma temperatura de 440°C, conforme método NBR 13600 (ABNT, 2022). Uma segunda determinação foi feita levando as amostras a uma temperatura de 1000°C, conforme método NBR 6473 (ABNT, 2003). Esse ensaio consiste em eliminar o material volátil, para determinação do teor de matéria orgânica (primeiro método) além de perdas de massa devida à descarbonatação e desidroxilação (segundo método). Os resultados são mostrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Resultado da perda ao fogo.

Resíduo	Temperatura (°C)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda ao fogo (g)	Resultado (%)
Cinza	440	5,01	4,42	0,59	11,78
	1000	5,02	3,68	1,34	26,69
Lodo	440	5,03	3,08	1,95	38,77
	1000	5,02	2,51	2,51	50,00

Diante desse resultado observa-se grande volume de matéria orgânica nos resíduos, espera-se que os mesmos absorvam muita água no sistema podendo prejudicar o desempenho mecânico. Neville e Aïtcin (1998) e Bilodeau, et al. (1994) afirmam que a perda ao fogo também inclui a presença de carbonatos e água combinada em minerais argilosos, mas a combustão de carbono é o principal componente que contribui para a perda ao fogo. O carbono residual presente na cinza volante pode absorver água e aditivos químicos, reduzindo sua eficiência ou mesmo resultando em um sistema inadequado de vazios de ar no concreto (Hill et al., 1997; Pedersen et al., 2008).

2.2.2.4 Avaliação da consistência e desempenho mecânico em argamassas

As proporções de substituição do cimento Portland foram fixadas em 5%, 10%, 25% e 50% (Tabela 2.5). O processo de mistura foi realizado com auxílio de misturador mecânico, seguindo as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016). Imediatamente ao final da mistura, foi realizado o teste de mesa de fluxo para argamassas, seguindo as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016). Para a produção de argamassas foi utilizada areia de quartzo de rio com faixa granulométrica entre 0,6 mm (peneira nº 30) e 0,15 mm (peneira nº 100).

Tabela 2.5 - Identificação das blendas e proporção de ligante e aditivo.

Mistura	Constituintes (g)				
	PC	Cinza de fundo	Lodo	Areia	Água
REF	474.5	0.0	0.0	949.0	261.0
5A	450.3	23.7	0.0	948	260.7
10A	426.6	47.4	0.0	948	260.7
25A	355.5	118.5	0.0	948	260.7
50A	237.0	237.0	0.0	948	260.7
5S	450.3	0.0	23.7	948	260.7
10S	426.6	0.0	47.4	948	260.7
25S	355.5	0.0	118.5	948	260.7
50S	237.0	0.0	237.0	948	260.7

Os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de PVC com dimensões de Ø35x35 mm. Foram desmoldados com um dia de cura, em seguida submersos em água com cal, mantidos a temperatura de 25°C até completarem o período de cura para realização dos ensaios de compressão uniaxial com idades de 1, 3, 7, 28 e 63 dias, sendo necessário retificá-los na politriz para deixar sua superfície uniforme. Para realização dos ensaios de compressão, foi aplicada uma velocidade de carga de 0,31 MPa/s conforme NBR 13279 (ABNT, 2005a), controlada no software da máquina de ensaio, EMIC do Laboratório de Ensaios Mecânicos - LEM.

2.2.2.5 Tempo de início de pega em pastas

As reações de hidratação estão ligadas às propriedades de ligação, fixação física, ganho de resistência e vida útil após o endurecimento da matriz (Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2018). Tempos de pega e testes de cinética de hidratação foram realizados em pastas para avaliar a influência dos resíduos estudados na microestrutura e cinética de hidratação de pastas de cimento Portland.

Medidas de velocidade de pulso ultrassônico (UPV) foram realizadas para monitorar o início e o fim da pega das pastas, correlacionadas aos fenômenos da cinética de hidratação. O método proposto por Lee et al. (2004) foi utilizado para interpretar as curvas de variação da UPV obtidas a partir dos testes. Para tanto, foi utilizado um sistema portátil de monitoramento de pulso ultrassônico “Pundit Lab” operado pelo software Punditlink, ambos da Proceq. O transdutor foi operado com uma frequência de 54 kHz. A frequência das medições foi de uma leitura a cada minuto, realizada no período de 48 horas.

Os testes de tempo de pega e cinética de hidratação das pastas foram realizados com nove amostras diferentes, sendo a pasta de referência e resíduos de cinza e lodo para quatro proporções diferentes (100-00; 95-05; 90-10; 75-25; 50-50), cujas composições estão listadas na Tabela 2.6. Foi utilizada a razão água/cimento em peso de sólidos totais de 0,5.

Foram realizadas medições de UPV em m/s, para monitorar o início e o fim da pega das pastas de cimento/resíduo causadas pela hidratação dos componentes da pasta. Freitas (2013) utilizou um método para interpretar as curvas de variação da UPV obtidas nos testes. A curva pode ser dividida em três etapas: aumento lento de UPV (I), aumento rápido de UPV (II) e estabilidade nos valores de UPV (III) (Machado, 2019).

Tabela 2.6 - Proporções de resíduos e ligantes das pastas.

Constituintes (g)				
Mistura (%)	PC	Cinza	Lodo	Água
REF	1454.2	0.0	0.0	727.1
5A	1381.5	72.7	0.0	727.1
10A	1308.8	145.4	0.0	727.1
25A	1090.6	363.5	0.0	727.1
50A	727.1	727.1	0.0	727.1
5S	1381.5	0.0	72.7	727.1
10S	1308.8	0.0	145.4	727.1
25S	1090.6	0.0	363.5	727.1
50S	727.1	0.0	727.1	727.1

Lee et al. (2004) identificaram dois pontos específicos nas curvas VPU versus tempo para caracterizar o processo de pega (t_A - o instante em que a VPU começa a se desenvolver, e t_B - o instante em que a taxa de desenvolvimento da VPU é máxima). Além disso, a inclinação α aproximada da curva UPV versus tempo na etapa II está associada a taxa de aumento do UPV ao longo do tempo nessa etapa.

Nos estudos conduzidos por Freitas (2013) e Machado (2019), ensaios de UPV foram realizados para determinar a pega inicial e a pega final de pastas de cimento e concreto em pó reativo, respectivamente. Ambos os estudos utilizaram um sistema portátil de monitoramento de pulso ultrassônico, “Pundit Lab” da Proceq, e uma caixa cúbica de acrílico com borda de 10 cm, conforme mostrado na Figura 2.5a. O mesmo aparelho utilizado por Machado (2019) foi também empregado neste estudo (Figura 2.5b).



Figura 2.5 - a) Caixa cúbica em acrílico para testes de VPU; b) Equipamento acoplado à caixa de acrílico (UFV).

O ensaio de calorimetria foi realizado no laboratório de Engenharia Civil da UENF (LECIV). O tempo de ensaio foi de 48 horas. Foi usada uma temperatura constante da recâmara de 23°C, as misturas foram pesadas e homogeneizadas. A água foi adicionada no momento do ensaio, e a pasta foi homogeneizada usando um misturador de bancada com 400 rpm durante 2 min. Foram utilizados 50 g de material para 25 g de água. O tipo de instrumento usado foi o ICal 2000H e calibrador A0068784 Lab Calibration.

2.2.2.6 Análise microestrutural dos compósitos cimentícios

A análise FTIR foi utilizada para identificar os modos de vibração correspondentes a diferentes grupos funcionais presentes na microestrutura das amostras dos compósitos cimentícios. Além disso, análises de DRX foram utilizadas para identificação das fases cristalinas presentes nas pastas.

A preparação do material para realização dos ensaios de FTIR e DRX se deram após a moldagem das amostras em pastas com proporções de resíduos de 5% e 50%, em substituição parcial ao cimento. Após as idades de cura (7, 28 e 63 dias), interrompeu-se a hidratação com álcool isopropílico. Esse processo consiste na entrada do solvente orgânico no lugar da água, onde se encontra os poros da matriz cimentícia. E para finalizar a eliminação do solvente, foi realizado o aquecimento em estufa a temperatura de 80°C no período de 10 min, conforme

recomendado por (Snellings et al., 2018). Depois do processo de secagem, a amostra ficou armazenada no dessecador para não acontecer interação com o meio até a realização do ensaio.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Trabalhabilidade

Foram preparados corpos de prova de argamassa com proporção de volume de 1:2 (PC/resíduo: areia fina). Utilizou-se uma razão constante de peso de água para aglutinante (0,5); portanto, a consistência da argamassa não foi controlada, e sim medida, obtendo resultados variáveis (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Ensaio de consistência.

Referência	Teor de substituição (%)	Espalhamento (mm)	
		Cinza	Lodo
300,00	5	283,00	296,33
	10	279,67	295,33
	25	238,33	244,00
	50	-	-

O aumento do teor de cinza reduziu a trabalhabilidade das argamassas. A substituição do cimento Portland por 25% de cinza reduziu o espalhamento em 21% em relação a argamassa de referência. A redução do espalhamento das argamassas contendo lodo de ETE foram menores. Substituições de 5 e 10% levaram a espalhamentos equivalentes ao observado na argamassa de referência. A argamassa com 25% de substituição apresentou redução de 19% no espalhamento, quando comparada com a argamassa de referência.

A consistência das argamassas para a proporção de 50% para ambos os resíduos não foi satisfatória. As argamassas não apresentando boa coesão, sendo observado desmoronamento da massa, não sendo possível obter resultado de espalhamento em mesa (Figura 2.6a e b).

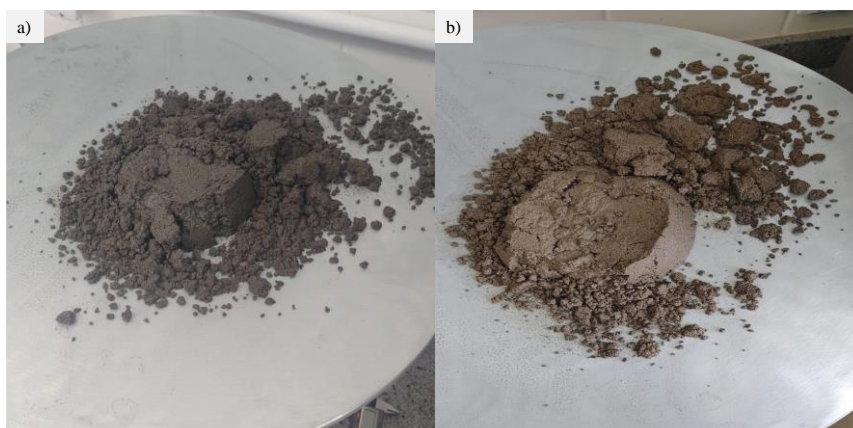


Figura 2.6 - Ensaio de consistência: a) cinza 50%; b) lodo 50%

Goyal et al. (2019), verificaram a consistência padrão em pastas, substituindo o cimento com diferentes percentuais de lodo têxtil. Para o percentual de 20% de lodo têxtil, os autores observaram um aumento na consistência das pastas de 28,5 para 30,5%.

Rais et al. (2019) realizaram uma investigação experimental e analítica da resistência de argamassa com cinza volante. Os resultados de trabalhabilidade mostraram que a consistência normal diminuiu de 30% para 27,5% com a adição de cinza volante de 0% para 50%, respectivamente. Os autores também observaram uma queda acentuada na consistência normal de cerca de 8,3% para a pasta de cimento com 50% de cinza volante comparado com a argamassa (0% de cinza). Para 10%, 25% e 40% de substituição do cimento por cinza, a consistência normal diminuiu em 1,7%, 3,3% e 6,7%, respectivamente, comparado a argamassa simples. Isso mostra que a demanda de água diminuiu com o teor de cinza na argamassa. O motivo pode ser atribuído à taxa de hidratação da argamassa FA nas primeiras idades, que é lenta devido ao fato de o cimento ter sido substituído por FA em igual peso (passar % para mm).

2.3.2 Resistência à compressão das argamassas

Apresenta-se na Figura 2.7 os resultados dos ensaios de resistência a compressão da argamassa de referência e das argamassas com resíduos após os diferentes períodos de cura. Em relação a argamassa de referência, foi observado um aumento expressivo de 66% na resistência de 1 até 7 dias. De 7 até 63 dias foi observado um aumento menor de 32%. Os mecanismos associados a essas diferentes variações serão discutidos nas próximas sessões.

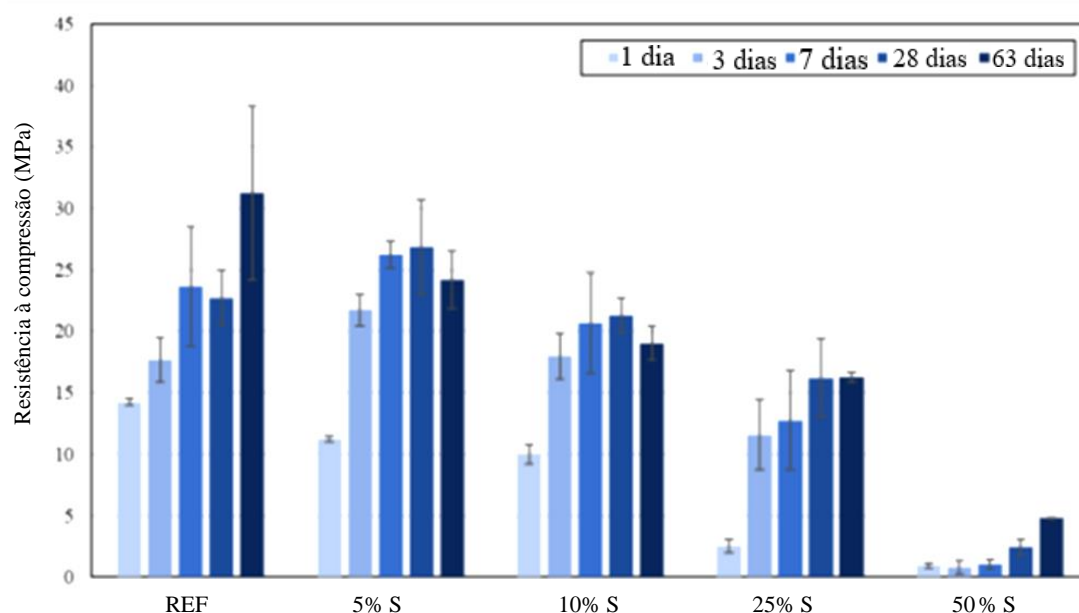
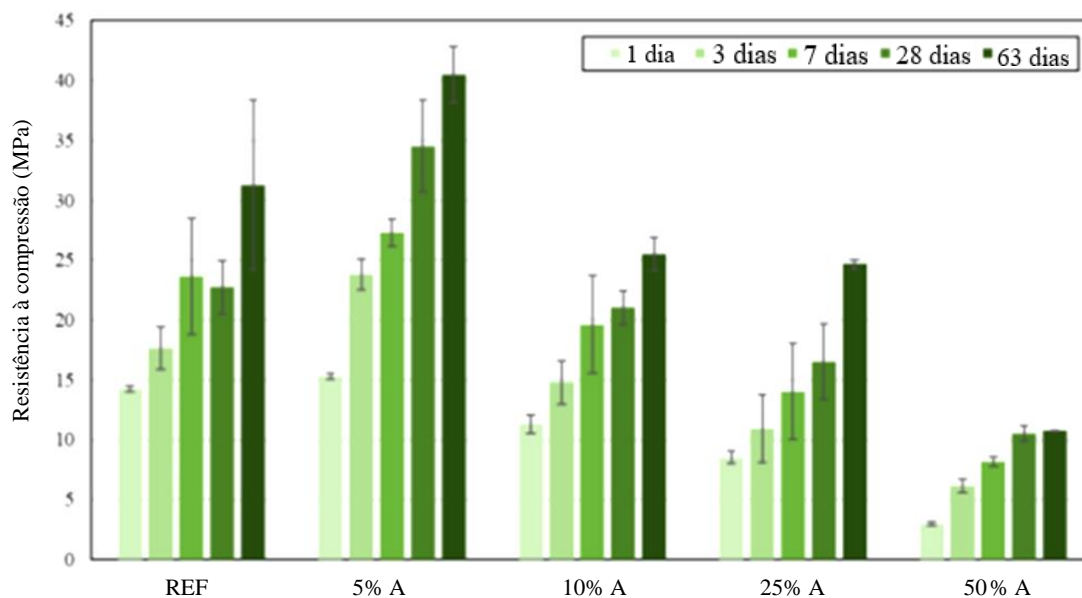


Figura 2.7 - Resultado do ensaio de compressão das argamassas.

As argamassas contendo resíduos de cinza de cavaco de eucalipto apresentaram ganhos significativos nos resultados de resistência a compressão de 1 até 7 dias com percentuais de 81% (5% cinza), 73% (10% cinza), 65% (25% cinza). De 7 a 63 dias, os percentuais foram 45% (5% cinza), 30% (10% cinza), 76% (25% cinza), com exceção do traço com teor de substituição do cimento Portland de 50% de resíduo. Os maiores ganhos ao longo da idade, foram observados nos traços com 5% de cinza.

Observou-se um aumento nos valores de resistência a compressão quando foi substituído 5% da massa de cimento por cinza. Aos 63 dias, a resistência aumentou em 28% em relação a argamassa de referência. Porém o aumento do teor de resíduo de 5% para 50% causou uma redução no valor de resistência a compressão de 73% aos 63 dias.

Nos ensaios realizados com resíduos de lodo de ETE, nota-se que independente do teor de resíduos, a resistência da argamassa caiu com a substituição do lodo, comparado aos ensaios realizados com os diferentes percentuais de cinza. Se comparar o traço com 50% de resíduo de lodo com o traço de referência, a resistência diminuiu 85% aos 63 dias. Com uso da cinza com teor de 5%, houve um aumento em relação a argamassa de referência, ficando todos os resultados com resistência maior que com a incorporação do lodo.

Goyal et al. (2019), ainda sobre avaliação do lodo têxtil para ensaio de resistência a compressão, indicaram que não houve nenhum efeito adverso da introdução de lodo têxtil como substituto do cimento até o nível de substituição de 5%. Houve uma perda considerável de resistência para níveis de substituição mais elevados. Yan et al. (2011) investigaram o uso do lodo de uma fábrica de papel para argamassas contendo esse material – as resistências à compressão médias de amostras de argamassa incorporando 2,5 e 20% em peso de lodo foram 27,6 e 20,5 MPa, respectivamente, no período de cura de 91 dias, o que corresponde a 83 e 62% da resistência de referência (33,2 MPa), bem dentro da faixa prevista de uso do produto em alvenarias.

Ikotun e Raheem (2023) realizaram um estudo comparativo de argamassas com substituição do cimento por cinza volante e cinza de madeira. Os resultados de resistência à compressão das argamassas foram de 26,2 MPa e 25,4 MPa, bem como 22,6 MPa e 19,2 MPa para substituição de 10% e 25% de cinza de madeira e cinza volante, respectivamente. A argamassa de cimento com mistura de cinza volante resultou em maior resistência tardia do que a argamassa de cimento com mistura de cinza de madeira com 10% de argamassa de cimento, com a mistura de cinza volante resultando em maior resistência à compressão do que a amostra de referência aos 90 dias.

2.3.3 Tempo de pega inicial e final das pastas

Apresentam-se nas Figuras 2.8 e 2.9 as curvas de UPV versus tempo obtidas nos ensaios de propagação de onda ultrassônica das pastas, as quais são caracterizadas em três etapas - durante a etapa I, os hidratos são formados após o período de indução dormente, e as ondas ultrassônicas se propagam através da suspensão viscosa semelhante à água (Martins et al., 2022).

A etapa II inicia-se com o aumento da quantidade de produtos de hidratação formados e dos valores de UPV; a estrutura sólida porosa saturada de água torna-se cada vez mais conectada à medida que os produtos de hidratação recém-formados preenchem os poros, levando a um rápido aumento na rigidez (Martins et al., 2022).

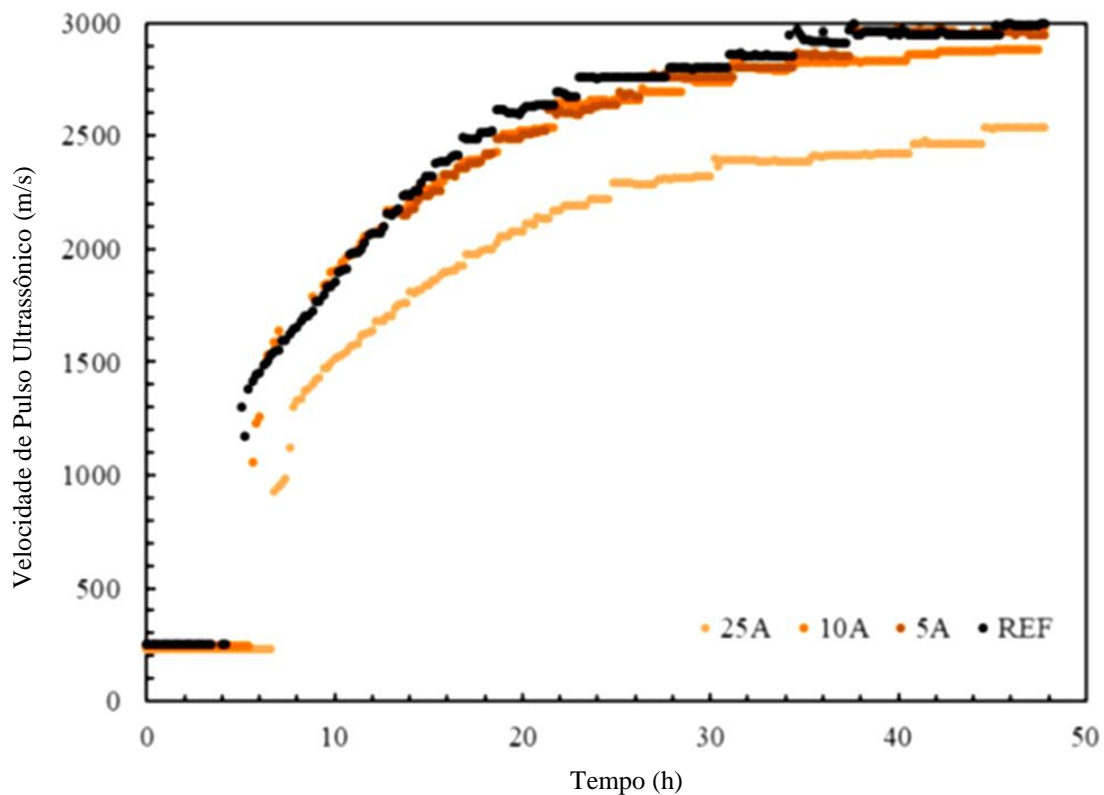


Figura 2.8 - Resultados de UPV da pasta de referência e cinza e lodo nos percentuais de 5%, 10% e 25%.

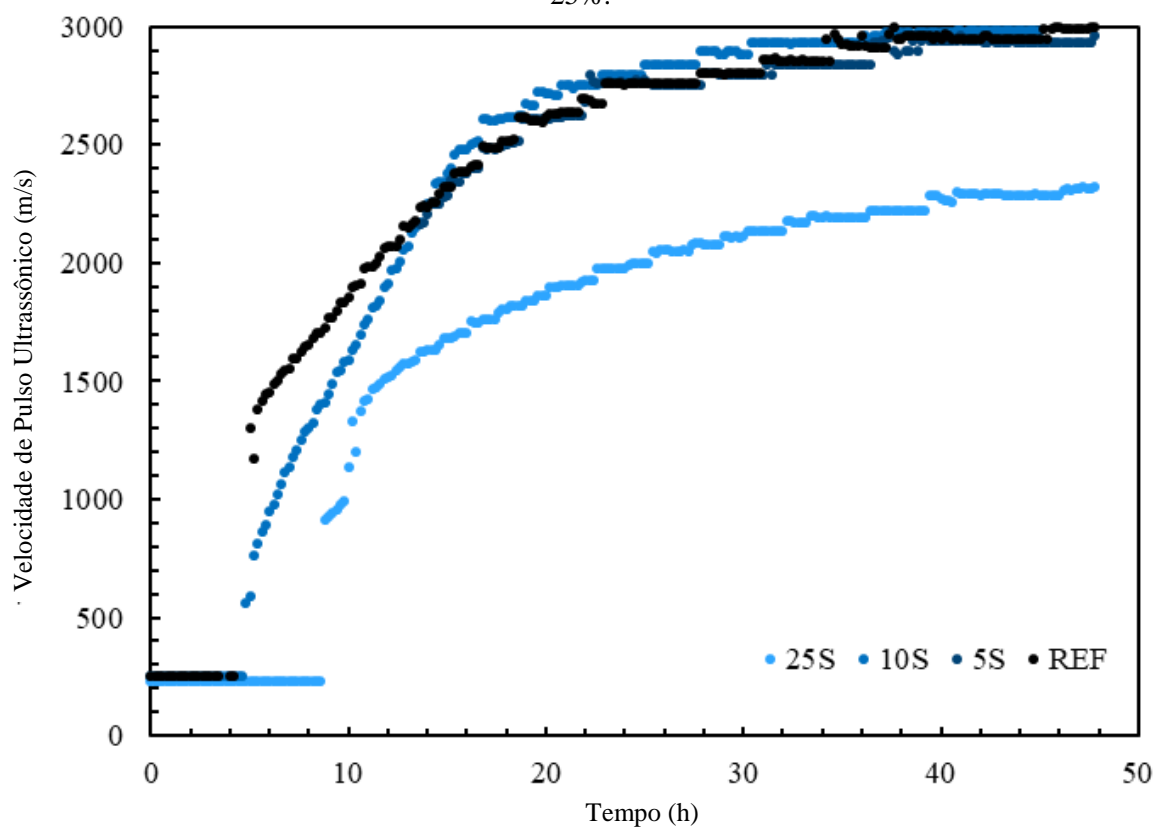


Figura 2.9 - Resultados de UPV da pasta de referência e lodo nos percentuais de 5%, 10% e 25%.

A etapa III caracteriza-se pela redução do volume dos poros por meio do preenchimento com produtos de hidratação; o aumento de UPV diminui e se aproxima dos valores relativos à estrutura sólida (Lee et al., 2004; Zhang et al., 2009).

Os resultados de ensaio de UPV foram medidos nas primeiras 48 horas do período de cura das diferentes pastas. O valor máximo de UPV observado na pasta de referência foi de aproximadamente 3000 m/s. A adição de diferentes teores de cinza na matriz cimentícia não causou mudanças significativas nos valores de UPV, uma vez que os valores máximos observados estiveram entre 2500 e 3000m/s. Com a adição de diferentes teores de lodo, pode-se notar que os nos percentuais de 5 e 10% a UPV foi mantida entre 2500 e 3000 m/s, para os percentuais de 25 e 50% houve uma queda para 2300 e 1500 m/s respectivamente.

O tempo de início de pega t_A das pastas contendo 5% de cinza foi menor do que o aquele observado na pasta de referência, enquanto que nas pastas com maiores teores de cinza - 10, 25 e 50% apresentaram tempo de pega maior ou aproximadamente igual ao da pasta de referência. O tempo final de pega t_B de todas as pastas contendo cinza foi maior. As pastas contendo lodo apresentaram t_A menores que o traço da pasta de referência, exceto com teor de 10%. O t_B das pastas com menores teores de lodo foi maior, enquanto as pastas com maiores teores de lodo apresentaram t_B consideravelmente menor.

A incorporação da cinza não está interferiu no tempo de pega final da matriz cimentícia, o que indica que os ganhos de rigidez observados na pasta de referência e nas pastas contendo cinza, tendem a ser semelhantes nas primeiras idades. A adição de elevados teores de lodo levou a um tempo de pega menor, associado a menores valores de UPV, o que mostra um comprometimento nos ganhos de rigidez da matriz cimentícia nas primeiras idades.

Houve queda na resistência das argamassas para os percentuais de 50% para cinza e para os percentuais de 25 e 50% de lodo comparados ao da argamassa de referência. Esse resultado é consistente com os de UPV para substituição de cimento Portland por lodo em 25 e 50%. Para pastas contendo cinza em 50% de substituição, o valor de UPV se aproximou ao da pasta de referência. Por fim, os valores de resistência a compressão para 5% de cinza aumentaram, porém não foi observado alteração na UPV.

2.3.4 Calorimetria

A Figura 2.10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios das diferentes pastas avaliadas no presente estudo. Durante as primeiras 48 horas, a maior quantidade de calor foi liberada pelas amostras de pastas - REF, S 5%, S10%, A5% e A10%. Isso indica o desenvolvimento de reações

de hidratação mais significativas nas amostras com menor teor de resíduos. Esses resultados são consistentes com os maiores valores de UPV observados nos ensaios ultrassônicos das amostras com esses teores (Figuras 2.8 e 2.9).

Por outro lado, a incorporação de elevados teores de resíduos prejudicou a progressão das reações de hidratação, de tal forma que, os menores valores de calor liberados nos ensaios de calorimetrias, foram observados nas amostras C25%, C50%, L25% e L50%.

Conforme trabalho de Baert et al. (2008), eles também verificaram que a incorporação da cinza afeta a cinética de hidratação do cimento reduzindo o calor emitido durante o ensaio de calorimetria. (Banfill & Frias, 2007) observaram que o lodo de papel acelera a hidratação da pasta de cimento. Os testes foram realizados com e sem superplastificante, mostrando aceleração mais rápida com relação água/aglomerante de 0,4 do que em 0,5, sem o teor de lodo o calor que está sendo emitido é alto, conforme vai aumentando o lodo, diminuindo a intensidade.

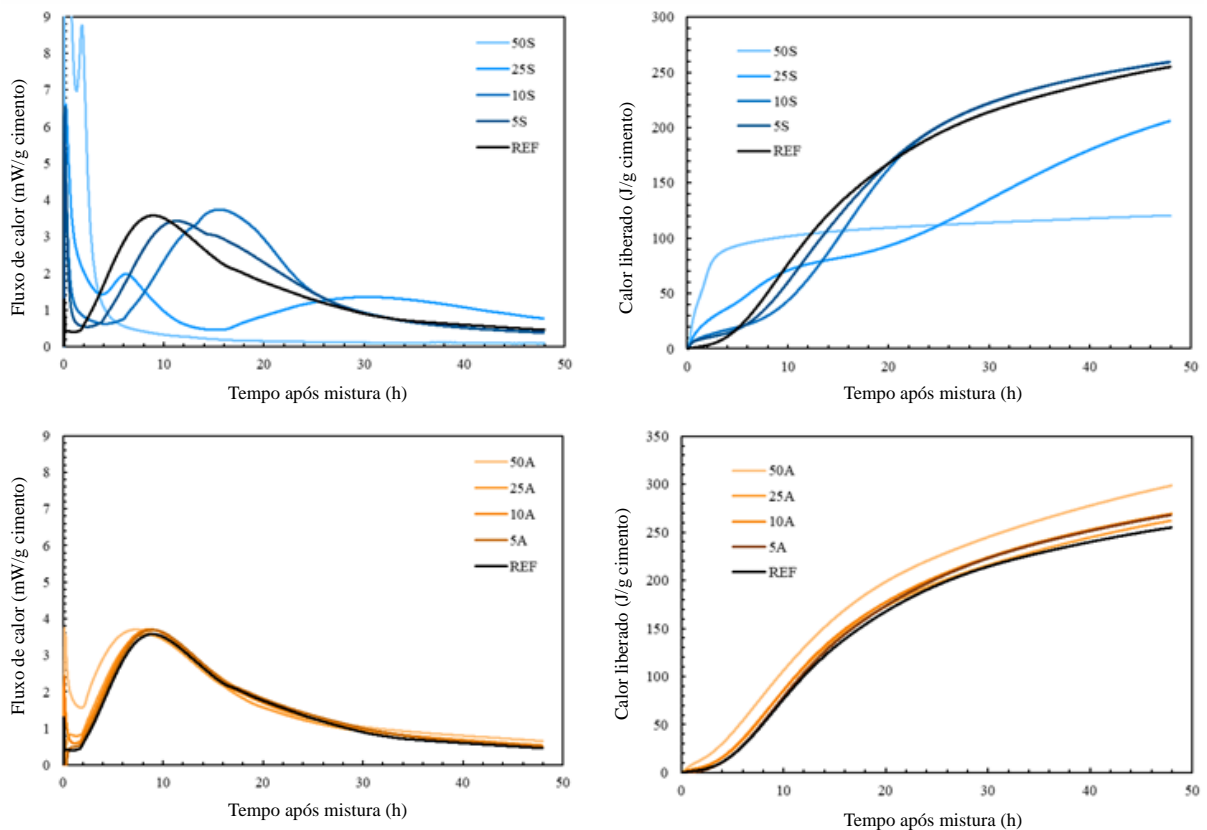


Figura 2.10 - Resultados de calorimetria: a) potência térmica por unidade de peso de materiais cimentícios; b) calor por unidade de peso de materiais cimentícios.

2.3.5 Difração de raios X (DRX)

◆ Portlandita ♣ Etringita ∇ Calcita ☼ Gesso ⌘ C-S-H

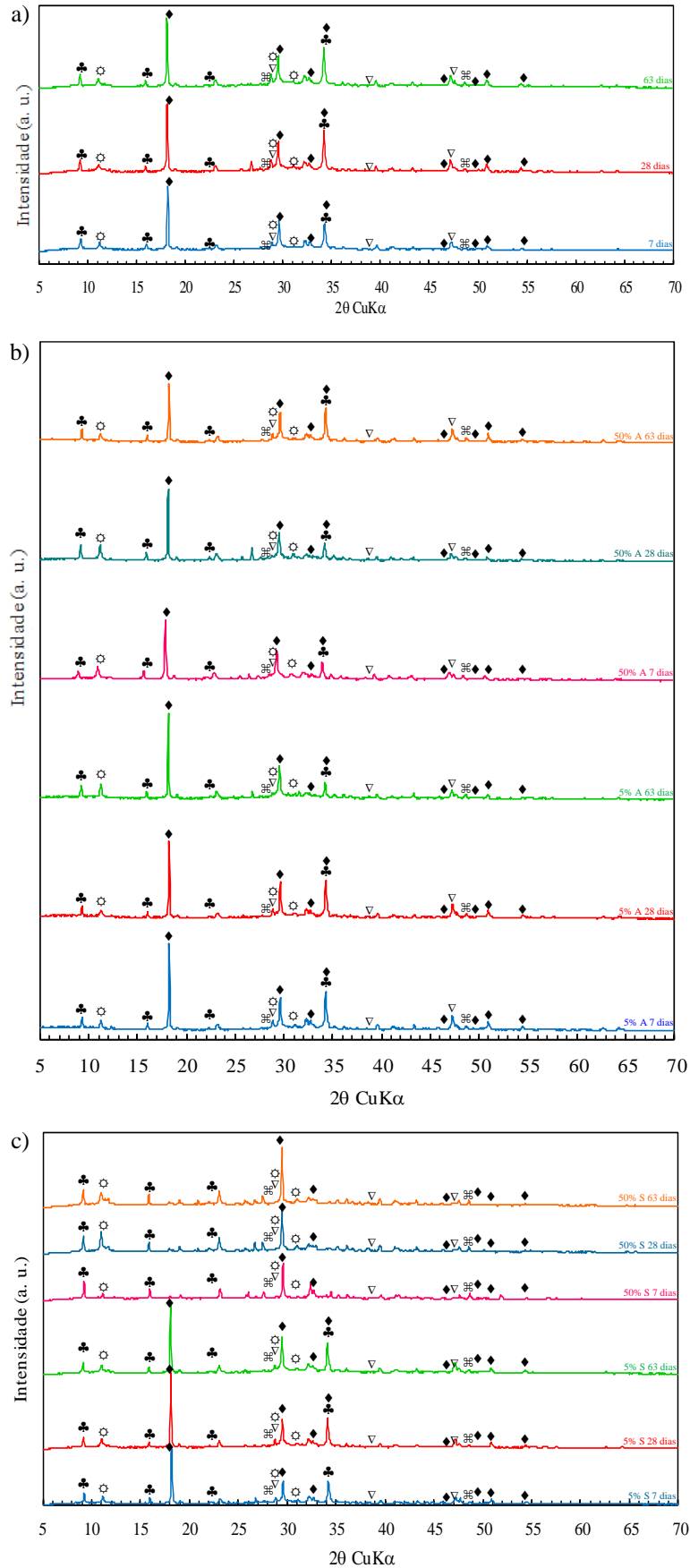


Figura 2.11 - Resultado de DRX: a) argamassa de referência; b) cinza; c) lodo

Apresentam-se na Figura 2.11 os resultados de análise de DRX das pastas com os diferentes teores de resíduos. Foram observados picos de CH de intensidade bastante elevada nas pastas REF, 5%A, 50%A, 5%S em todas as idades. O mesmo não ocorreu com as pastas 50%S em todas as idades. Como o CH é um dos produtos de hidratação do cimento, torna-se possível inferir que os resultados de DRX confirmam reduções das reações de hidratação nas pastas com elevados teores de resíduo de lodo, com elevados decréscimos nos valores de resistência à compressão (Figura 2.7).

Os picos mais intensos de etringita foram observados na pasta 50%S. Como a etringita é um dos primeiros compostos de hidratação formados na matriz cimentícia, tal resultado indica um atraso na cinética de hidratação das pastas com elevado teor de lodo.

2.3.6 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

As bandas de vibração associadas aos diferentes compostos das pastas foram avaliadas com base nos espectros de FTIR ilustrados na Figura 2.12.

A banda em cerca de $900-1050\text{ cm}^{-1}$ tem sido geralmente associada a vibrações de estiramento assimétrico de Si-O no gel de hidratos de silicato de cálcio (C-S-H) (Medina et al., 2018; Malathy et al., 2022; Nalon et al., 2023). Os resultados da Figura 8 indicaram claramente a presença desta banda nos traços referência e nos traços que contém de 5% de resíduos, tanto cinza quanto lodo. Ao contrário essa banda não foi observada nos traços com teores de 50% de resíduos. Esse resultado está em acordo com os resultados de resistência a compressão das argamassas contendo mesmo percentual de resíduos, uma vez que o aumento na formação de estruturas de C-S-H contribui para um aprimoramento da resistência mecânica da matriz cimentícia.

O estiramento das estruturas de hidróxido de cálcio (CH) levou a leves bandas de absorção em 3640 cm^{-1} também verificadas por (Horgnies et al. 2013; Tantawy, 2017 e Yaseen et al., 2019), no caso das pastas de referências e das pastas contendo 5% de resíduos. Porém, essa banda também não foi observada nas pastas com elevado teor de resíduos. Esse resultado também está em acordo com os resultados de resistência a compressão das argamassas uma vez que o CH é um dos produtos da hidratação do cimento que também confere um aumento da resistência a compressão do material.

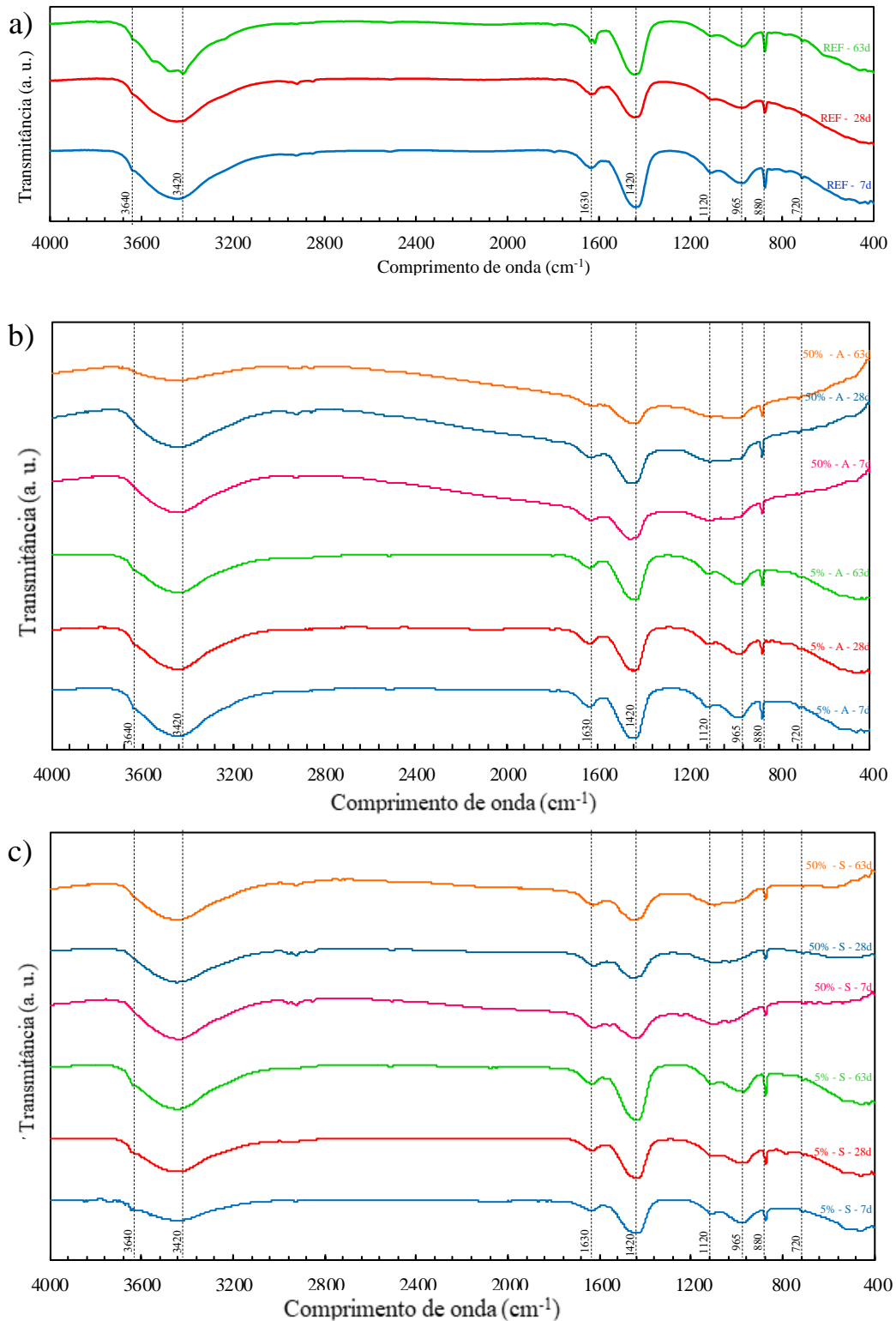


Figura 2.12 - Resultado de FTIR: a) argamassa de referência; b) cinza; c) lodo.

Esses espectros também revelaram bandas de alta intensidade relacionadas à presença de carbonato de cálcio em 713 cm^{-1} , 874 cm^{-1} e $1300\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$, o que pode ser atribuído à modos de vibração simétricos (ν_2 e ν_4) e assimétricos (ν_3), de acordo com Medina et al. (2018), Nalon et al. (2023) e Nasrazadani et al. (2016). Uma vez que o cimento CP V utilizado na produção

das pastas contém adições de até 5% de filler calcário. Portanto, os resultados das análises FTIR também corroboram as hipóteses de que a inclusão dos resíduos reduziu o teor de calcita e, conseqüentemente a resistência da matriz cimentícia, pois a calcita também contribui para o desempenho mecânico da mesma.

As bandas que ocorreram na faixa de 1200-1100 cm^{-1} foram devidas à vibração de estiramento S-O associada à presença dos cristais aciculares de etringita (AFt) (Nasrazadani et al., 2016; Trezza e Lavat, 2001).

Os resultados da Figura 13 indicaram a presença desta banda nos traços referência e nos traços que contém de 5% de resíduos. Todavia essa banda não foi observada nos traços com concentração de 50% de resíduos. A etringita sendo um dos primeiros compostos de hidratação formados na matriz cimentícia, indicando um atraso na cinética de hidratação das pastas com alto teor de resíduos. Novamente, tal resultado está em acordo com os resultados de resistência a compressão, uma vez que o aumento dos cristais de etringita contribui para a resistência mecânica nas primeiras idades.

Também foram observadas faixas intensas em torno de 3400 - 3500 cm^{-1} e 1600 - 1685 cm^{-1} devido à presença de água quimicamente ligada aos compostos hidratados (MOLLAH et al., 2004; Nasrazadani et al., 2016; Trezza & Lavat, 2001).

2.4 Conclusões

Com o aumento do teor de resíduo, foi observado que não houve trabalhabilidade nos teores de 50% para ambos os resíduos, sendo necessário alterar a quantidade de água. Nos ensaios de resistência à compressão houve uma queda considerável nas argamassas contendo maiores teores de resíduos comparada a argamassa de referência.

Pode-se verificar que a incorporação da cinza não está influenciando no tempo de pega final do tempo de pega da matriz cimentícia, indicou que os ganhos de rigidez observados na pasta de referência e nas pastas contendo cinza, tendem a ser semelhantes nas primeiras idades. A adição de elevados teores de lodo levou a um tempo de pega menor, associado a menores valores de UPV, o que mostra um comprometimento nos ganhos de rigidez da matriz cimentícia nas primeiras idades.

Foi observado que durante as primeiras 48 horas, a maior quantidade de calor foi liberada pelas amostras de pastas das argamassas de referência e nas pastas com menores teores de resíduos. Logo, indica um desenvolvimento de reações de hidratação mais significativas nas amostras com menores teores de resíduos. Por outro lado, a incorporação de elevados teores de resíduos

prejudicou a progressão das reações de hidratação, de tal forma que, os menores valores de calor liberados nos ensaios de calorimetrias, foram observados nas amostras de resíduos com maiores percentuais.

Foram observados picos de CH de intensidade bastante elevada nas pastas REF, 5% A, 50% A, 5% S em todas as idades. O mesmo não ocorreu com as pastas 50 %S em todas as idades. Como o CH é um dos produtos de hidratação do cimento, torna-se possível inferir que os resultados de DRX confirmam reduções das reações de hidratação nas pastas com elevados teores de resíduo de lodo, com elevados decréscimos nos valores de resistência à compressão. Os picos mais intensos de etringita foram observados na pasta 50% S, sendo ela um dos primeiros compostos de hidratação formados na matriz cimentícia, tal resultado indica um atraso na cinética de hidratação das pastas com elevado teor de lodo. Nos resultados de FTIR, a etringita sendo um dos primeiros compostos de hidratação formados na matriz cimentícia, demonstrou um atraso na cinética de hidratação das pastas com alto teor de resíduos. Novamente, tal resultado está em acordo com os resultados de resistência a compressão, uma vez que o aumento dos cristais de etringita contribui para a resistência mecânica nas primeiras idades.

3. ARGAMASSAS CONTENDO CINZA DE CAVACO EUCALIPTO E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO: OTIMIZAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA UTILIZANDO UM DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL E A FUNÇÃO DESEJABILIDADE

RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos industriais demanda soluções sustentáveis para sua reutilização. A literatura ainda carece de estudos relacionados à otimização do uso de cinza de eucalipto e lodo de ETE em materiais cimentícios. Este estudo visa preencher essa lacuna ao otimizar a ecoeficiência de argamassas contendo esses resíduos, promovendo práticas mais sustentáveis na construção civil. A metodologia experimental envolveu a utilização de um Delineamento Composto Central (CCD) para definir as composições das argamassas a serem investigadas, além da análise das propriedades mecânicas, incluindo resistência à compressão e resistência à tração na flexão. A função estatística desejabilidade (DSJ) foi aplicada para equilibrar o desempenho mecânico e o consumo sustentável de recursos, buscando a melhor formulação possível para as misturas. Os resultados indicaram que a relação cimento/cal (C/L) tem influência predominante na resistência mecânica, enquanto a adição dos resíduos impactou de forma menos significativa. Análises de regressão com coeficientes de determinação superiores a 80% indicaram boa correlação entre os dados experimentais e os modelos matemáticos desenvolvidos. A aplicação da função DSJ permitiu identificar a composição mais ecoeficiente, sendo o cenário AAS o mais promissor. Os resultados deste estudo contribuem para o desenvolvimento de materiais cimentícios sustentáveis, viabilizando o aproveitamento de resíduos sem comprometer a qualidade das argamassas.

Palavras - chave: Argamassas sustentáveis; Cinza de cavaco de eucalipto; Lodo de ETE; Otimização; Resistência mecânica.

3.1 Introdução

Diferentes tipos de resíduos sólidos são gerados pelos seres humanos em seus vários empreendimentos, abrangendo processos produtivos, existência diária e outras atividades. Assim sendo, eles se dividem em três tipos principais: resíduos domésticos, resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos agrícolas. Com base em dados estatísticos, a produtividade global de resíduos sólidos está crescendo a uma taxa de mais de 100 milhões de toneladas por ano

(Jiang et al., 2024). A inclusão obrigatória de uma porcentagem mínima de resíduos em materiais de construção pode ser uma estratégia eficaz para promover práticas construtivas mais sustentáveis na construção civil (Soliman et al., 2022). Isso implica na reformulação de diversos produtos, considerando as especificidades regionais e os tipos de aplicação.

Resíduos de cinza de caldeira são gerados no processo de incineração de cavacos de eucalipto utilizados em caldeiras de indústrias moveleiras, enquanto o lodo é gerado nas estações de tratamento de esgoto destas indústrias (Gomes et al., 2023). Diversos estudos têm sido realizados sobre a produção de materiais de construção contendo tais resíduos, suas propriedades tecnológicas e sua aplicação (Akinyemi e Dai, 2020). Uma das propostas para a produção de materiais de construção sustentáveis é a incorporação dos resíduos em argamassas (Alghamdi et al., 2023). Os aglomerantes convencionais nelas empregados podem ser parcial ou totalmente substituídos por resíduos, tornando os produtos mais ecológicos e com menor energia incorporada (Almeida et al., 2020).

As empresas do setor moveleiro estão cada vez mais interessadas em desenvolver seus processos para serem mais eficientes em termos de aproveitamento sustentável de recursos. Os impulsionadores decorrentes da legislação e da conscientização do cliente se tornaram mais fortes e as empresas definiram suas próprias metas para enfatizar que prestam atenção à melhoria contínua de seu desempenho ambiental (Linkosalmi et al., 2016). No contexto da presente pesquisa, destaca-se a busca da empresa Itatiaia Móveis S/A (Ubá, Brasil) por soluções viáveis para a destinação adequada dos resíduos que gera no processo de produção moveleira. Levantamentos mais recentes indicam que é gerada grande quantidade de resíduos no processo de produção nas unidades localizadas em Ubá/MG e Sooretama/ES, razão pela qual a empresa vem buscando alternativas para reaproveitar resíduos do processo de incineração de cavacos de eucalipto usados nos aquecedores que geram as cinzas com média anual de 51 toneladas, além de resíduos de lodos advindos da estação de tratamento de esgoto (ETE) com valor aproximado de 80 toneladas/ano (Gomes et al., 2023).

Apesar da existência de diversos estudos que abordam os efeitos da incorporação de cinzas de madeira (Dawood et al., 2020; Fusade et al., 2019; Martínez-García et al., 2022) e lodo de ETE (Krejcirikova et al., 2019; Liang et al., 2022; Pan et al., 2003) em matrizes cimentícias, ainda não há um método consolidado voltado para a otimização da ecoeficiência destes materiais. A ausência de critérios sistemáticos para orientar a dosagem de argamassas à base de resíduos da indústria moveleira é um dos principais fatores que limitam a aplicação em larga escala desses tipos de materiais.

Ainda não foram publicados na literatura estudos da combinação de diferentes tipos de resíduos da indústria moveleira para produção de argamassas industrializadas, com foco na otimização da ecoeficiência do material. Desta forma, esta pesquisa pretende preencher essa lacuna, apresentando as seguintes contribuições para a literatura: (i) avaliação da viabilidade técnica da incorporação de cinza de eucalipto e lodo de ETE gerados pela indústria moveleira Itatiaia Móveis S/A em matrizes cimentícias, por meio da substituição parcial de aglomerantes convencionais; (ii) proposição do uso de um delineamento composto central e da função estatística DSJ para quantificação de um indicador de ecoeficiência para as argamassas produzidas, e (iii) otimização da ecoeficiência das argamassas, com vista ao futuro desenvolvimento de argamassas industrializadas aplicáveis no assentamento de alvenarias e revestimento de tetos e paredes das construções.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Materiais

Cimento Portland (PC) de alta resistência inicial (equivalente ASTM Tipo III) foi usado para produzir as argamassas. No Brasil, esse cimento é especificado pela norma NBR 16697 (ABNT NBR 16697, 2018) como CP V. A escolha desse cimento está relacionada à sua menor quantidade de adições minerais. O cimento utilizado apresentou massa específica de $3,05 \text{ g/cm}^3$, resistência à compressão aos 28 dias de $50,7 \text{ MPa}$ e D50 de aproximadamente $12 \text{ }\mu\text{m}$. Também foi utilizada a cal hidratada comum, especificada pela NBR 7175 (ABNT, 2003) como CH-III, cuja massa específica é igual a $2,39 \text{ g/cm}^3$. Diferentes tipos de agregados miúdos naturais foram utilizados neste estudo. Areia quartzosa com massa específica igual a $2,6 \text{ g/cm}^3$ foi empregada como agregado natural, em associação com uma areia artificial britada, de origem gnáissica, com uma massa específica igual a $2,86 \text{ g/cm}^3$.

Dois diferentes tipos de resíduos foram coletados de forma representativa na indústria Itatiaia Móveis S/A: os resíduos de cinza de caldeira, que é subproduto da incineração de cavacos de eucalipto utilizados na geração de energia para o aquecimento das caldeiras nos processos industriais; e lodo químico da ETE. Os resultados obtidos para densidades dos resíduos de cinza e lodo foram de $2,96 \text{ g/cm}^3$ e $1,82 \text{ g/cm}^3$ respectivamente. O lodo se mostrou um material um pouco mais fino que a cinza, com um D50 de aproximadamente $55 \text{ }\mu\text{m}$. Com um D50 pouco menor que $80 \text{ }\mu\text{m}$, a cinza de eucalipto apresentou uma distribuição granulométrica um pouco mais uniforme que a do lodo.

3.2.2 Métodos

O planejamento composto central (CCD) de Box e Wilson em 1951 consiste em uma evolução do planejamento fatorial 2^k ou fatorial fracionário 2^{k-p} aumentado com pontos centrais e pontos axiais, oferecendo uma solução para problemas que necessitam de muitos experimentos para um pequeno número de fatores (Teófilo & Ferreira, 2006). No método CCD, há três grupos de pontos de projeto: a) pontos axiais simbolizados como pontos de estrela localizados nos eixos com uma distância de $\pm \alpha$; b) pontos fatoriais situados nos vértices do cubo, com + 1 e -1 em valores codificados; c) e finalmente ponto central, no centro do cubo, com um valor codificado de zero para todas as variáveis (Ferdosian; Camões, 2017). De acordo com Adamu et al. (2021), diferentes tipos de modelos de análise de metodologia de superfície de resposta podem ser usados para gerar equações matemáticas entre as variáveis de entrada e suas respostas. Ao utilizar a função (DSJ) em conjunto com o CCD, é possível determinar as melhores condições para as variáveis de entrada, maximizando a eficiência e a precisão dos experimentos,

Um Delineamento Composto Central (CCD) foi o método utilizado para determinar a influência da composição da argamassa no desempenho da mesma e na obtenção de valores ótimos. Foram avaliados quatro fatores em cinco níveis reais, sendo eles: C/L – razão cimento/cal variando de 0,16 a 0,84; F/B – razão agregados/aglomerantes variando de 1,5 a 3,5; A/B - razão cinza/aglomerantes variando de 5 a 25%; S/B = razão lodo/aglomerantes variando de 3 a 15%. Apresenta-se na Tabela 3.1 a amostragem do planejamento experimental desenvolvido, em níveis codificados e níveis reais, utilizando-se o software de análise estatística Minitab® 19. A significância estatística e a abordagem de DSJ foram utilizadas para entender e avaliar os efeitos dos tratamentos na ecoeficiência dos compósitos, representada por uma combinação de parâmetros como resistência à compressão, resistência à tração, consumo de aglomerantes (cal e cimento) e incorporação de resíduos da indústria moveleira (cinzas e lodo).

Tabela 3.1 - Delineamento Composto Central utilizado no presente estudo.

Série	Níveis codificados				Níveis reais				W/B
	C/L	F/B	A/B	S/B	C/L	F/B	A/B (%)	S/B (%)	
1	-1	-1	-1	-1	0,33	2	10	6	0,73
2	1	-1	-1	-1	0,67	2	10	6	0,70
3	-1	1	-1	-1	0,33	3	10	6	0,87
4	1	1	-1	-1	0,67	3	10	6	0,85
5	-1	-1	1	-1	0,33	2	20	6	0,84
6	1	-1	1	-1	0,67	2	20	6	0,74
7	-1	1	1	-1	0,33	3	20	6	0,88
8	1	1	1	-1	0,67	3	20	6	0,89

Série	Níveis codificados				Níveis reais				W/B
	C/L	F/B	A/B	S/B	C/L	F/B	A/B (%)	S/B (%)	
9	-1	-1	-1	1	0,33	2	10	12	0,79
10	1	-1	-1	1	0,67	2	10	12	0,75
11	-1	1	-1	1	0,33	3	10	12	0,92
12	1	1	-1	1	0,67	3	10	12	0,83
13	-1	-1	1	1	0,33	2	20	12	0,81
14	1	-1	1	1	0,67	2	20	12	0,78
15	-1	1	1	1	0,33	3	20	12	0,96
16	1	1	1	1	0,67	3	20	12	0,92
17	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84
18	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84
19	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84
20	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84
21	-2	0	0	0	0,16	2,5	15	9	0,87
22	2	0	0	0	0,84	2,5	15	9	0,80
23	0	-2	0	0	0,50	1,5	15	9	0,69
24	0	2	0	0	0,50	3,5	15	9	0,99
25	0	0	-2	0	0,50	2,5	5	9	0,81
26	0	0	2	0	0,50	2,5	25	9	0,90
27	0	0	0	-2	0,50	2,5	15	3	0,85
28	0	0	0	2	0,50	2,5	15	15	0,90
29	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84
30	0	0	0	0	0,50	2,5	15	9	0,84

Notas: C/L = razão cimento/cal; F/B = razão agregados/aglomerantes; A/B = razão cinza/aglomerantes; S/B = razão lodo/aglomerantes; W/B = razão água/aglomerantes. Todas as razões citadas foram fornecidas em termos de massa.

Os corpos de prova de argamassa foram produzidos com base na Tabela 3.1. Logo, foram consideradas quatro variáveis independentes: relação cimento/cal (C/L), relação agregado miúdo/aglomerantes (F/B), relação cinza/aglomerantes (A/B) e relação lodo/aglomerantes (S/B). Foram moldados três corpos de prova para cada traço (Figura 3.1), em forma prismática coberta com óleo desmoldante, de dimensões 40x40x160 mm, para realização de ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, após períodos de cura em câmara úmida com temperatura de 22°C ±2 e umidade relativa do ar em 90% ±2 nos períodos de 7 e 28 dias, a desforma foi realizada após 24 horas da moldagem dos corpos de prova. Para preparação das argamassas foi utilizado um misturador mecânico. A quantidade de água foi ajustada de acordo com cada mistura, de modo a se obter uma trabalhabilidade de 260±10 mm, de acordo com as recomendações da NBR 13276 (NBR 13276, 2016) para a aplicação proposta neste trabalho. A relação água/aglomerantes (W/B) requerida em cada série para atendimento ao requisito de trabalhabilidade foi apresentada na Tabela 3.1.



Figura 3.1 - Moldagem dos corpos de prova em forma prismática.

3.2.3 Caracterização das argamassas produzidas

Ensaio mecânicos foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC modelo DL60000, do Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFV. Para determinar a resistência à tração na flexão, a carga foi aplicada no meio do vão do corpo de prova prismático, na configuração de ensaio de flexão a 3 pontos, utilizando-se uma taxa de incremento de força de 50N/s até a ruptura do corpo de prova (Figura 3.2a). Considerou-se que a ruptura ocorreu quando a força aplicada sofreu uma redução de 20% com relação ao máximo alcançado. A resistência à compressão foi determinada utilizando-se cada uma das duas metades do corpo de prova previamente ensaiado à flexão (Figura 3.2b). Para realização deste ensaio, foi utilizada uma chapa de aço com área de 40x40 mm para realizar uma distribuição uniforme da carga sobre a superfície do corpo de prova. A carga foi aplicada a uma taxa de incremento de força de 500 N/s até a ruptura do corpo de prova. Novamente, considerou-se que houve ruptura quando houve uma queda de 20% na força aplicada.

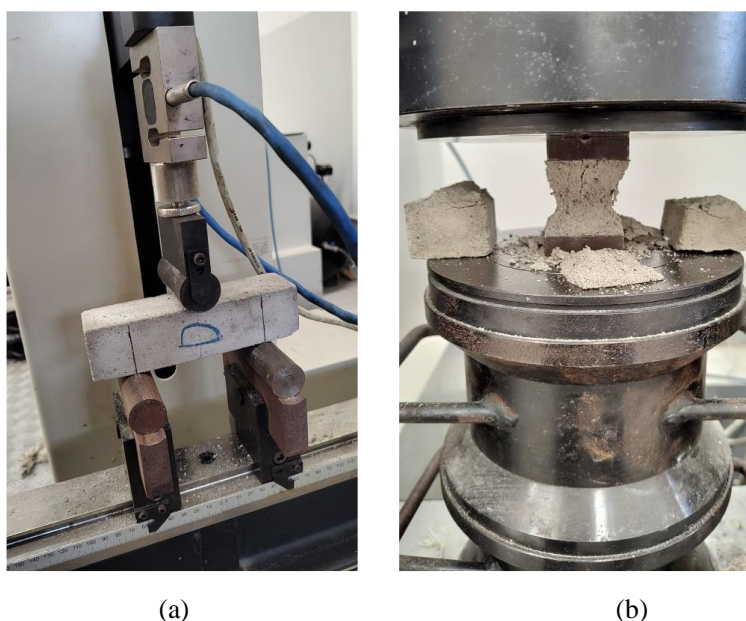


Figura 3.2 - (a) ensaios de determinação da resistência à tração na flexão; (b) e à compressão das argamassas.

3.2.4 Análises estatísticas dos resultados

Após a obtenção dos resultados dos ensaios mecânicos, foi realizada análise estatística baseada no ajuste de modelos polinomiais de mistura aos dados experimentais, para um nível de significância (p-valor) menor que 0,05. Também foi determinado o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), para verificação do ajuste do modelo desenvolvido aos dados experimentais.

A quantificação e otimização da ecoeficiência dos compósitos se deram através da função estatística DSJ, a qual envolve a transformação de cada variável resposta para um valor de DSJ individual entre 0 e 1 (zero indicando um valor inaceitável e 1 indicando um valor mais desejável). A seguir, foi determinada a DSJ global de cada argamassa, utilizando-se a média geométrica das DSJs individuais. A proporção ideal dos componentes é aquela cujo valor da DSJ total estiver mais próximo de um.

Para que a DSJ global contemplasse não apenas variáveis respostas relacionadas ao desempenho mecânico do material (resistência à compressão e resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura), também foram considerados aspectos relacionados à baixo impacto ambiental (consumo de lodo, cinza, cal e cimento). Além disso, o cálculo da DSJ individual variou com o tipo de avaliação pretendida para cada resposta (maximização, ou minimização) e com os limites mínimo e máximo desejados. Três diferentes cenários de avaliação foram considerados para computação dos valores de DSJ, os quais estão descritos na Tabela 3.2. Esses cenários foram definidos de acordo com o consumo dos resíduos, sendo AS – percentuais próximos de cinza e lodo, AAS – maior percentual de cinza comparado ao lodo; e ASS – maior percentual de lodo em comparado a cinza.

Nos três cenários investigados, todos priorizaram a redução do consumo de cimento; o consumo dos resíduos lodo e cinza foram priorizados para aumentar o reaproveitamento dos resíduos; e o desempenho mecânico foi considerado o de menor importância juntamente com o consumo da cal. Esses traços foram analisados com base em propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração na flexão) e parâmetros de sustentabilidade (consumo de resíduos, cimento e cal), sendo atribuído pesos diferentes de acordo com a esses parâmetros.

Tabela 3.2 - Cenários de otimização investigados no presente estudo.

Cenário	Resposta	Meta	Peso
AS	Consumo de lodo	Máximo	2
	Consumo de cinza	Máximo	2
	Consumo de cal	Mínimo	1
	Consumo de cimento	Mínimo	3
	Resistência à compressão	Máximo	1
	Resistência a tração	Máximo	1

Cenário	Resposta	Meta	Peso
AAS	Consumo de lodo	Mínimo	2
	Consumo de cinza	Máximo	2
	Consumo de cal	Mínimo	1
	Consumo de cimento	Mínimo	3
	Resistência à compressão	Máximo	1
	Resistência a tração	Máximo	1
ASS	Consumo de lodo	Máximo	2
	Consumo de cinza	Mínimo	2
	Consumo de cal	Mínimo	1
	Consumo de cimento	Mínimo	3
	Resistência à compressão	Máximo	1
	Resistência a tração	Máximo	1

Nota: AS = cenário com teores próximos de cinza e lodo; AAS = maior percentual de cinza comparado ao lodo; ASS = cenário de maior percentual de lodo comparado à cinza.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Caracterização e desempenho mecânico

Estão apresentados na Figura 3.3 os resultados de resistência a tração na flexão e resistência a compressão dos corpos de prova produzidos neste estudo. Após um período de cura de 28 dias, as argamassas das séries 3, 5 e 21 apresentaram os menores valores de resistência à tração na flexão (0,93; 0,82 e 0,88 MPa, respectivamente) e resistência à compressão (2,40; 2,12 e 1,50 MPa, respectivamente), o que pode ser atribuído principalmente ao baixo valor da relação C/L das séries (0,16 e 0,33). As argamassas das séries 2, 6, 10, 14, 22 e 24 apresentaram os maiores valores de resistência à tração na flexão (3,39; 3,64; 3,90; 3,60; 4,38 e 3,39 MPa, respectivamente) e resistência à compressão (15,57; 14,28; 14,60; 14,55; 17,33 e 11,91 MPa, respectivamente), o que está principalmente relacionado ao elevado valor da relação C/L dessas séries (0,50 a 0,84).

Os resultados da Figura 3.3 também indicam um aumento dos valores de resistência mecânica dos 7 aos 28 dias. Por exemplo, os valores de resistência à tração na flexão das argamassas aos 7 dias de cura variaram entre 41% e 84% dos valores obtidos após um período de cura de 28 dias. Os valores de resistência à compressão aos 7 dias de cura variaram entre 45% e 80% dos valores medidos após um período de cura de 28 dias. Os menores acréscimos de resistência ao longo do tempo de cura foram observados nas argamassas das séries 1, 3, 7, 8, 9, 11, 15, 21 e 27, as quais contêm menor relação C/L (0,16 a 0,33). Os maiores acréscimos de resistência foram observados nas argamassas das séries 2, 6, 10, 12, 14, 22 e 25, as quais foram produzidas com elevada relação C/L (0,50 a 0,84).

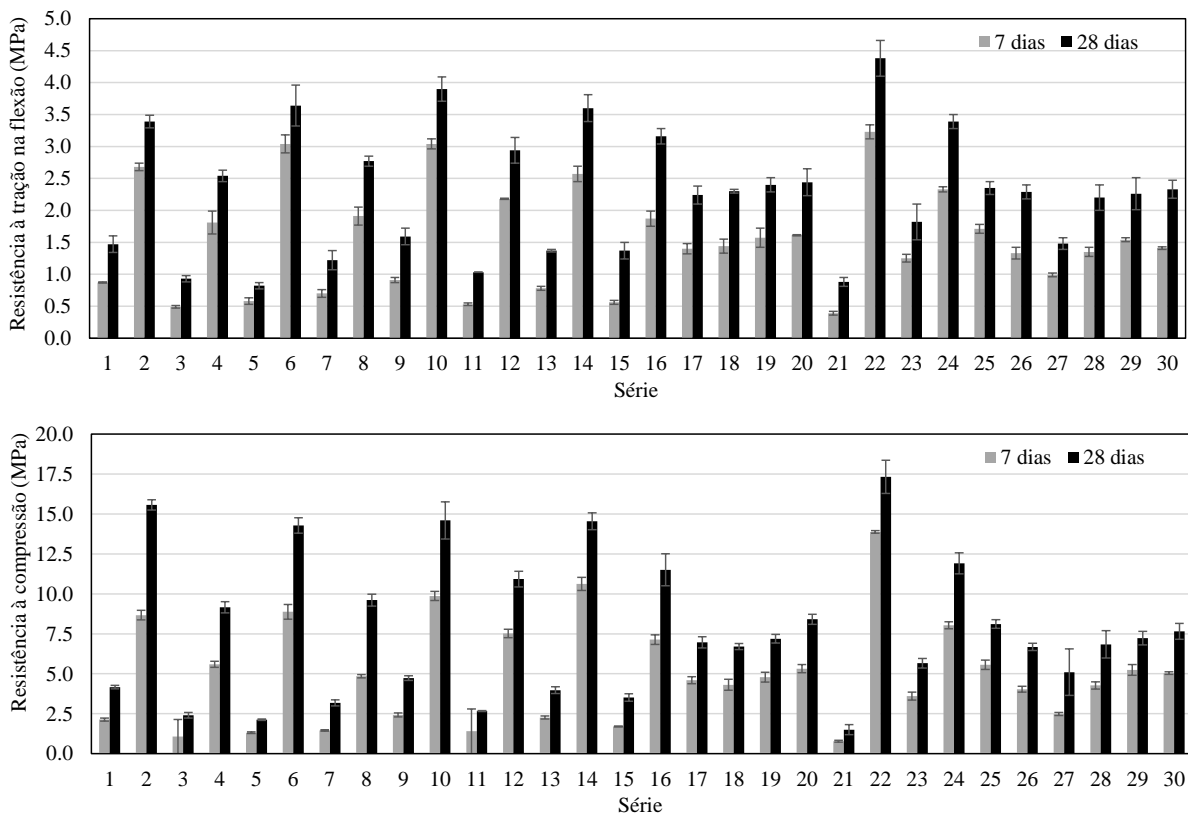


Figura 3.3 - Resultados de resistência à tração na flexão (a) e resistência à compressão (b) das argamassas produzidas, após períodos de cura de 7 e 28 dias.

Com o auxílio do software Minitab®19 foi possível obter um modelo de regressão para ajuste dos resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, os quais apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2_{aj}) acima de 80%, o que sugere a adequabilidade do modelo desenvolvido aos resultados obtidos experimentalmente. Abubakar et al. (2024) também realizaram um estudo de proporção de mistura ótima e modelagem de resistência à compressão de concreto contendo pó de pedra usando metodologia de superfície de resposta, obtiveram como resultado um coeficiente de determinação (R^2_{aj}) para o modelo de 75,69%, considerando razoavelmente alto.

Tanto para o período de cura de 7 dias, quanto para o período de cura de 28 dias, somente o fator razão C/L influenciou significativamente a resposta mecânica, do ponto de vista estatístico (para um nível de significância de 5%). Logo, de acordo com as equações de regressão obtidas para os parâmetros de resistência mecânica, o que mais influenciou significativamente na capacidade de resistência foi a relação entre o teor de cal e cimento, e não as dosagens de resíduos adicionadas às misturas (Tabela 3.3) que não tiveram influências significativas, considerando um nível de significância de 5%.

Tabela 3.3 - Equações de regressão para as argamassas aos 7 e 28 dias.

Parâmetro	Idade	Equações de regressão	R ² (%)
Resistência à tração na flexão	7 dias	$1,5357 + 0,8067 \times (C/L)$	81,24
	28 dias	$2,2833 + 0,9642 \times (C/L)$	82,32
Resistência à compressão	7 dias	$4,502 + 3,150 \times (C/L) + 0,572 \times (C/L)^2$	81,27
	28 dias	$7,807 + 4,381 \times (C/L)$	82,80

Legenda: C/L – Relação Cimento/cal; R² – Coeficiente de determinação.

Nas Figuras 3.4 e 3.5 estão apresentados os efeitos da relação C/L na resistência à tração na flexão e na resistência à compressão das argamassas, respectivamente. Tais figuras também evidenciam que a relação C/L foi o fator preponderante para os valores obtidos de resistência mecânica das argamassas contendo cinzas de eucalipto e lodo de ETE.

He et al. (2025) realizaram um estudo de otimização de argamassa ativada por álcalis utilizando cinzas e escórias de incineradores de resíduos sólidos urbanos usando uma abordagem de método de superfície de resposta multiobjectivo e obtiveram valores de R² para resistência à compressão em 28 dias e resistência à flexão em 28 dias foram de 0,9908 e 0,9885, respectivamente, indicando alta precisão do modelo.

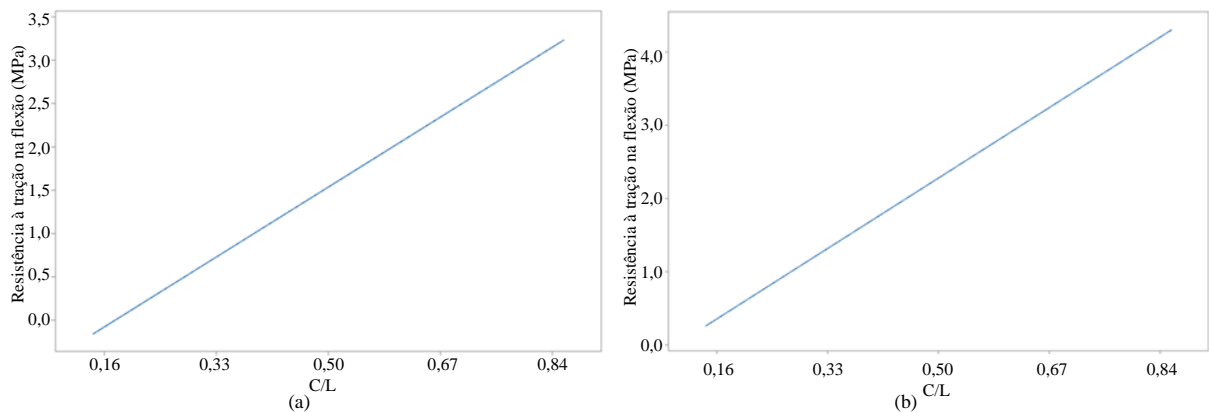


Figura 3.4 - Gráfico de efeitos principais para médias ajustadas: a) resistência à tração na flexão aos 7 dias; b) resistência à tração na flexão aos 28 dias.

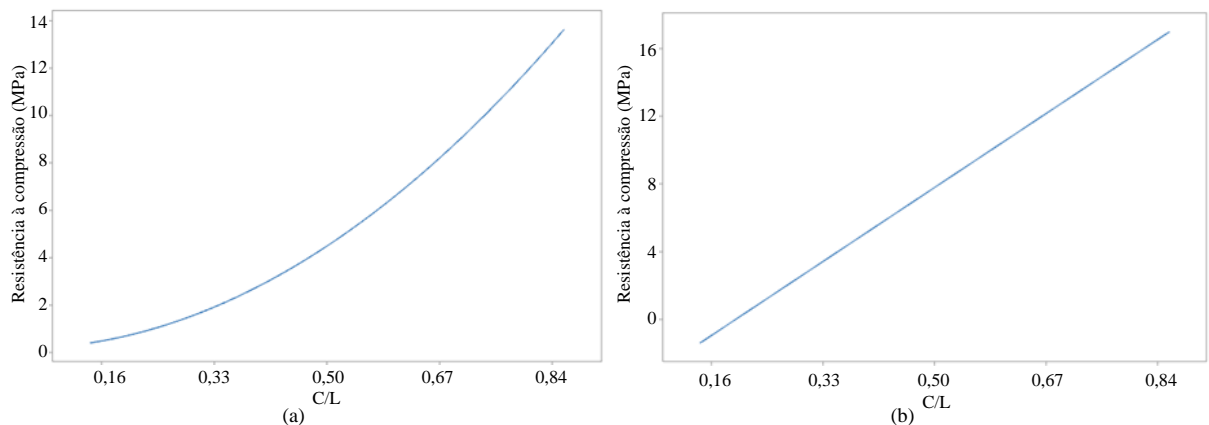


Figura 3.5 - Gráfico de efeitos principais para médias ajustadas: a) resistência à tração na flexão aos 7 dias; b) resistência à tração na flexão aos 28 dias.

Os resultados apresentados nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 e na Tabela 3.3 estão de acordo com dados obtidos em pesquisas anteriores relacionados aos efeitos da adição de elevados teores de cal em matrizes cimentícias. Por exemplo, estudos realizados por Arizzi e Cultrone (2012) avaliaram argamassas contendo cal calcítica e cal dolomítica após 28 dias de cura, indicando que os corpos de prova com cal dolomítica atingiram resistências mecânicas bastante baixas devido ao estágio inicial de carbonatação. Arandigoyen e Alvarez (2007) realizaram um comparativo de argamassas com diferentes teores de cal e cimento, também observando grande variação nas propriedades mecânicas. Quando foram adicionados teores de cimento de até 40%, a resistência mecânica das argamassas de cal aumentou ligeiramente, enquanto que nas argamassas de cimento, a resistência mecânica diminuiu consideravelmente quando foi adicionada uma pequena quantidade de cal. Por exemplo, a adição de 25% de cal causou uma perda de 50% da resistência. Drougkas et al. (2016) avaliaram a resistência à compressão e a rigidez de alvenaria produzida com argamassas de cal, ficando evidente sua baixa resistência mecânica.

A relação cimento/cal (C/L) tem uma influência muito maior na resistência mecânica das argamassas do que a adição de resíduos como cinza de eucalipto e lodo de ETE. Isso sugere que, embora a incorporação de resíduos seja relevante para a sustentabilidade, seu impacto na resistência é menos expressivo do que o teor de cimento e cal. Todavia, é importante lembrar que a concentração dos resíduos adicionados pode afetar outras propriedades das argamassas (como aquelas relacionadas à trabalhabilidade e à durabilidade do material), mas não é o principal fator determinante da resistência mecânica. A composição química dos resíduos pode influenciar sua reatividade na matriz cimentícia. No entanto, os resultados indicam que, mesmo com variações na quantidade de cinza e lodo, o fator preponderante para a resistência foi a relação C/L. Assim, tanto a concentração quanto a composição dos resíduos são fatores secundários no desempenho mecânico, sendo a relação C/L o principal elemento determinante.

3.3.2 Otimização dos compósitos cimentícios

Os três cenários de otimização investigados na presente pesquisa (Figura 3.6) buscam melhorar a resistência mecânica e a utilização de resíduos.

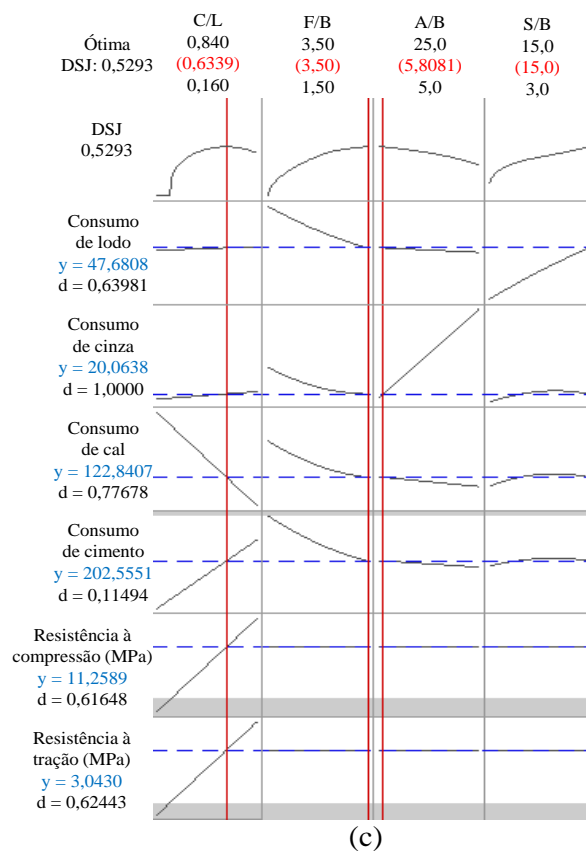
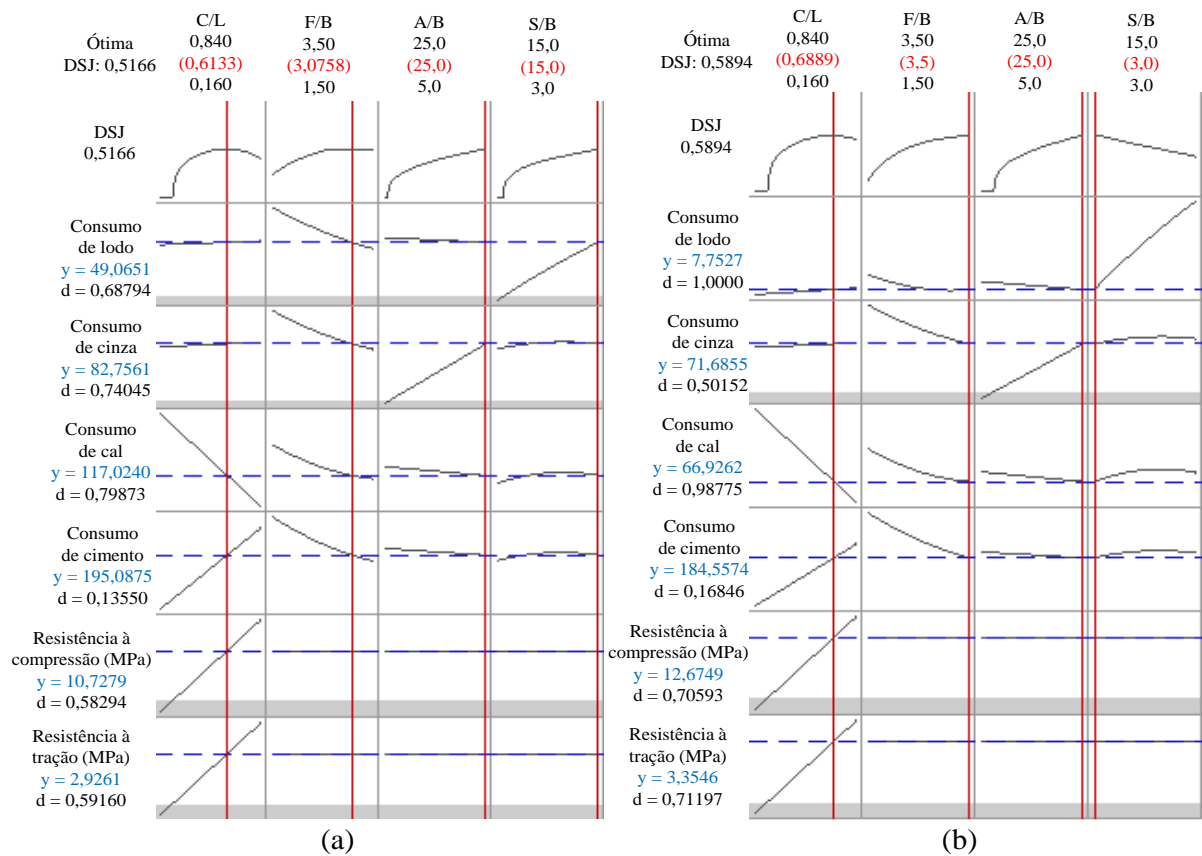


Figura 3.6 - Cenários de otimização: a) AS; b) AAS; c) ASS

Os dados apresentados sintetizam o resultado do processo de otimização para os cenários AS, AAS e ASS, mostrando a proporção ótima de componentes das misturas (C/L, F/B, A/B, S/B). Esses cenários foram desenvolvidos para encontrar a melhor composição de argamassas considerando o equilíbrio entre resistência mecânica e sustentabilidade ambiental. O processo de otimização foi conduzido por meio da função estatística de desejabilidade (DSJ), permitindo identificar a composição mais eficiente em termos de desempenho técnico e consumo ótimo de resíduos.

Conforme mostra a Figura 3.6, o cenário AS priorizou o máximo consumo de lodo e cinza, minimizando o uso de cal e cimento. O objetivo deste cenário foi maximizar a incorporação de resíduos sem comprometer significativamente a resistência mecânica. Os resultados indicaram que, embora a resistência tenha sido satisfatória, a desejabilidade global (DSJ = 0,5166) foi a menor entre os três cenários. Isso sugere que, apesar da elevada incorporação de resíduos, o desempenho mecânico foi impactado devido à menor quantidade de cimento e cal na mistura. Arandigoyen e Alvarez (2007) afirmam que existem várias características atribuídas às argamassas à base de cal, sendo a pega lenta que dificulta e atrasa o trabalho quando usado para restauração; e argamassas de cal apresentam resistências menores do que argamassas de cimento e levam mais tempo para alcançá-las. Quando uma proporção de 0 – 40% de cimento é adicionado a argamassas à base de cal, sua resistência mecânica aumenta ligeiramente. Em argamassas de cimento, a resistência mecânica diminui acentuadamente com a adição de uma pequena quantidade de cal (25% de cal resulta em uma queda de resistência de cerca de 50%). O cenário AAS apresentou a melhor ecoeficiência global, com um DSJ de 0,5894, o maior entre os três cenários. Esse desempenho se deve à estratégia de maximização do consumo de cinza e minimização do lodo, mantendo um equilíbrio adequado entre resistência mecânica e sustentabilidade. A proporção otimizada de cimento e cal garantiu que a resistência à compressão e à tração na flexão fosse adequada, ao mesmo tempo que permitiu a substituição parcial dos aglomerantes convencionais por resíduos da indústria moveleira. Este cenário se destacou como o mais promissor para aplicações sustentáveis na construção civil. O objetivo do cenário ASS, foi maximizar o consumo de lodo, mas minimizar o uso de cinza. Esse equilíbrio resultou em uma DSJ de 0,5293, ligeiramente superior ao cenário AS, mas ainda inferior ao cenário AAS. A menor quantidade de cinza pode ter reduzido o efeito pozolânico da mistura, impactando negativamente a resistência mecânica. No entanto, esse cenário ainda representa uma alternativa viável, pois permite um alto aproveitamento do lodo da ETE sem comprometer drasticamente a qualidade da argamassa.

A análise comparativa dos três cenários evidencia que a relação entre os componentes tem um impacto direto na resistência mecânica e na ecoeficiência da argamassa. O cenário AAS foi o mais equilibrado, apresentando o maior valor de DSJ e garantindo um bom desempenho técnico aliado ao baixo impacto ambiental. Assim, ele se destaca como a melhor alternativa para a produção de argamassas ecoeficientes, promovendo a economia circular sem comprometer a qualidade do material final.

Na Tabela 3.4 estão apresentados os valores de DSJ global obtidos para cada amostra otimizada, considerando os pesos listados na Tabela 3.2. Essa análise é essencial para compreender a relação entre a composição dos materiais e a ecoeficiência do compósito, equilibrando desempenho mecânico e sustentabilidade ambiental. Os três cenários analisados (AS, AAS e ASS) apresentam diferentes combinações de proporções de cimento, cal, cinza e lodo. A variável mais impactante na resistência mecânica foi a razão cimento/cal (C/L), enquanto os resíduos adicionados (cinza e lodo) exerceram menor influência direta.

O cenário AS (DSJ = 0,5166) possui maior teor de cinza (25%) e lodo (15%); menor relação C/L (0,6133). Apesar do elevado teor de resíduos, o desempenho mecânico foi o mais baixo dos três cenários, evidenciando que a substituição excessiva de aglomerantes convencionais pode comprometer a resistência das argamassas

O cenário AAS (DSJ = 0,5894) possui maior ecoeficiência global, com o maior valor de DSJ, mantém o alto teor de cinza (25%) e reduz significativamente o lodo (3%); apresenta a maior relação C/L (0,6889), favorecendo a resistência mecânica. Esse cenário representa o melhor equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho mecânico, tornando-se a opção mais viável para aplicação prática.

O cenário ASS (DSJ = 0,5293) apresentou baixa incorporação de cinza (5,8%) e alto teor de lodo (15%); relação C/L intermediária (0,6339); apresentou um DSJ superior ao AS, mas inferior ao AAS, indicando que a redução da cinza não favorece a resistência mecânica tanto quanto a redução do lodo.

Portanto, os resultados mostram que o cenário AAS foi o mais eficiente, apresentando a melhor combinação entre desempenho mecânico e sustentabilidade. Esse cenário otimiza a incorporação de resíduos sem comprometer significativamente a resistência da argamassa, validando a metodologia de otimização adotada. Dessa forma, ele se destaca como a melhor alternativa para o desenvolvimento de argamassas sustentáveis na construção civil.

Os resultados de resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas otimizadas são apresentados na Tabela 3.5. Inicialmente, 30 traços experimentais foram

desenvolvidos utilizando um Delineamento Composto Central (CCD), conforme apresentado na Tabela 3.1. Após a obtenção dos dados experimentais, foi aplicada a função estatística de DSJ, que permitiu identificar as formulações mais ecoeficientes. Com base nos resultados dessa otimização, foram selecionados três traços finais, correspondentes aos cenários AS, AAS e ASS, apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Traços otimizados e DSJ global das amostras.

Níveis reais								
Traços	C/L	F/B	A/B (%)	S/B (%)	Retentor de água (%)	Incorporador de ar (%)	W/B	DSJ
AS	0,6133	3,0758	25	15	0,1	0,0045	0,6	0,5166
AAS	0,6889	3,5	25	3	0,1	0,0015	0,6	0,5894
ASS	0,6339	3,5	5,8081	15	0,1	0,0045	0,6	0,5293

Nota: C/L = razão cimento/cal; F/B = razão agregados/aglomerantes; A/B = razão cinza/aglomerantes; S/B = razão lodo/aglomerantes; W/B = razão água/aglomerantes; DSJ = desejabilidade.

Para validar a otimização e analisar o desempenho das misturas otimizadas, novos corpos de prova foram moldados especificamente para esses três traços otimizados. Os ensaios mecânicos realizados comprovaram que, embora nenhum dos três traços otimizados tenha apresentado as maiores resistências absolutas obtidas nessa pesquisa, eles se destacaram pelo equilíbrio entre desempenho e sustentabilidade, sendo o cenário AAS o mais promissor (DSJ = 0,5894). Essa abordagem garantiu que os três traços finais fossem os mais eficientes, permitindo uma formulação otimizada para aplicações práticas, conforme descrito na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Resultados dos ensaios mecânicos das misturas otimizadas.

Traços	Resistência à tração na flexão (MPa)				Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias		28 dias		7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
AS	2,46	0,08	3,04	0,12	10,44	0,12	14,56	0,16
AAS	2,91	0,09	3,56	0,05	11,14	0,19	14,69	0,28
ASS	2,48	0,15	3,19	0,11	10,55	0,11	14,15	0,45

Nota: DP = desvio padrão

Embora os valores de resistência à compressão e resistência à tração apresentados na Tabela 3.5 não sejam os máximos obtidos na presente pesquisa (Figura 3.3), os traços otimizados se destacam pelo maior teor de cinzas e lodo, refletindo um equilíbrio eficaz entre as propriedades mecânicas e o consumo de resíduos da indústria moveleira. O cenário AAS apresentou a melhor ecoeficiência, evidenciada pelo maior valor de DSJ global de 0,5894, seguido do cenário ASS, cuja DSJ global foi igual a 0,5293. Os resultados apresentados sugerem que a metodologia de otimização é vantajosa, pois permite otimizar a ecoeficiência do processo de produção de argamassas, através do aproveitamento de resíduos gerados pela indústria moveleira, sem

comprometimento significativo das características de desempenho mecânico do material, contribuindo para a economia circular e a redução do impacto ambiental associado ao descarte de resíduos industriais.

Abdulkadir et al. (2025) realizaram um estudo de Otimização de propriedades de argamassa ambientalmente eficientes por meio da integração de microfibras de celulose e cinzas de combustível de óleo de palma calcinado usando a metodologia de superfície de resposta. A adição desse tipo de cinza reduziu a resistência à compressão em 15,7% e 28,7% com teores de 20% e 40%, respectivamente, devido à hidratação mais lenta e ao menor teor de cimento. A resistência à tração por compressão variou de 1,67 MPa a 2,92 MPa. A adição de microfibras de celulose melhorou a resistência à tração, com aumentos de 5,5% e 33,5% com 1% e 2% de microfibras de celulose, respectivamente, para 0% de cinzas de combustível de óleo de palma. Com 20% de cinzas de combustível de óleo de palma, as microfibras de celulose aumentaram a resistência devido à melhoria da zona interfacial. Um teor mais alto de microfibras de celulose apresentou comportamento de quase endurecimento por deformação, resistindo eficazmente à fissuração.

3.4 Conclusões

O presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e otimizar a ecoeficiência de argamassas contendo cinza de eucalipto e lodo de ETE provenientes da indústria moveleira, visando o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis para a construção civil. Ainda, foi possível identificar modelos significativos capazes de otimizar o desempenho de argamassas e avaliar a influência de diferentes parâmetros. A metodologia de superfície de resposta e o projeto composto central foram empregados como ferramentas eficazes para modelar as propriedades e o desenvolvimento da resistência. Os resultados obtidos indicaram que é possível utilizar esses resíduos em matrizes cimentícias sem comprometer significativamente as propriedades mecânicas, contribuindo para a redução do impacto ambiental. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho:

- Verificou-se que a adição da cal exerceu um papel preponderante na resistência das argamassas. Os compósitos com maiores relações C/L apresentaram melhor desempenho mecânico. Em contrapartida, a adição dos resíduos, embora importante para a sustentabilidade do compósito, não provocou alterações significativas quanto o teor de cal e cimento das misturas.

- Modelos de regressão foram elaborados para estimar as resistências à compressão e à tração na flexão, apresentando coeficientes de determinação (R^2) superiores a 80% e evidenciando a boa correlação entre os dados experimentais e os modelos propostos.
- A aplicação da função estatística de DSJ permitiu a otimização das misturas, identificando a argamassa com melhor índice de ecoeficiência, equilibrando desempenho mecânico e incorporação de resíduos. Três cenários (AS, AAS e ASS) foram analisados com a função DSJ para equilibrar desempenho mecânico e consumo de resíduos. O cenário AAS obteve a melhor ecoeficiência com a maior DSJ global (0,5894) superando os valores obtidos para ASS (0,5293) e AS (0,5166), e excelente equilíbrio entre resistência e incorporação de resíduos. A otimização do traço AAS resultou na maior resistência à compressão aos 28 dias (14,69 MPa) e resistência à tração na flexão de 3,56 MPa, enquanto AS e ASS apresentaram valores inferiores, sendo 14,56 MPa e 3,04 MPa para AS, e 14,15 MPa e 3,19 MPa para ASS, respectivamente. AAS ainda se destacou pelo maior aproveitamento de cinza (25%), com um menor consumo de lodo (3%), contrastando com os cenários AS e ASS, que incorporaram 15% de lodo. Essa diferença reforça o impacto negativo do excesso de lodo na resistência mecânica. Logo, o cenário AAS apresentou melhor combinação de resistência e reciclagem de resíduos, permitindo uma substituição eficiente de aglomerantes convencionais sem comprometer significativamente o desempenho estrutural da argamassa.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. O estudo concentrou-se apenas em argamassas para assentamento e revestimento, não abordando matrizes cimentícias para aplicações estruturais. Além disso, apenas os parâmetros de resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram considerados na avaliação de desempenho das argamassas. Pesquisas futuras devem ser realizadas para também contemplar outras propriedades físicas, reológicas e de durabilidade dos compósitos contendo resíduos da indústria moveleira. Também recomenda-se que trabalhos futuros explorem a utilização de aditivos químicos que possam potencializar a resistência e a trabalhabilidade das misturas, bem como a realização de análises de ciclo de vida (ACV) para avaliar de forma mais abrangente os impactos ambientais dessas argamassas. Investigações sobre a durabilidade das argamassas em condições ambientais adversas e a sua aplicabilidade em diferentes tipos de substratos também são recomendadas para ampliar o escopo da pesquisa.

4. TEOR DE AR INCORPORADO DE ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE CINZA DE CAVACO DE EUCALIPTO E LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO GERADOS NA INDÚSTRIA MOVELEIRA

RESUMO

A produção de cimento Portland é responsável por elevadas taxas de emissões de CO₂, o que representa um desafio para a sustentabilidade na construção civil. A literatura carece de estudos sobre os efeitos da incorporação de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de Estação de Tratamento de Esgoto em determinadas propriedades de matrizes cimentícias. Logo, foi utilizado um Delineamento Composto Central (CCD) para investigar os efeitos da cal, agregados e resíduos da indústria moveleira (adição de 5-25% de cinza e/ou 3-15% de lodo, com relação a massa de aglomerantes) no teor de ar incorporado das argamassas. O teor de ar incorporado variou de 8,46% a 24,88%, sendo influenciado principalmente pela relação areia/aglomerantes e lodo/aglomerantes. Um modelo de regressão e uma superfície de resposta foram elaborados. O uso desses resíduos pode proporcionar teores de ar incorporado apropriados para diferentes aplicações, levando a materiais de construção mais sustentáveis.

Palavras-chave: Argamassas sustentáveis; Cinza de cavaco de eucalipto; Lodo de ETE; Teor de ar incorporado; Delineamento Composto Central.

4.1 Introdução

A produção de cimento Portland é responsável por elevadas taxas de emissões globais de CO₂, o que contribui significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas (Bozorgmehr e Nemati, 2023). A substituição parcial do cimento Portland por resíduos industriais pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o custo do material, embora os benefícios específicos variem dependendo da disponibilidade de recursos e do cenário logístico local (Jamora et al., 2023).

Por exemplo, resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) gerados por indústrias moveleiras podem ser utilizados para produção de materiais de construção sustentáveis (Gomes et al., 2023). No contexto da presente pesquisa, a empresa Itatiaia Móveis S/A (Ubá, Brasil) busca soluções viáveis para a destinação adequada dos resíduos gerados em seu processo de produção moveleira, como por exemplo cinzas geradas no processo de incineração de cavacos de eucalipto utilizados nos aquecedores, lodos gerados

no processo de limpeza dos ganchos de pintura (material de aspecto sólido) e da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), entre outros.

No entanto, para garantir o desempenho adequado desses materiais sustentáveis, é fundamental avaliar diversas propriedades, incluindo o teor de ar incorporado, que pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade da matriz cimentícia. O conhecimento do teor de ar incorporado dos materiais é importante, pois este parâmetro está diretamente relacionado à estrutura dos poros do concreto endurecido (Chatterji, 2003). A relação água-cimento, combinada à eficiência da compactação e ao uso de teores de aditivos ou adições, influencia diretamente o teor de ar incorporado na matriz cimentícia (Mehta; Monteiro 2006). O uso de aditivos incorporadores de ar na formulação de argamassas é uma opção comum para melhorar propriedades no estado fresco, como a diminuição da densidade e aumento da trabalhabilidade. Após o endurecimento, também pode ocorrer uma redução no módulo de elasticidade. Ainda, é capaz de melhorar variações na distribuição do tamanho das partículas das argamassas, uma vez que as bolhas de ar exercem grande influência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No entanto, o aditivo incorporador de ar requer uso cuidadoso por si só, uma vez que o volume de ar incorporado é muito sensível à quantidade e qualidade do aditivo (Romano et al., 2015).

Nesse contexto, o delineamento composto central (CCD) surge como uma ferramenta eficaz para avaliação dos efeitos da incorporação de diferentes teores de cinza e lodo no teor de ar incorporado de compósitos cimentícios eco-eficientes. Introduzido por Box e Wilson em 1951, o CCD consiste em uma evolução do esquema fatorial 2^k ou fatorial fracionário 2^{k-p} , aumentando pontos centrais e pontos axiais e oferecendo uma solução para problemas que necessitavam de muitos experimentos para um pequeno número de fatores (Teófilo e Ferreira, 2006). No método CCD, há três grupos de pontos de projeto: a) pontos axiais simbolizados como pontos de estrela localizados nos eixos com uma distância de $\pm \alpha$; b) pontos fatoriais situados nos vértices do cubo, com +1 e -1 em valores codificados; c) e ponto central, no centro do cubo, com um valor codificado de zero para todas as variáveis (Ferdosian; Camões, 2017). Então, metodologias de superfície de resposta podem ser utilizadas para gerar equações matemáticas que relacionam variáveis de entrada e variáveis de resposta (Adamu et al., 2021). A literatura carece de estudos estatísticos relacionados aos efeitos da interação de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE da indústria moveleira, no teor de ar incorporado de matrizes cimentícias. Desta forma, esta pesquisa pretende preencher essa lacuna, aplicando um CCD para investigação do teor de ar incorporado destes materiais, avaliando a viabilidade

técnica da incorporação de resíduos da indústria moveleira em argamassas mistas de cal e cimento.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Materiais

Nesta pesquisa, foi utilizado cimento Portland CP V com massa específica de $3,05 \text{ g/cm}^3$, cal hidratada CH-III com massa específica de $2,39 \text{ g/cm}^3$, areia natural quartzosa com massa específica de $2,60 \text{ g/cm}^3$, além de areia artificial gnáissica com massa específica de $2,86 \text{ g/cm}^3$. Dois diferentes tipos de resíduos foram coletados de forma representativa na indústria moveleira Itatiaia Móveis S/A, em Ubá (Minas Gerais, Brasil): os resíduos de cinza de caldeira (Figura 4.1a), que é subproduto da incineração de cavacos de eucalipto utilizados na geração de energia para o aquecimento das caldeiras nos processos industriais, além de lodo gerado na ETE da fábrica (Figura 4.1b). A massa específica dos resíduos de cinza e lodo foi igual a $2,96 \text{ g/cm}^3$ e $1,82 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

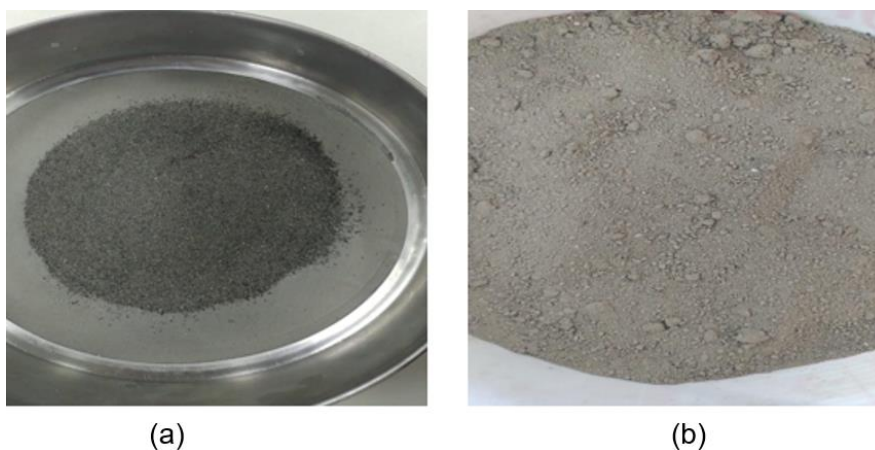


Figura 4.1 - Resíduos da indústria moveleira: (a) cinza de cavaco de eucalipto; (b) lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

4.2.2 Métodos

Um Delineamento Composto Central (CCD) foi o método experimental utilizado para determinar a influência da composição da argamassa no teor de ar incorporado da mesma. Apresenta-se na Tabela 4.1, as composições produzidas no delineamento experimental, em níveis reais, utilizando-se o software de análise estatística Minitab 19.

A significância estatística foi avaliada para entender os efeitos das relações cal/cimento, areia/aglomerantes, cinza/aglomerantes e lodo/aglomerantes no teor de ar incorporado. Todas as argamassas foram produzidas com 30% de areia natural e 70% de areia artificial. A relação

água/aglomerantes foi ajustada para obtenção de um índice de consistência de 255 ± 5 mm. Os ensaios de incorporação de ar foram realizados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005), segundo mostrado na Figura 4.2.

Tabela 4.1 - Proporções entre materiais definidas no delineamento composto central utilizado no presente estudo.

Proporções entre componentes das misturas					
Traço	Relação cal/cimento	Relação areia/aglomerantes	Relação cinza/aglomerantes (%)	Relação lodo/aglomerantes (%)	Relação água/aglomerantes
1	0,33	2	10	6	0,73
2	0,67	2	10	6	0,70
3	0,33	3	10	6	0,87
4	0,67	3	10	6	0,85
5	0,33	2	20	6	0,84
6	0,67	2	20	6	0,74
7	0,33	3	20	6	0,88
8	0,67	3	20	6	0,89
9	0,33	2	10	12	0,79
10	0,67	2	10	12	0,75
11	0,33	3	10	12	0,92
12	0,67	3	10	12	0,83
13	0,33	2	20	12	0,81
14	0,67	2	20	12	0,78
15	0,33	3	20	12	0,96
16	0,67	3	20	12	0,92
17	0,50	2,5	15	9	0,84
18	0,50	2,5	15	9	0,84
19	0,50	2,5	15	9	0,84
20	0,50	2,5	15	9	0,84
21	0,16	2,5	15	9	0,87
22	0,84	2,5	15	9	0,80
23	0,50	1,5	15	9	0,69
24	0,50	3,5	15	9	0,99
25	0,50	2,5	5	9	0,81
26	0,50	2,5	25	9	0,90
27	0,50	2,5	15	3	0,85
28	0,50	2,5	15	15	0,90
29	0,50	2,5	15	9	0,84
30	0,50	2,5	15	9	0,84



Figura 4.2 - Ensaio para determinação do teor de ar incorporado das argamassas.

4.3 Resultados e Discussão

Os resultados de teor de ar incorporado obtidos para os 30 traços de argamassa produzidos estão apresentados na Tabela 4.2. Observa-se que os valores de teor de ar incorporado variaram entre 8,46% e 24,88%. O menor teor de ar incorporado foi observado no traço 23, o qual apresentava a menor relação areia/aglomerantes (1,5). O maior teor de ar incorporado foi verificado no traço 27, o qual apresentava uma combinação de elevados valores de relação cal/cimento e cinza/aglomerantes.

Tabela 4.2. Resultados de teor de ar incorporado das argamassas produzidas na presente pesquisa.

Traço	Teor de ar incorporado (%)
1	13,69
2	13,62
3	20,63
4	15,62
5	22,97
6	13,67
7	17,20
8	18,08
9	8,85
10	9,32
11	11,48
12	12,19
13	10,57
14	8,97
15	12,01
16	11,25
17	11,83
18	12,12

Traço	Teor de ar incorporado (%)
19	12,64
20	11,56
21	9,98
22	13,27
23	8,46
24	15,55
25	13,70
26	13,04
27	24,88
28	11,59
29	12,43
30	12,70

Para melhor compreensão dos resultados, a montagem do experimento em CCD permitiu a criação de um modelo de superfície de resposta considerando apenas os efeitos das variáveis cuja influência no teor de ar incorporado era estatisticamente significativa. Tais análises estatísticas consideraram um nível de significância de 0,05. Apenas a influência das relações areia/aglomerantes e lodo/aglomerantes (%) se mostrou estatisticamente significativa no valor do teor de ar incorporado. Portanto, a Figura 4.3 apresenta a superfície de resposta obtida neste estudo, considerando-se as variáveis independentes que estatisticamente afetam a variável resposta. O coeficiente de determinação (R^2) ajustado foi igual a 76,62% e a equação de regressão que define o modelo, em unidades não codificadas, é apresentada na Equação (1).

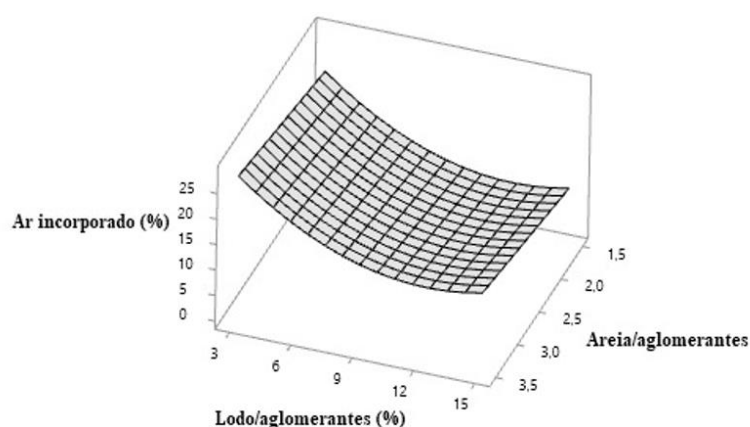


Figura 4.3 - Superfície de resposta obtida, considerando-se as variáveis independentes (relação lodo/aglomerante e relação areia/aglomerantes) que estatisticamente afetam a variável resposta (teor de ar incorporado).

$$TAI = 12,271 + 1,291.B - 3,226.D + 1,489.D^2 \quad (1)$$

onde: TAI é o teor de ar incorporado (em %); B é relação areia/aglomerantes; e D é a relação lodo/aglomerantes (em %).

Também é importante discutir que o uso de aditivos incorporadores de ar na formulação de argamassas é uma opção comum para melhorar propriedades no estado fresco, como a diminuição da densidade e aumento da trabalhabilidade. Após o endurecimento, estes aditivos também podem reduzir o módulo de elasticidade. Além disso, eles podem afetar o empacotamento de partículas das argamassas, uma vez que as bolhas de ar exercem grande influência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. É importante realizar uma cuidadosa dosagem do aditivo incorporador de ar, uma vez que o volume de ar incorporado é muito sensível à quantidade e qualidade do aditivo (Romano et al., 2015). No presente estudo experimental, o TAI das argamassas se mostrou diretamente relacionado a alguns dos materiais utilizados em sua composição. De fato, a escolha dos agregados, aditivos e adições influencia significativamente propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica, aderência e durabilidade de materiais cimentícios (Mehta e Monteiro, 2006). Logo, compreender a interação entre os componentes é essencial para otimizar o desempenho das argamassas em diferentes contextos construtivos.

Os resultados obtidos na presente pesquisa são similares aos observados em trabalhos prévios que também investigaram o teor de ar incorporado em argamassas de assentamento ou revestimento, como por exemplo Carrajola et al. (2021), que observaram valores de teor de ar incorporado entre 12% e 24% em argamassas contendo cinza volante, cal aérea e agregados leves; Pedroso (2020), que verificaram valores em torno de 21% em argamassas com aerogel de sílica; e Pcziczek et al. (2018), que reportaram valores de teor de ar incorporado entre 1% e 22% em argamassas com poliestireno expandido e resíduos de borracha.

4.4 Conclusões

Os resultados deste trabalho indicaram os efeitos de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE no teor de ar incorporado de argamassas mistas de cal e cimento. Valores de teor de ar incorporado entre 8,46% e 24,88% foram obtidos, além de um modelo de regressão e da representação de superfície de resposta baseados nos resultados experimentais, marcando mais um passo no desenvolvimento de matrizes cimentícias ecoeficientes que poderão mitigar o desperdício de resíduos da indústria moveleira, reduzindo os impactos ambientais causados pelos mesmos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação dos efeitos de resíduos de cinza de cavaco de eucalipto e lodo de ETE em outras propriedades relacionadas ao desempenho de argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos (resistência à compressão, resistência à tração

na flexão, resistência de aderência, entre outras), além da realização de análises de ciclo de vida das diversas misturas para avaliar os benefícios ambientais em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia e recursos naturais.

5. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS PARA ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS CONTENDO RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MOVELEIRA

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental da produção de argamassas industrializadas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, incorporando resíduos da indústria moveleira, especificamente cinzas de cavaco de eucalipto e lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE). Foram elaboradas argamassas com diferentes proporções otimizadas desses resíduos, com e sem aditivos incorporadores de ar e retentores de água, e submetidas a ensaios físicos, mecânicos e reológicos conforme as normas técnicas vigentes. Os resultados indicaram que as argamassas aditivadas apresentaram maior teor de ar incorporado, maior retenção de água e melhor trabalhabilidade, características essenciais para aplicação prática. Embora a adição de aditivos tenha causado uma redução nas resistências à tração na flexão e à compressão em comparação às argamassas de referência, os valores obtidos permaneceram dentro dos limites normativos. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmou a melhoria na homogeneidade nas argamassas com aditivos. Dentre os ensaios realizados das composições com substituição parcial do cimento por resíduos, além da adição de aditivos, a mistura com maior percentual de lodo contendo baixo percentual de cinza foi a que apresentou o melhor desempenho técnico, sendo a mais indicada para uso de revestimento e assentamento de tetos e paredes. A pesquisa contribui com alternativas sustentáveis para o setor da construção civil, promovendo o reaproveitamento de resíduos e a redução de impactos ambientais associados à produção de móveis da indústria moveleira, e construção civil. Recomenda-se a continuidade dos estudos com foco na durabilidade e aplicação em escala real.

Palavras-chave: Argamassa industrializada; Cinza de cavaco de eucalipto; Lodo de ETE; Aditivos; Sustentabilidade na construção civil.

5.1 Introdução A produção de CO₂ durante a fabricação de cimento atinge 2,8 bilhões de toneladas, o que representa 5 - 8% do total de emissões no mundo (Wei; Cen, 2019). Na indústria de cimento, a redução das emissões de CO₂ torna-se um objetivo importante devido à grande quantidade de decomposição de carbonato na fabricação de clínquer (Hepburn et al., 2019). Práticas de sustentabilidade visam compatibilizar um crescimento econômico com o

crescimento duradouro das sociedades humanas, agora e no futuro. Engenheiros civis planejam, projetam, constroem e operam o ambiente construído para a sociedade, no qual uma quantidade significativa de recursos naturais é consumida. Estudos mostram que o ambiente construído representa mais de 33% do uso global de energia final, gera cerca de 37% das emissões globais de gases de efeito estufa relacionadas à energia e uma grande quantidade de resíduos (Akanbi et al., 2019) e consome 40% das matérias-primas globais (Çimen, 2021).

Para mitigação das emissões de gases estufa pela indústria da construção, inúmeros trabalhos científicos vêm investigando a possibilidade de substituição parcial de cimento Portland por diferentes tipos de resíduo. Por exemplo, Pavlíková et al. (2018) realizaram um estudo sobre a valorização de cinzas de cavacos de madeira como aditivo mineral ecológico em projetos de argamassas e descobriram que argamassas com 20% de substituição de cimento Portland por cinzas de cavacos de madeira representam 15% de redução de CO₂ e 16% de redução de energia em comparação com a mistura de argamassa de referência. Fuller et al. (2018) realizaram um estudo de utilização de cinzas volantes de pó de madeira de uma instalação industrial de combustível pulverizado para processamento e mostraram que as cinzas volantes de pó de madeira são um componente viável para produção de argamassas de reboco sustentáveis.

Nos últimos anos, grande destaque tem sido dado às análises relacionadas à gestão ambiental das empresas, considerando suas múltiplas dimensões (Del Brío; Junquera, 2003). A produção moveleira envolve diversificadas matérias-primas e insumos e, portanto, reúne uma gama de aspectos e impactos ambientais relativos à retirada, transformação, transporte, uso e descarte final desses materiais. A sua atividade demanda o uso de recursos naturais, na forma de matérias-primas, insumos e energia, gerando resíduos e outros riscos à saúde com seus processos produtivos (Riul, 2011). Esses resíduos gerados no setor moveleiro, no entanto, podem ser aproveitados, minimizando danos causados ao meio ambiente. A reciclagem de qualquer tipo de resíduo sempre traz um benefício inquestionável ao reduzir o problema ambiental que o depósito desses materiais em aterros sanitários representam (Torres et al., 2020).

Essa abordagem tecnológica é exemplificada no polo moveleiro de Ubá, MG, pela razão de existirem matérias-primas residuárias que têm gerado situações consideradas problemáticas para o meio ambiente (Gomes et al., 2023), particularmente as cinzas de cavaco de eucalipto e lodos das estações de tratamento de esgoto (ETE) empregadas na presente pesquisa. A geração de energia a partir da queima de subprodutos de madeira pode gerar desafios relacionados à geração de CO₂ e ao agravamento do efeito estufa. Uma grande quantidade de gases de efeito

estufa também pode ser liberada durante o armazenamento de serragem e aparas de madeira, especialmente se elas se decompuserem rapidamente (Wihersaari, 2005).

De acordo com Fusade et al. (2019), as cinzas de madeira, quando usadas como aditivo, modificam as propriedades da argamassa de cal não hidráulica, auxiliando na taxa de carbonatação e aumentando a permeabilidade e a trabalhabilidade. Pesquisas mais recentes sugeriram as cinzas de madeira ou cinzas de resíduos de madeira como um novo material pozolânico e recomendaram seu uso como substituição parcial do cimento no concreto como reaproveitamento de resíduos orgânicos, mostrando aumento na resistência, durabilidade e absorção de água (Siddique, 2012).

Fusade et al. (2019) avaliaram o efeito das cinzas de madeira nas propriedades e durabilidade da argamassa de cal para rejuntamento de edifícios históricos úmidos, as cinzas de madeira, por serem higroscópicas, conferem às argamassas a capacidade de absorver mais água total na saturação capilar, retardando assim sua saturação no tempo e geralmente diminuindo a absorção capilar (até 40%) (exceto para NHL 30%) ou aumentando-a (70% - 100%).

Hossain et al. (2024) investigaram a influência de aditivos hidrorrepelentes na microestrutura e desempenho mecânico de pasta e argamassa de cimento Portland convencional, concluindo que aditivos hidrorrepelentes, mesmo com porosidade aberta mais alta, reduziram significativamente a absorção capilar de água. Isso sugere que a redução na absorção não se deve apenas a alterações na porosidade, mas também à distribuição e interação dos aditivos na matriz cimentícia.

Krejcirikova et al. (2019) realizaram um estudo da caracterização com cinzas obtidas como subproduto incinerado no tratamento de lodo de esgoto, como um possível material cimentício suplementar e seu efeito físico na umidade da argamassa, constataram que o coeficiente de absorção de água capilar aumentou em argamassas com cinza de lodo de esgoto em comparação com a argamassa de referência à base de cimento e com o aumento do teor de cinza de lodo de esgoto.

A caracterização de compósitos cimentícios inclui a determinação da resistência à compressão NBR 13279 (ABNT, 2005a), índice de vazios e absorção de água NBR 9778 (ABNT, 2005), tais métodos serão utilizados ou adaptados para os compósitos estudados. Além disso, as argamassas destinadas ao assentamento ou ao revestimento de paredes e tetos devem cumprir os requisitos estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005b), sendo classificadas conforme as características e propriedades determinadas pelos métodos de ensaio.

Gerges et al. (2021) realizaram um estudo sobre argamassa ecológica combinando cinzas de madeira, borracha granulada e vidro triturado fino comprovando que a adição de 4% de cinzas de madeira como substituição parcial do cimento foi adotada, pois produziu os melhores resultados para a resistência à flexão e apenas uma perda adicional de 6,55% na resistência à compressão, quando comparada aos melhores resultados com 2%. A adição de 20% de cinzas de madeira como substituição parcial da areia apresentou os melhores resultados para a resistência à flexão e à compressão; no entanto, a adição de 30% de cinzas de madeira como substituição parcial da areia foi adotada em uma das misturas combinadas.

Krejcirikova et al. (2019) ainda verificaram em seu estudo que a distribuição de tamanho de partícula afetou claramente a resistência à compressão, e mesmo a substituição de 10% do cimento por cinza de lodo de esgoto causou uma diminuição significativa na resistência à compressão aos 28 dias de cura da argamassa. Na proporção de cimento para cinzas de (7:3), diferenças claras entre os métodos de pré-tratamento de cinzas foram observadas: a moagem das cinzas resultou em melhor resistência à compressão em comparação com o pré-tratamento de lavagem com água.

De acordo com Antoniazzi et al. (2020), as argamassas estabilizadas são misturas industrializadas que chegam à obra prontas para serem utilizadas, mantendo suas propriedades por até 72h, proporcionando maior agilidade aos sistemas construtivos. Para atender a essas condições, as argamassas estabilizadas têm em sua composição aditivos químicos que modificam suas características reológicas, dando maior trabalhabilidade e tempo de utilização. Logo, podem ser empregados, além do cimento, agregado miúdo e água, um aditivo incorporador de ar, responsável pela melhora na trabalhabilidade da argamassa no estado fresco, e um aditivo estabilizador de hidratação, o qual aumenta o tempo de trabalhabilidade da mistura. O estado da arte ainda carece de uma investigação sistemática dos efeitos de diferentes tipos de resíduos gerados pela indústria moveleira nas propriedades físicas, mecânicas, reológicas e microestruturais de argamassas de assentamento e revestimento contendo aditivos químicos. Nesse sentido, o presente artigo visa contribuir para o desenvolvimento socioambiental do setor moveleiro, com métodos pertinentes de ensaios para aproveitamento dos resíduos das indústrias moveleiras e produção de argamassas industrializadas. Por meio de levantamento detalhado de dados e ensaios de absorção de água e coeficiente de capilaridade; densidade de massa aparente; resistência a flexão na tração, compressão e resistência a aderência; teor de incorporação de ar e retenção de água; microscopia eletrônica de varredura. Esses ensaios permitiram alcançar resultados comprovados para aproveitamento desses resíduos em argamassas para

assentamento e revestimento de tetos e paredes. Além de reduzir impactos ambientais causados pela geração de CO₂ pela indústria da construção civil.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Materiais

Para produção das argamassas foi usado um cimento Portland de alta resistência inicial (equivalente ASTM Tipo III). No Brasil, esse cimento é especificado pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018) como CP V. Sua escolha foi atribuída a menor adição mineral, além de ser um cimento que não contém outras adições. As propriedades físicas, mecânicas e químicas do cimento são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento Portland utilizado.

Parâmetro	Valor
Perda ao fogo, %	5,73
Massa específica, g/cm ³	3.05
Área específica (Blaine), cm ² /g	4.794
Início de pega, min.	150
Fim de pega, min.	210
Resistência à compressão (7/28 dias), MPa	41.8/50.7

Ainda, foi utilizada a cal hidratada CH-III com massa específica igual a 2,39 g/cm³, os agregados areia natural quartzosa com massa específica igual a 2,60 g/cm³, além de areia artificial gnáissica com massa específica igual a 2,86 g/cm³.

Os materiais residuários utilizados para composição das argamassas foram a cinza proveniente do processo de incineração de cavacos de eucalipto usado nos aquecedores, e o lodo da estação de tratamento de esgoto industrial, ambos fornecidos pela indústria Itatiaia Móveis S/A, localizada na cidade de Ubá (Minas Gerais, Brasil). Os resíduos apresentaram massa específica iguais a 2,96 g/cm³ e 1,82 g/cm³, para a cinza e o lodo, respectivamente.

As misturas foram compostas por três diferentes cenários definidos de acordo com o consumo dos resíduos, sendo AS – percentuais próximos de cinza e lodo; AAS – maior percentual de cinza comparado ao lodo; e ASS – maior percentual de lodo em comparação a cinza, e Ref sendo cada traço utilizando os mesmos percentuais de resíduos, sendo as misturas de referência, sem adição de aditivos.

Os aditivos incorporador de ar (lauril sulfato de sódio) e retentor de água (hidroxipropilmetilcelulose) utilizados nesse estudo foram fornecidos pelo fabricante de argamassa industrializada - Valemassa, da cidade de Ouro Branco/MG. Para a composição das

misturas foram realizados diversos ensaios com diferentes percentuais de aditivos, sendo os traços selecionados de acordo com os resultados de teor de ar incorporado e teor de retentor de água, além da trabalhabilidade verificada nos ensaios de consistência.

Os percentuais variaram para incorporador de ar sendo de 0,0045% para os traços de AS e ASS, e 0,0015% para o traço AAS, o percentual de retentor de água foi de 0,1% para todos os traços. O aditivo incorporador de ar se caracteriza por ser tensoativo utilizado para incorporar de forma uniforme minúsculas bolhas esféricas de ar nos materiais cimentícios. O retentor de água possui função de controlar a hidratação do cimento e aumentando a umectação da argamassa. Melhora a consistência, trabalhabilidade, adesão ao substrato, aumento do tempo em aberto da argamassa no estado fresco e reduz o deslizamento. Todos os dois aditivos apresentam-se em pó fino de cor branca e amarelada, apresentando característica físico química conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Características físico-química dos aditivos.

Item de análise	Unidade	Incorporador de ar	Retentor de água
Umidade	%	≤ 3,0	Máx. 8
Densidade	g/L	-	400 - 500
pH (solução à 1%)	-	7,5 - 9,5	6 - 8
Viscosidade	cPs	-	70000 - 80000
Teor de ativos	%	Mín. 93	-
Na ₂ SO ₄	(%)	≤ 2,5	-

5.2.2 Métodos

5.2.2.1 Proporcionalamento das misturas

Foram produzidos três traços otimizados, com base nos resultados do capítulo 3, conforme Tabela 5.3. Em todos os traços foram utilizados 70% de agregado artificial e 30% de agregado natural. Com objetivo de controlar a trabalhabilidade das argamassas, foram realizados teste de espalhamento na *flow table* para ajuste do consumo de água e da consistência dessas argamassas.

Tabela 5.3 - Proporções de materiais (kg) componentes das argamassas otimizadas.

Traços	Cimento	Cal	Areia Artificial	Areia Natural	Cinza	Lodo	Água	Retentor de água	Incorporador de ar
AS	455	287	1.597	685	185	111	445	3.321	0.149
AAS	494	223	1.757	753	179	22	430	3.428	0.051
ASS	458	265	1.770	759	42	108	434	3.402	0.153

Os testes de espalhamento de todos os compósitos foi fixado em 260±10 mm de diâmetro, faixa recomendada conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016) - argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. As argamassas foram produzidas utilizando uma

argamassadeira automática, moldando-se seis corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160mm. Após desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos a um método de cura úmida com umidade relativa do ar em $90\pm 2\%$ e temperatura de $22\pm 2^\circ$ C, os ensaios de resistência à compressão e tração na flexão foram realizados após períodos de cura de 7 e 28 dias.

5.2.2.2 Ensaios de caracterização

Ensaio de absorção de água por capilaridade e de coeficiente de capilaridade das argamassas foram realizados utilizando corpos de prova sujeitos a um período de cura de 28 dias. Os corpos de prova tiveram sua massa inicial registrada e posteriormente foram posicionados com a base apoiada em recipiente capaz de manter o nível de água constante a 5 mm acima da face de contato com água. A partir do posicionamento dos corpos de provas em contato com a água, foram determinadas as massas de cada um aos 10 min (m10) e 90 min (m90), conforme recomendações da NBR 15259 (ABNT, 2005).

Para determinação das propriedades físicas das argamassas, foram realizados ensaios de coeficiente de capilaridade, os ensaios foram conduzidos pela NBR 15259 (ABNT, 2005), utilizando corpos de prova moldados com os traços de referência e com adição de aditivos, e após 28 dias de cura, secos em estufa. Estes corpos de prova tiveram sua massa inicial registrada e posteriormente foram posicionados com a base apoiada em recipiente capaz de manter o nível de água constante e verificado sua massa após imerso em água por 10 min e 90 min, numa profundidade de 6 mm (Figura 5.1a), os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UFV.

Os corpos de prova foram ensaiadas durante um tempo de 90 min conforme indicado pela norma NBR 15259 (ABNT, 2005), calculando-se o coeficiente de absorção capilar de acordo com a expressão: $C = 0,1 * (M_2 - M_1)$ onde C é o coeficiente de absorção capilar medido em $\text{kg}/(\text{m}^2 * \text{min}^{0,5})$, M_1 o peso da amostra após 10 min de teste e M_2 é o peso em 90 min. Ao final do ensaio, a altura da percolação de água nos corpos de prova foi medida com um paquímetro nos quatro lados do corpo de prova e os resultados médios foram apresentados como a altura de percolação.

A norma técnica brasileira utiliza um processo no qual os corpos de prova prismáticos de argamassa são colocados verticalmente e submetidos a uma película de água controlada durante um período de tempo, e as massas inicial e final são medidas. A mudança na massa dos corpos

de prova ao longo de um período de tempo depende da ascensão capilar do fluido, ou seja, água através da matriz (Cotto-Ramos et al., 2020).

Ensaio de densidade de massa aparente também foram realizados com corpo de prova prismático, os ensaios foram realizados com base na NBR 13280 (ABNT, 2005), os corpos de prova foram moldados e pesados após 28 dias de cura úmida, em seguida secos em estufa até atingir estabilidade de massa (Figura 5.1b).

A densidade de massa das argamassas no estado fresco foi conduzida em conformidade com as prescrições normativas da NBR 13278 (ABNT, 2005) e representa a relação entre a massa e o volume do material, sendo expressa em g/cm^3 , com duas casas decimais.

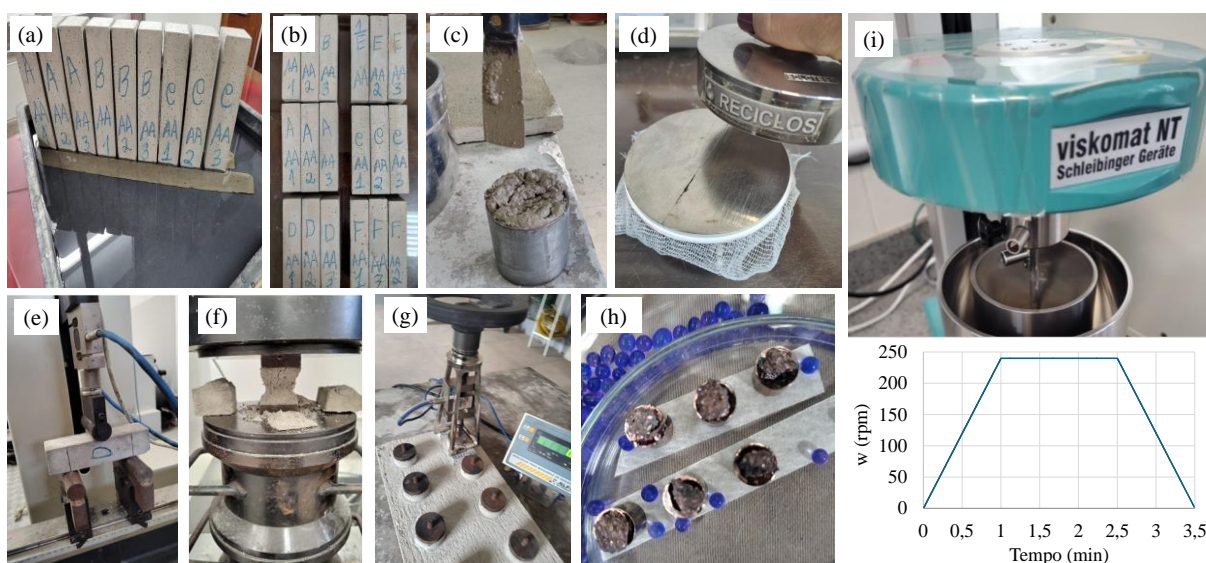


Figura 5.1 – Ensaio de a) coeficiente de capilaridade; b) densidade de massa aparente; c) teor de ar incorporado; d) teor de retenção de água; e) resistência a tração na flexão; f) resistência à compressão; g) resistência a aderência à tração; h) microscopia eletrônica de varredura; i) reometria.

Todos os traços foram submetidos a um ensaio de consistência na *flow table* para ajustar a quantidade de água e a trabalhabilidade final do material, de acordo com as recomendações apresentadas na NBR 13276 (ABNT, 2016). Em seguida, foram realizados os ensaios de teor de ar incorporado e teor de retenção de água das argamassas no estado fresco.

Para a realização dos ensaios de incorporação de ar na argamassa, foi utilizado o recipiente cilíndrico mostrado na Figura 5.1c, seguindo os procedimentos especificados na NBR 13278 (ABNT, 2005). Para a determinação da retenção de água das argamassas colantes foi utilizado um molde cilíndrico de aço, de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, um conjunto de 12 papéis-filtro, gaze, peso de 2 kg constituído de cilindro maciço de metal e uma placa circular de aço de 110 mm de diâmetro e 5 mm de espessura, conforme as orientações da NBR 13277 (ABNT, 2005), ilustrado na Figura 5.1d. Inicialmente foram registradas as massas do molde vazio (Mm) e do conjunto de papéis-filtro secos. As argamassas previamente preparadas foram

introduzidas no molde, e registrou-se a massa desse conjunto argamassa/molde. Sobre a superfície da argamassa foram colocadas duas gazes, o conjunto de papel-filtro e a placa rígida, aplicando centralizadamente o peso de 2 kg. Imediatamente, foi acionado o cronômetro e, após dois minutos, retirou-se o peso de 2 kg e a placa rígida, registrando a massa do conjunto de papéis-filtro molhados.

Para determinar a resistência à tração na flexão (Figura 5.1e), foi aplicada uma carga no meio do vão do corpo de prova a uma taxa de incremento de força de 50 N/s até a ruptura. Considerou-se que a ruptura ocorreu quando a força aplicada sofreu uma redução de 20%. Para a determinar a resistência à compressão (Figura 5.1f), o ensaio foi realizado em cada uma das duas metades do corpo de prova previamente ensaiado à flexão. Foi utilizado uma chapa de aço com área de 40x40 mm para realizar uma distribuição uniforme da carga. A carga foi aplicada a uma taxa de incremento de força de 500 N/s até a ruptura do corpo de prova. Considerou-se que houve ruptura quando houve uma queda de 20% na força aplicada.

Os ensaios de resistência mecânica das argamassas industrializadas foram conduzidos por meio das prescrições da NBR 13279 (ABNT, 2005), para determinação da resistência à tração na flexão e resistência à compressão, e da NBR 15258 (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15258, 2021), para determinação da resistência potencial de aderência à tração. Os resultados foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL-60000 com capacidade de 600 kN à tração e 2000 kN à compressão, do Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade Federal de Viçosa.

Para realização do ensaio para determinação da resistência de aderência à tração utilizou-se substrato padrão, sobre o qual foi aplicada uma carga a argamassa na direção da maior dimensão do substrato (Figura 5.1g), realizado conforme NBR 13528 (ABNT, 2019). Foram moldados cinco corpos de prova para cada traço usando argamassadeira automática, após 28 dias de cura, os testes foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Viçosa, utilizando o aparelho de aderência. A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido, basicamente, à penetração da argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação (Matias, 2018).

Para a realização dos ensaios reológicos das argamassas industrializadas, foi utilizado o reômetro Viskomat NT - Schleibinger Geräte (Figura 5.1i). Trata-se de um viscosímetro rotacional altamente versátil, destinado à caracterização da trabalhabilidade de materiais de construção de granulação fina, como pastas de cimento, argamassas, concretos finos e gessos, com partículas de até 2 mm de diâmetro. O equipamento permite a obtenção de informações

relevantes, tais como: curvas de fluxo e parâmetros reológicos; propriedades de trabalhabilidade em função da temperatura; comportamento de enrijecimento ao longo do tempo e sob diferentes velocidades de agitação; influência de aditivos e agentes minerais na trabalhabilidade.

O Viskomat NT opera com rampas de velocidade variando de 0,001 rpm a 400 rpm, em ambos os sentidos de rotação, possibilitando a aquisição de curvas de fluxo e determinação dos pontos de escoamento. O torque é medido por um transdutor especial, com capacidade de até ± 250 Nmm ou ± 500 Nmm, conforme o modelo utilizado. O sistema padrão de medição é composto por uma pá estacionária disposta concentricamente dentro de um recipiente cilíndrico rotativo que contém a amostra. Durante a rotação, a resistência ao cisalhamento exercida pela argamassa gera um torque, continuamente monitorado por sistema eletrônico.

Para este estudo, foi realizada uma análise comparativa entre diferentes formulações de argamassas. O protocolo de ensaio foi previamente ajustado de acordo com a consistência e características reológicas específicas de cada argamassa. O procedimento adotado teve duração total de 3,5 minutos, sendo dividido em três etapas: subida gradual da velocidade por 60 segundos; patamar de velocidade constante durante 90 segundos; e descida gradual da velocidade por mais 60 segundos.

A análise dos dados foi concentrada na fase decrescente da velocidade angular (a partir dos 2,5 minutos de ensaio), com o objetivo de gerar o gráfico de torque versus velocidade angular. As amostras foram submetidas à varredura da taxa de cisalhamento e ao programa de tixotropia do equipamento. O perfil do programa de cisalhamento adotado encontra-se representado na Figura 5.1i.

Song et al. (2023) ressalta que o modelo Modificado-Bingham e o modelo Herschel-Bulkley são geralmente usados para responder aos índices reológicos do cimento, incluindo taxa de cisalhamento, tensão de cisalhamento, tensão de escoamento e viscosidade plástica. O modelo Modificado-Bingham tem valores constantes de parâmetros reológicos, como tensão de escoamento e viscosidade plástica, portanto, pode ser usado para descrever as propriedades reológicas da pasta de cimento, argamassa e concreto.

5.2.2.3 Caracterização química e mineralógica

Para caracterização microestrutural das argamassas, foi realizado o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As imagens foram obtidas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura - JEOL - JSM-6010LA no Departamento de Física da Universidade Federal de

Viçosa. Amostras foram retiradas de compósitos submetidos a um período de cura de 28 dias e permaneceram armazenadas em um dessecador até a realização da análise de microscopia. Elas foram depositadas em *stubs* e metalizadas com ouro usando o equipamento Quorum Q150RS. Para observar a morfologia dos materiais, foi aplicada uma tensão de 15 kV para a geração de imagens de elétrons secundários. A ampliação foi realizada de acordo com o limite do aparelho e limitada a magnitude de 5000 vezes, sendo possível verificar a presença de diferentes componentes na microestrutura das matrizes cimentícias.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Absorção de água por capilaridade

A Figura 5.2 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade das argamassas, permitindo avaliar o comportamento dos diferentes traços em relação à permeabilidade. Conforme esperado, a absorção após 10 min foi sempre menor que aquela observada após 90 min. Os resultados indicam que argamassas com maior teor de ligante tendem a apresentar menor absorção de água, devido à menor porosidade interconectada e ao preenchimento dos vazios com produtos de hidratação (Souza et al., 2023). Em contrapartida, misturas com maior proporção de agregados podem apresentar maior absorção capilar, especialmente se houver baixa compactação da matriz cimentícia. Os valores de absorção se mostraram bem próximos tanto para as argamassas de referência quanto para as argamassas com adição de aditivos, logo a adição de resíduos não causou grandes influências nos resultados.

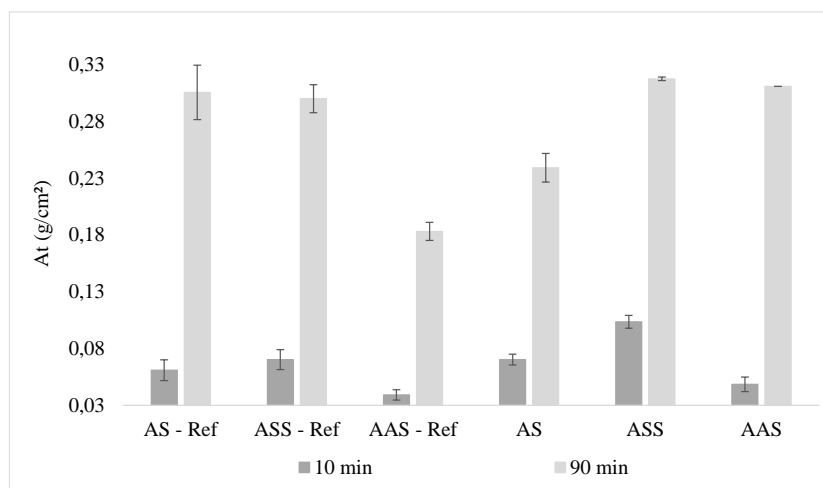


Figura 5.2 - Absorção de água por capilaridade.

Argamassas com menor absorção capilar são mais resistentes à deterioração causada por umidade, tornando-se mais adequadas para aplicações em ambientes agressivos. A absorção de

água influencia diretamente a durabilidade, podendo acelerar processos patológicos caso não seja devidamente controlada (Park; Yoon, 2024).

Corinaldesi et al. (2016) comprovaram que a adição de resíduos de madeira parece mostrar influência positiva na redução da resistência à permeabilidade ao vapor de água e da condutividade térmica, que resultou em 25% menor com a adição de 5% de resíduos; por outro lado, a absorção capilar de água resultou um pouco aumentada.

Portanto, a absorção de água por capilaridade deve ser minimizada para garantir maior durabilidade das argamassas. A escolha de materiais adequados, a dosagem correta de ligantes e a incorporação de aditivos específicos são estratégias essenciais para otimizar o desempenho das argamassas em relação à umidade.

5.3.2 Coeficiente de capilaridade

Esse ensaio refere-se à capacidade da argamassa de evitar a perda de umidade por capilaridade (Patural et al., 2011), podendo afetar a trabalhabilidade (Paiva et al., 2006). De acordo com Zeng et al. (2020), vários fatores interferem no processo capilar, como o tipo de amostra utilizada, a idade e as condições de cura da amostra, a forma como os corpos de prova foram produzidos, grau de vibração e densidade, e os fatores locais, como o grau de umidade do ambiente. O uso de aditivos na argamassa também modifica as características do processo capilar. Por exemplo, o uso de aditivos incorporados ao ar reduz a percolação de água por capilaridade, devido à maior dificuldade de migração da água.

Portanto, a formulação das argamassas desempenha um papel fundamental na definição de suas propriedades de absorção capilar. A escolha adequada dos materiais e o controle da porosidade através da dosagem de ligantes, agregados e aditivos são fatores determinantes para otimizar o desempenho e a durabilidade das argamassas frente à umidade.

A Figura 5.3 mostra o comportamento das diferentes formulações de argamassa em relação à absorção de água por capilaridade, refletindo a eficiência das composições frente à penetração de umidade. Os resultados indicam diferenças relevantes entre os traços de referência e os traços com adição de aditivos. As argamassas apresentaram coeficiente de capilaridade mais baixo em comparação às suas respectivas referências. O incorporador de ar promove a formação de microbolhas, criando uma matriz mais fechada para o caminho da água. O retentor de água melhora a hidratação do cimento, promovendo um preenchimento mais denso dos poros com produtos de hidratação.

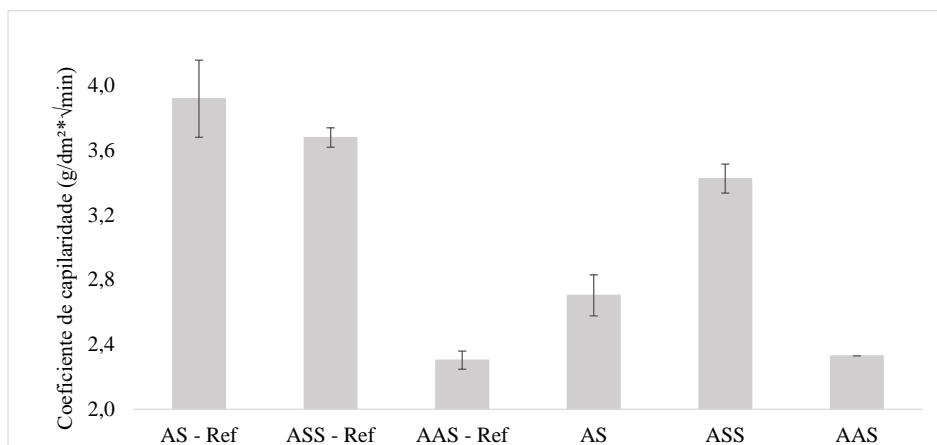


Figura 5.3 - Coeficiente de capilaridade das argamassas.

Foi possível observar que resultados indicam que argamassas com maior teor de ligante tendem a apresentar menor coeficiente de capilaridade, o que pode ser atribuído à redução da porosidade capilar devido ao aumento da hidratação e formação de produtos cimentícios mais densos. Dong et al. (2017) afirmam que a capilaridade está diretamente relacionada à porosidade interconectada e à distribuição dos poros na matriz da argamassa, sendo um fator crítico para o desempenho em condições de exposição à umidade. Por outro lado, argamassas com maior proporção de agregados apresentam coeficientes mais elevados, pois a estrutura granular pode gerar caminhos preferenciais para a absorção capilar (Dias Haddad et al., 2016). Souza et al. (2023) concluíram que a análise comparativa entre diferentes traços evidencia que as argamassas com adição de materiais pozolânicos, como cinzas ou metacaulim, apresentam coeficientes inferiores devido à refinamento da estrutura porosa promovido pela reação pozolânica. Além disso, argamassas com incorporação de aditivos hidrorrepelentes indicaram redução significativa na absorção capilar, evidenciando a eficácia desses aditivos na melhoria da durabilidade em ambientes com elevada umidade.

5.3.3 Densidade de massa aparente

Observa-se na Figura 5.4 os valores da densidade de massa aparente das argamassas no estado endurecido com corpos de prova úmidos. Esse parâmetro é fundamental para avaliar a compactação da matriz cimentícia e sua relação com a durabilidade e resistência mecânica das argamassas. Os resultados indicam que argamassas com maior teor de ligante apresentam densidades superiores, devido à maior formação de produtos de hidratação, que preenchem os vazios e reduzem a porosidade interna.

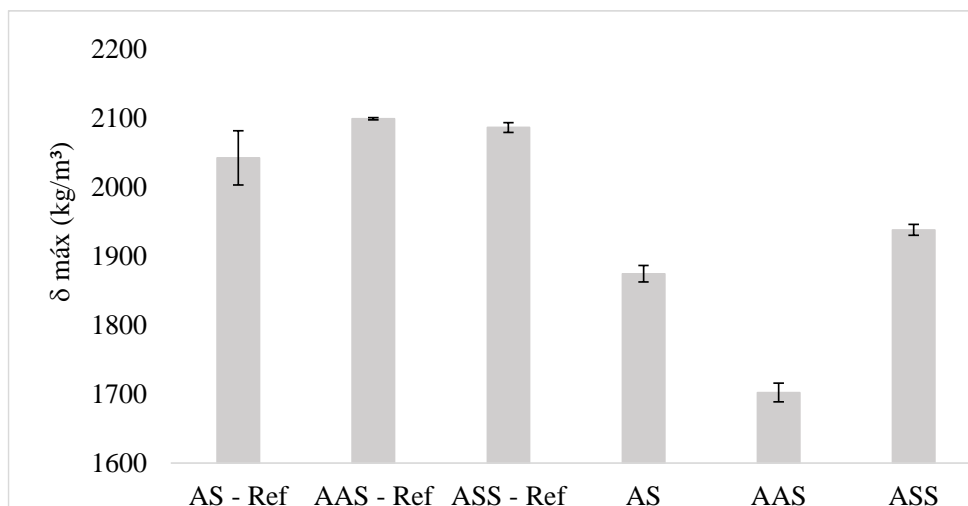


Figura 5.4 - Densidade de massa aparente no estado endurecido com corpo de prova úmido.

Matias (2018) ressalta que quanto menor a massa específica (densidade de massa), mais leve será argamassa e a mesma ainda terá capacidade de manter por mais tempo as propriedades de trabalhabilidade, o que pode significar redução do esforço na sua aplicação, resultando em um aumento de produtividade.

Yan et al. (2011) mostraram que uma adição de 2,5% em peso de lodo em argamassas resultou em uma redução da densidade aparente de 2.200 para 2.050 kg/m³. Adições acima de 2,5% em peso produzem uma redução na densidade aparente.

A densidade de massa aparente está diretamente correlacionada com a resistência mecânica das argamassas. Por outro lado, densidades reduzidas podem indicar maior porosidade, favorecendo a absorção de água e reduzindo a durabilidade da argamassa.

Portanto, os resultados indicaram a importância do controle da dosagem dos materiais para alcançar um equilíbrio entre densidade e desempenho mecânico. O conhecimento detalhado da relação entre composição, teor de água e densidade aparente é fundamental para o desenvolvimento de argamassas otimizadas para diferentes aplicações na construção civil.

5.3.4 Teor de retenção de água

A Figura 5.5 evidencia diferenças expressivas nos teores de retenção de água entre os traços das misturas de referência e os respectivos traços com aditivo retentor de água. Os traços modificados com aditivo apresentam valores significativamente mais elevados de retenção de água, que está diretamente relacionado à função deste aditivo, que atua retardando a liberação da água de amassamento, favorecendo a hidratação do cimento e melhorando a trabalhabilidade da argamassa.

O aditivo retentor de água, contribui para um controle mais eficiente da umidade interna. Isso se reflete nos traços AS, AAS e ASS com aditivo, que superam de forma evidente os traços de referência correspondentes (sem aditivo) no quesito retenção. Entre os traços com aditivo, observa-se uma variação entre AS, AAS e ASS, que pode estar relacionada à diferença nas proporções dos resíduos de cinza e lodo em cada traço:

Esse comportamento reforça que, além do aditivo, a natureza e proporção dos resíduos utilizados também afetam a retenção de água. Isso é coerente com os resultados encontrados por Santamaría-Vicario et al. (2015), que relacionam a retenção de água com a área superficial específica das partículas e com a viscosidade da pasta. Nos traços sem aditivo, os baixos teores de retenção de água indicam que, sem intervenção química, a água tende a migrar rapidamente para o substrato ou evaporar, o que pode comprometer a hidratação completa do cimento, além de afetar negativamente a trabalhabilidade, a coesão e a adesão da argamassa, aspectos fundamentais principalmente em aplicações verticais (revestimentos de parede e teto).

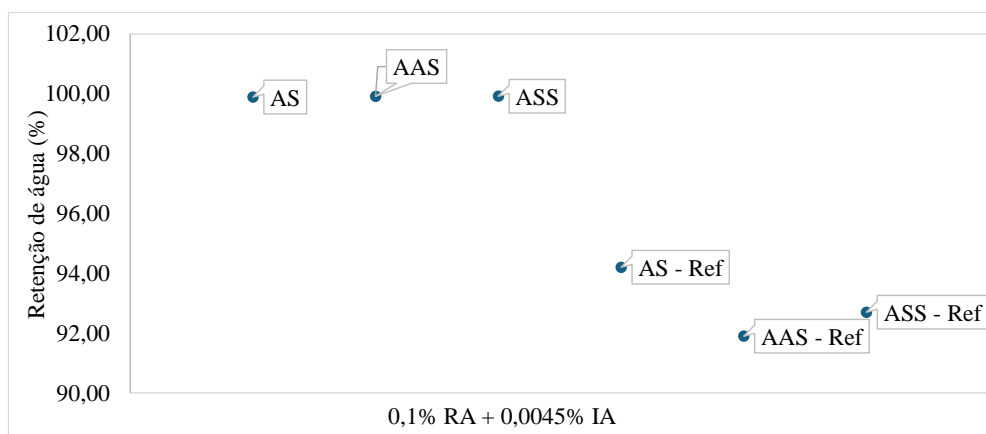


Figura 5.5 - Teor de retenção de água.

Santamaría-Vicario et al. (2015) afirmaram que a retenção de água está intimamente relacionada com a área superficial específica das partículas dos agregados finos, bem como do ligante e, em geral, com a viscosidade da pasta. Uma argamassa tende a conservar a água necessária para hidratar as superfícies das partículas do ligante e dos finos e também entra nas bolhas de ar ocluídas.

5.3.5 Teor de ar incorporado

A Figura 5.6 evidencia um aumento expressivo no teor de ar incorporado nos traços com adição de aditivos, em comparação aos traços de referência. Isso confirma a eficácia do aditivo tensoativo, que tem como principal função introduzir e estabilizar microbolhas de ar na matriz cimentícia ainda no estado fresco (Antoniazzi et al., 2020).

O aumento do teor de ar incorporado afeta diversas propriedades das argamassas como a redução da densidade de massa: como discutido anteriormente na Figura 5.4, os traços com aditivo apresentaram menor densidade, em parte por causa das bolhas de ar que ocupam volume na matriz, resultando em um material mais leve. Influência na retenção de água: conforme discutido na Figura 5.5, o ar incorporado também ajuda na retenção de água, pois cria uma estrutura mais fechada que atrasa a percolação do líquido para fora da argamassa (Antoniazzi et al., 2020); possível impacto negativo na resistência mecânica - embora o artigo indique que as argamassas atenderam aos requisitos mínimos normativos, observou-se certa redução na resistência à tração na flexão (Figura 5.7) e à compressão (Figura 5.8) nos traços com aditivos – comportamento esperado, tendo em vista que a maior quantidade de ar aumenta a porosidade total no estado endurecido.

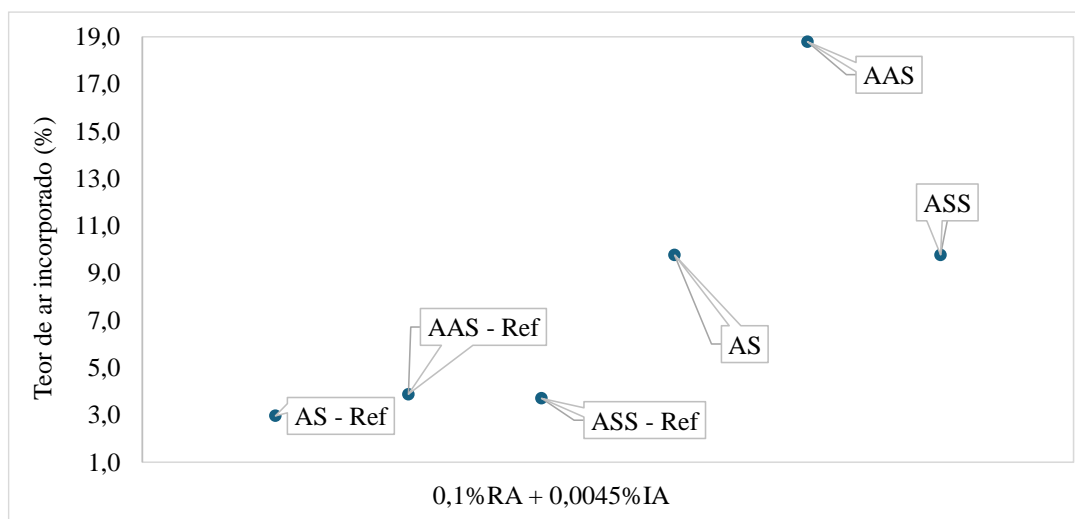


Figura 5.6 - Teor de ar incorporado.

A variação nos teores de ar incorporado entre as argamassas de referência podem estar relacionadas a dosagem diferenciada do incorporador de ar conforme apresentado na Tabela 5.3, o traço AAS recebeu um teor menor de aditivo (0,051%) em comparação a AS (0,149%) e ASS (0,153%), o que justifica seu menor valor de ar incorporado; a composição da mistura cinza e lodo, podendo o teor de ar incorporado ser influenciado pela natureza dos resíduos. O lodo, presente em maior quantidade no traço ASS, pode favorecer maior aeração devido à sua textura mais leve e orgânica, contribuindo para o maior teor observado nesse traço. Além da distribuição granulométrica e finura dos componentes, as partículas mais finas, como as da cinza, tendem a dificultar a incorporação de ar por aumentarem a viscosidade da pasta e reduzirem a mobilidade das bolhas, o que pode explicar o desempenho intermediário de AS e inferior de AAS.

Os resultados obtidos nessa pesquisa são similares ao que foi observado em estudo que também investigaram o teor de ar incorporado em argamassas de assentamento ou revestimento, como por exemplo Carrajola et al. (2021), que observaram valores de teor de ar incorporado entre 12% e 24% em argamassas contendo cinza volante, cal aérea e agregados leves.

Romano et al. (2015) utilizou o percentual de 0,12% em relação ao cimento e concluiu que uma adição muito elevada em composições de argamassa pode tornar o processo de mistura muito sensível. No entanto, a aplicação de quantidades muitas vezes superiores a esta é comum nas composições de argamassas industrializadas, tornando, em muitos casos, uma dificuldade no controle das características no estado fresco causando deterioração de algumas propriedades no estado endurecido.

O uso de aditivos incorporadores de ar na formulação de argamassas é uma opção comum para melhorar propriedades no estado fresco, como a diminuição da densidade e aumento da trabalhabilidade. Após o endurecimento, também pode ocorrer uma redução no módulo de elasticidade. Ainda, é capaz de melhorar variações na distribuição do tamanho das partículas das argamassas, uma vez que as bolhas de ar exercem grande influência tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No entanto, o aditivo incorporador de ar requer uso cuidadoso por si só, uma vez que o volume de ar incorporado é muito sensível à quantidade e qualidade do aditivo (Romano et al., 2015).

5.3.6 Resistência à tração na flexão

A Figura 5.7 apresenta os valores de resistência à tração na flexão das argamassas, destacando claramente a diferença de desempenho entre os traços de referência e os traços com aditivos. Traços com aditivos apresentaram valores de resistência à tração na flexão inferiores aos seus respectivos traços de referência. Essa redução é atribuída principalmente à presença do aditivo incorporador de ar, que aumenta a porosidade da argamassa no estado endurecido ao introduzir microbolhas durante a mistura (Polli et al., 2023). Essa porosidade, ainda que benéfica para a trabalhabilidade e retenção de água como mostrado na Figura 5, compromete parcialmente a coesão da matriz e, conseqüentemente, sua resistência mecânica. Esse comportamento está de acordo com Romano et al. (2015), que observaram que o teor de ar incorporado é um dos principais fatores responsáveis por diminuir o módulo de elasticidade e a resistência mecânica de argamassas.

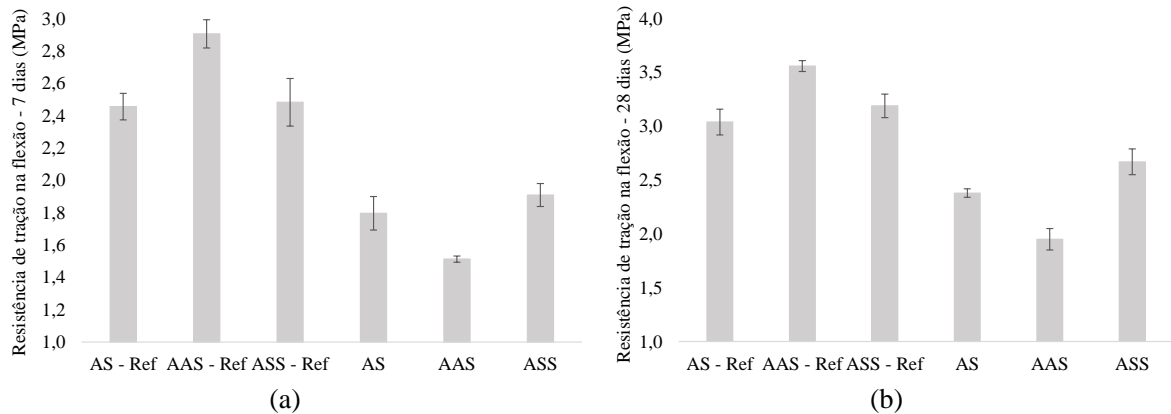


Figura 5.7 - Resistência à tração na flexão após períodos de cura de 7 dias (a) e 28 dias (b).

Nas misturas AS - Ref e AS, a adição de aditivos promoveu uma leve queda na resistência à flexão. A composição equilibrada entre cinza e lodo, junto com a adição dos aditivos, resultou em uma argamassa mais leve e trabalhável, porém ligeiramente menos resistente. Ainda assim, o valor se manteve dentro dos parâmetros esperados para aplicação prática.

Nas misturas AAS - Ref e AAS, a figura mostrou uma redução mais acentuada na resistência à flexão. A maior presença de cinza (com menor capacidade de ligação e maior teor de sílica amorfa) pode ter contribuído para uma matriz menos coesa, e o baixo teor de lodo reduziu a contribuição de materiais fibrosos ou coloidais que poderiam melhorar a aderência interna. Apesar disso, o traço AAS apresenta o menor percentual de incorporador de ar (0,051%), o que deveria teoricamente amenizar a perda de resistência. Isso sugere que a composição mineralógica da cinza teve maior impacto negativo neste caso.

Nas misturas ASS - Ref e ASS, houve uma queda de resistência na presença dos aditivos, o traço ASS apresentou o melhor desempenho relativo entre os aditivados. A maior quantidade de lodo, que possui características mais orgânicas e coloidais, pode ter atuado como uma espécie de reforço fibroso, contribuindo para a dissipação de tensões internas e melhoria na ligação entre os grãos da matriz. Esse comportamento é coerente com os achados de Corinaldesi et al. (2016), que mostraram que resíduos de madeira ou fibras orgânicas tendem a amortecer parcialmente os efeitos negativos da porosidade sobre a resistência à tração.

Corinaldesi et al. (2016) realizaram um estudo da caracterização de argamassas leves contendo resíduos de subprodutos do processamento de madeira, e comprovaram que a adição de subprodutos de madeira produziu efeitos prejudiciais notavelmente menos evidentes na resistência à flexão do que na resistência à compressão, provavelmente devido à estrutura fibrosa dos cavacos de madeira.

5.3.7 Resistência à compressão

Foi observado nos resultados de resistência à compressão (Figura 5.8), que argamassas com maior teor de ligante apresentam resistência à compressão superior, uma vez que a presença de maior quantidade de cimento promove uma matriz mais coesa e com maior quantidade de produtos de hidratação. Além disso, o tempo de cura influencia diretamente a resistência, pois o processo de hidratação continua ao longo do tempo, melhorando a coesão interna do material.

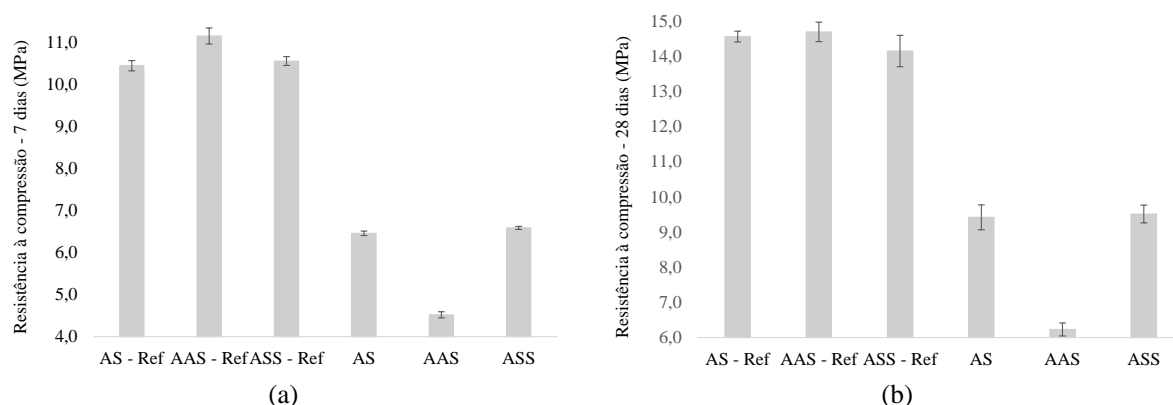


Figura 5.8 - Resistência à compressão após períodos de cura de 7 dias (a) e 28 dias (b).

Nos traços AS - Ref e AS, a adição de aditivos no traço causou uma queda moderada na resistência à compressão. Como o traço AS possui uma composição equilibrada entre cinza e lodo, ele tende a manter uma boa compactação. Contudo, a presença de 0,149% de incorporador de ar elevou o volume de poros, justificando a perda de resistência. No traço AAS - Ref e AAS, a maior queda de resistência foi observada nesses traços. AAS - Ref apresentou o melhor desempenho entre os traços sem aditivos, o que pode ser atribuído ao maior teor de cimento e cinza - ambos favorecem a formação de matriz densa e resistente.

Entretanto, quando aditivado, o traço AAS teve redução de desempenho, apesar de conter o menor teor de incorporador de ar (0,051%). Isso sugere que a redução pode ter sido amplificada por um baixo teor de lodo, resultando em uma matriz menos coesa e mais suscetível ao efeito do ar incorporado. Nos traços ASS - Ref e ASS, mesmo com aditivos, manteve um desempenho razoável, com menor redução relativa na resistência à compressão. Isso é coerente com o fato de que maior teor de lodo pode ter contribuído para um certo reforço interno, funcionando como um preenchimento fino e coesivo na matriz. Além disso, o retentor de água possivelmente favoreceu uma hidratação mais eficiente do cimento ao longo do tempo, atenuando os efeitos negativos do ar incorporado.

Os resultados também mostram que os traços sem aditivos obtiveram melhor desempenho mecânico, como era esperado, mas com menor retenção de água e menor teor de ar incorporado - o que pode comprometer a aplicação, principalmente em revestimentos verticais, onde escorrimento e retração plástica são problemáticos. Por outro lado, os traços aditivados apresentaram desempenho mecânico satisfatório dentro das normas técnicas, além de apresentarem vantagens como maior trabalhabilidade, menor densidade e maior retenção de água - características desejáveis em argamassas industrializadas, especialmente aquelas aplicadas mecanicamente ou que exigem maior tempo em aberto.

Yan et al. (2011) reutilizaram lodo proveniente da reciclagem de papel usado em produtos de argamassa de cimento mostrando que as resistências à compressão médias das amostras de argamassa incorporando 2,5 e 20% em peso de lodo foram de 27,6 e 20,5 MPa, respectivamente, em 91 dias, correspondendo a 83 e 62% da resistência de referência (33,2 MPa), se mostrando dentro da faixa de uso previsto do produto de alvenaria.

Corinaldesi et al. (2016) ainda mostraram que argamassas contendo serragem tiveram melhor desempenho do que aquelas preparadas com aparas de madeira, mas a dosagem mais alta (10% em vez de 5%) parece piorar drasticamente o desempenho mecânico da argamassa; a resistência à compressão de argamassas com 10% de resíduos de madeira nunca resultou em valores superiores a 5 MPa nos resultados de resistência à compressão.

Guo et al. (2019) avaliaram o impacto da madeira modificada termicamente nas propriedades mecânicas da argamassa, após análises concluíram que em comparação com a argamassa de referência, a resistência à compressão e a resistência à flexão das argamassas com cavacos de madeira moídos diminuíram significativamente.

Cheah e Ramli (2012) realizaram um estudo da resistência mecânica, durabilidade e retração por secagem de argamassa estrutural contendo cinzas de madeira com alto teor de cálcio como substituição parcial do cimento. A argamassa contendo 15% desse material em relação ao peso total do ligante apresentou maior resistência à compressão em comparação à argamassa de controle após um período de cura prolongado de 90 dias. A inclusão de cinzas de madeira com alto teor de cálcio em até 25% de substituição de cimento produziu uma argamassa com resistência à compressão superior a 90% da argamassa de controle. O nível ideal de substituição de cimento por cinzas de madeira com alto teor de cálcio para atingir a maior resistência à compressão neste estudo foi de 15%. Quando o nível de substituição de cimento foi de 5% resultou em um aumento na resistência à flexão da argamassa endurecida em comparação com a mistura de argamassa de controle em todas as idades de cura.

5.3.8 Resistência a aderência à tração

De acordo com os resultados de resistência a aderência à tração (Figura 5.9), foi observado que argamassas com maiores teores de ligante apresentam melhor aderência, devido ao aumento da coesão da matriz cimentícia. A rugosidade da superfície de aplicação pode influenciar diretamente a aderência, com substratos mais porosos apresentando melhores resultados.

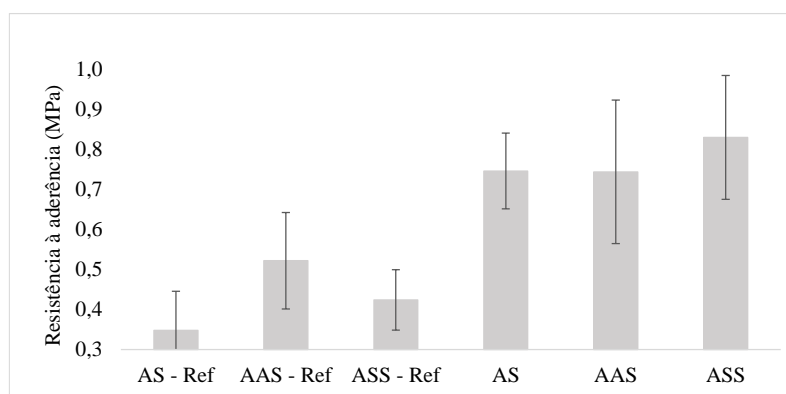


Figura 5.9 - Resistência de aderência à tração após um período de cura de 28 dias.

A incorporação de polímeros e aditivos plastificantes contribui para a melhora na resistência de aderência, promovendo maior flexibilidade e melhor distribuição das tensões na interface argamassa-substrato. A resistência de aderência à tração é um parâmetro crítico para a estabilidade dos revestimentos, sendo influenciada tanto pela formulação da argamassa quanto pelas condições de aplicação e cura. No entanto, cabe ainda observar que todas as misturas utilizando aditivos foram superiores ao limite mínimo prescrito pela NBR 14081-2 (ABNT, 2015), de 0,5 MPa.

5.3.9 Propriedades reológicas

A análise das curvas reológicas obtidas no ensaio de cisalhamento das argamassas (Figura 5.10) evidencia comportamento típico de materiais com escoamento plástico, conforme descrito por Song et al. (2023). Esse modelo considera a existência de uma tensão de escoamento (τ_0), necessária para iniciar o fluxo, seguida por uma região de comportamento linear, onde o torque varia proporcionalmente com a velocidade de cisalhamento, caracterizando a viscosidade plástica (μ_p).

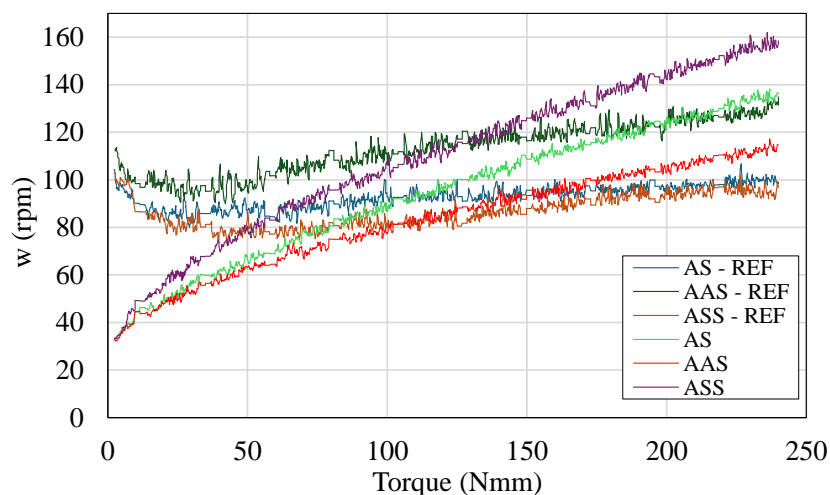


Figura 5.10 - Propriedades reológicas das argamassas.

As argamassas de referência apresentaram valores de torque superiores às aditivadas, indicando maior resistência inicial ao escoamento e viscosidade mais elevada. Esse comportamento pode ser atribuído à ausência de aditivos plastificantes e ao maior atrito interno entre partículas, conforme também observado por (Roussel, 2012). Em contrapartida, as argamassas com aditivos mantiveram curvas mais estáveis e torque reduzido, evidenciando menor viscosidade plástica e tensão de escoamento inferior, o que reflete em melhor trabalhabilidade.

Esse efeito está associado à ação combinada do retentor de água, que favorece a dispersão e hidratação das partículas cimentícias, e do incorporador de ar, que reduz a fricção interna ao promover microbolhas, como discutido por (Ayano, 2002). A diferença de comportamento reológico entre os traços também está relacionada às proporções dos resíduos utilizados, uma vez que materiais como o lodo possuem características coloidais que influenciam na floculação e na coesão da matriz.

Portanto, os resultados confirmam que a incorporação dos aditivos e dos resíduos influencia significativamente os parâmetros reológicos, podendo ser ajustada conforme as exigências de aplicação da argamassa.

5.3.10 Análise microestrutural

Com base nas imagens obtidas por MEV, das argamassas de referência AS, AAS e ASS (Figuras 5.11 a, b, c), observa-se uma microestrutura mais porosa e heterogênea, com a presença de vazios interconectados. A formação de cristais de etringita e hidróxidos de cálcio é evidente, o que pode indicar uma hidratação não completamente refinada. Além disso, as regiões de contato entre os grãos de agregado e a matriz cimentícia apresentam certa descontinuidade, o que pode influenciar negativamente a resistência mecânica e a durabilidade. Nas argamassas

modificadas com aditivos AS, AAS e ASS (Figura 5.11 d, e, f), verifica-se uma estrutura mais densa e homogênea, com menor quantidade de porosidade interconectada. Os aditivos atuam promovendo uma melhor dispersão das partículas cimentícias, resultando em um preenchimento mais eficiente dos vazios. Além disso, observa-se uma redução da formação de hidratos de cálcio desordenados, indicando uma hidratação mais eficiente e uma matriz mais coesa (Polli et al., 2023).

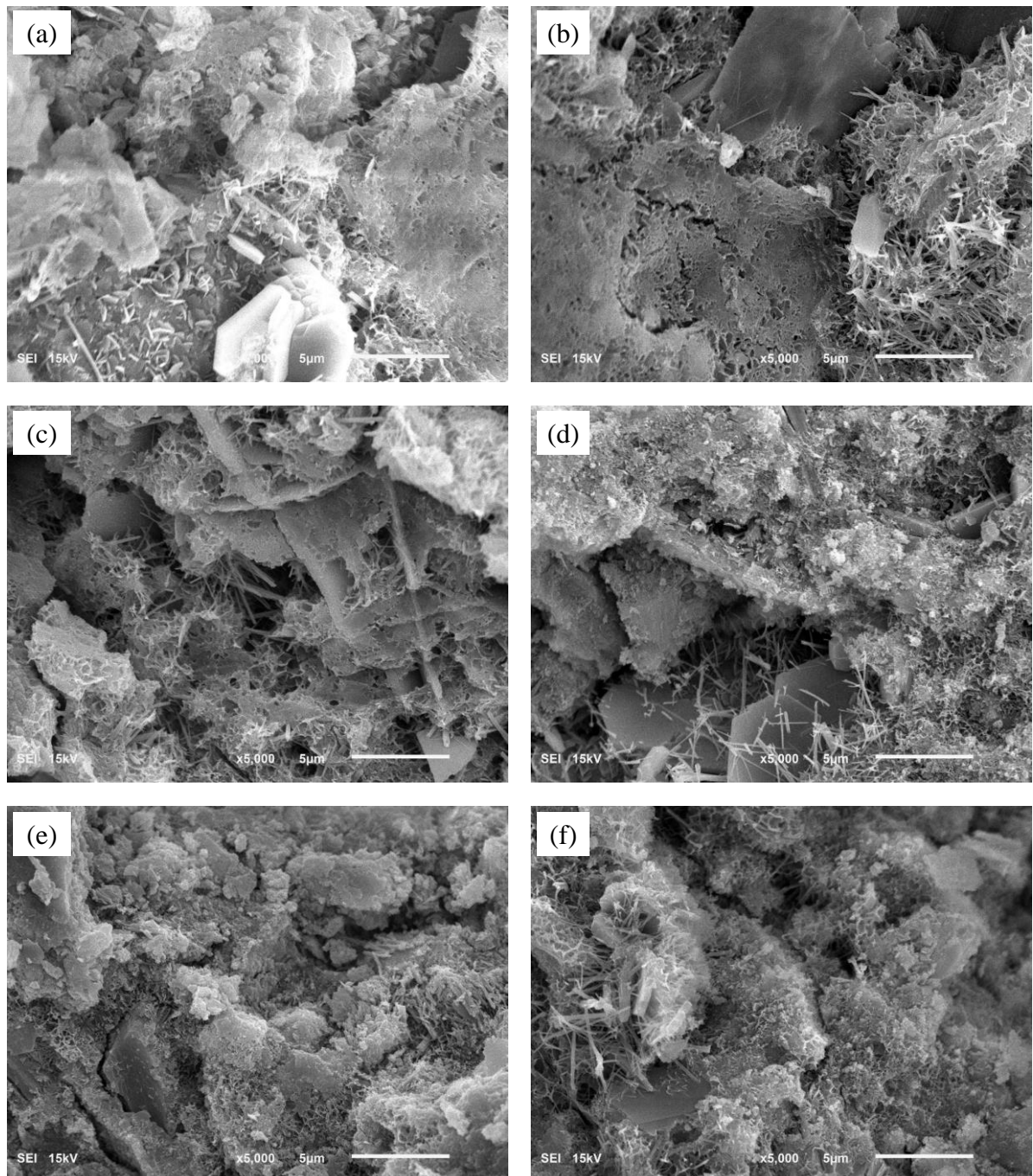


Figura 5.101 - Microscopia eletrônica de varredura das argamassas de referência (sem aditivos): a) AS; b) AAS; c) ASS e argamassas com aditivos: d) AS; e) AAS; f) ASS.

A análise das imagens de MEV evidencia a importância do controle da microestrutura na melhoria das propriedades mecânicas e durabilidade das argamassas. A presença de aditivos contribui significativamente para a redução da porosidade e para uma melhor interação entre os componentes da mistura, o que reflete diretamente na resistência mecânica e na menor absorção de água.

5.4 Conclusões

Este estudo teve como objetivo a caracterização de cinzas da incineração de cavaco de eucalipto e lodo de ETE e a viabilidade para a substituição parcial de cimento em aplicações de argamassa industrializadas para assentamento e revestimento de paredes e tetos, utilizando resíduos provenientes da indústria moveleira. Buscou avaliar a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial do cimento por esses resíduos, aliados à adição de aditivos incorporadores de ar e retentores de água, promovendo sustentabilidade, reaproveitamento de resíduos e redução do impacto ambiental causado pelo setor da construção civil, a fim de preservar recursos naturais não renováveis. Os ensaios permitiram não apenas a caracterização das propriedades físicas e mecânicas das misturas, como também forneceram subsídios técnicos para a tomada de decisão no uso desses materiais alternativos. As seguintes conclusões foram obtidas, a partir dos resultados encontrados nesta pesquisa:

- Os resultados de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade indicaram bom desempenho em durabilidade, especialmente nos traços com aditivos e maior teor de ligantes.
- Houve redução na densidade de massa aparente das misturas com aditivos, o que favorece aplicações com menor carga estrutural.
- As argamassas com aditivos apresentaram maior teor de ar incorporado e maior retenção de água, melhorando a trabalhabilidade e o tempo em aberto, fundamentais para aplicações verticais.
- Nos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão, os traços com aditivos apresentaram valores inferiores aos de referência, mas ainda dentro dos limites normativos, evidenciando que o aumento de porosidade afeta a resistência mecânica.
- A avaliação reológica das argamassas demonstrou que a incorporação de aditivos e resíduos influencia significativamente a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, resultando em composições com melhor trabalhabilidade e desempenho ajustado às exigências de aplicação.

- As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram que os aditivos contribuíram para uma estrutura interna mais homogênea e menos porosa, justificando parte do desempenho observado nas propriedades no estado endurecido.
- Na análise integrada dos resultados físicos, mecânicos e microestrutural, a mistura ASS com aditivos se destacou como a mais equilibrada para aplicação em argamassas industrializadas para assentamento e revestimento de tetos e paredes. Apesar de apresentar leve redução nas resistências mecânicas em relação à sua referência sem aditivos, a mistura ASS aditivada manteve valores dentro dos parâmetros exigidos pelas normas técnicas, ao mesmo tempo em que apresentou os melhores resultados em retenção de água, teor de ar incorporado e trabalhabilidade. A maior proporção de lodo nesta mistura contribuiu para uma estrutura mais coesa e com bom desempenho, favorecendo a adesão, tempo em aberto e aplicação mecanizada. Dessa forma, a mistura ASS aditivada é recomendada como a formulação mais adequada para uso industrial, conciliando sustentabilidade, desempenho técnico e viabilidade prática.

Embora os resultados tenham sido promissores, este estudo apresenta algumas limitações. A avaliação foi restrita ao comportamento das argamassas em escala laboratorial e em períodos de cura de 7 e 28 dias. Além disso, não foram realizados ensaios de durabilidade das argamassas, como resistência a ciclos de molhagem e secagem, carbonatação ou penetração de agentes agressivos. Para estudos futuros, recomenda-se expandir os testes para escalas reais de aplicação e diferentes condições ambientais, investigar o comportamento a longo prazo das argamassas contendo resíduos da indústria moveleira; e explorar combinações com outros tipos de resíduos industriais e aditivos para formulações de compósitos cimentícios ainda mais sustentáveis e de alto desempenho.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da incorporação de resíduos da indústria moveleira - especificamente cinza de fundo de caldeira e lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) - em matrizes cimentícias voltadas à produção de argamassas industrializadas. A pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, abrangendo desde o embasamento teórico e caracterização dos materiais até os testes práticos de desempenho e otimização de misturas.

No Capítulo 1, foram apresentadas as motivações, hipóteses e fundamentos teóricos da pesquisa. Discutiu-se o papel da construção civil na geração de impactos ambientais e a necessidade de soluções sustentáveis, como a valorização de resíduos. A indústria moveleira foi destacada como geradora de resíduos com potencial para aplicação na construção, especialmente os resíduos avaliados nesta tese.

O Capítulo 2 tratou da caracterização dos materiais e dos primeiros testes com substituição parcial do cimento por cinza e lodo em pastas e argamassas. A cinza de eucalipto mostrou efeito *filler* e potencial pozolânico, contribuindo para o desenvolvimento da resistência mecânica, especialmente em proporções de até 25%. O lodo, por sua vez, demonstrou comportamento satisfatório em teores menores, com destaque para sua influência nas propriedades reológicas e na demanda de água. As análises de DRX, FTIR, UPV e calorimetria foram fundamentais para compreender a influência dos resíduos na hidratação e na formação da microestrutura.

No Capítulo 3, aprofundou-se o estudo com foco em traços de argamassas mais complexos, incluindo diferentes tipos de agregados e proporções de resíduos. O delineamento experimental permitiu identificar composições otimizadas que equilibraram propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica e aderência. Foi possível comprovar que, com ajustes adequados, os resíduos podem ser incorporados de maneira eficiente em formulações reais de argamassa, atendendo aos requisitos técnicos e normativos.

O Capítulo 4 trouxe as conclusões parciais confirmaram a hipótese de que resíduos da indústria moveleira, com tratamento e caracterização adequados, apresentam viabilidade técnica para substituição parcial do cimento em matrizes cimentícias, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Por fim, o Capítulo 5 consolidou os resultados em uma avaliação integrada, validando as misturas otimizadas em escala de produção. Essa etapa foi essencial para indicar a aplicabilidade prática das formulações desenvolvidas, considerando aspectos de durabilidade, eficiência mecânica e desempenho em condições simuladas de uso. As misturas com até 10%

de cinza e 5% de lodo apresentaram comportamento satisfatório, tanto no estado fresco quanto no endurecido, e se mostraram promissoras para uso em revestimentos e assentamentos.

De forma geral, a pesquisa comprova que a incorporação dos resíduos estudados é não apenas tecnicamente viável, mas também ambientalmente positiva. O reaproveitamento de materiais descartados pela indústria moveleira em argamassas industrializadas representam um avanço significativo rumo a práticas construtivas mais sustentáveis, reduzindo a dependência de matérias-primas convencionais e mitigando os impactos ambientais gerados pelo descarte de resíduos.

Além disso, os resultados oferecem subsídios para futuras regulamentações, incentivo à inovação industrial e desenvolvimento de novos produtos baseados em princípios de sustentabilidade e economia circular. A continuidade deste estudo poderá explorar o comportamento desses materiais produzidos a longo prazo e a viabilidade econômica da implementação em escala industrial. Novos ensaios poderão ser realizados, antes de viabilizar uma aplicação mais práticas dessas argamassas produzidas.

Referências Bibliográficas

- Abdulkadir, I., Wong, L. S., Ean, L. W., Mohammed, B. S., & Kong, S. Y. (2025). Optimizing environmentally efficient mortar properties through synergistic integration of cellulose microfibers and calcined palm oil fuel ash: A response surface methodology technique. *Construction and Building Materials*, 458, 139687. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.139687>
- ABNT. (2003). *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2004a). *NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2004b). *NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2005a). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2005b). *NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11174. (1990). *Armazenamento de*

- resíduos classes II - não inertes e III - inertes - Procedimento.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579. (2013). *Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira de 75µm (nº 200).*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653. (2014). *Materiais Pozolânicos.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13277. (2005). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13278. (2005). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279. (2005a). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.* Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279. (2005b). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13280. (2005). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR, 13528. (2019). *Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração - Parte 1: Requisitos gerais.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13600. (2022). *Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14081-2. (2015). *Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato padrão e aplicação da argamassa para ensaio.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15258. (2021). *Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605. (2017). *Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.*
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5736. (1991). *Cimento Portland*

pozolânico.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6473. (2003). *Cal virgem e cal hidratada - Análise química*.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778. (2005). *Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2005). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade* (pp. 1–7). 1ª edição.
- ABNT NBR 10004. (2004). *Resíduos sólidos – Classificação*.
- ABNT NBR 16697. (2018). *Cimento Portland - Requisitos*.
- Abubakar, J., Ahmed, A., Abbas, B. A., & Hyongu, R. (2024). OPTIMUM MIX PROPORTIONING AND MODELING OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE CONTAINING QUARRY DUST USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY. *Usak University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), 27–42. <https://doi.org/10.47137/uujes.1373630>
- Adamu, M., Trabanpruek, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S., & Iwanami, M. (2021). Mechanical performance and optimization of high-volume fly ash concrete containing plastic wastes and graphene nanoplatelets using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 308, 125085. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125085>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Omoteso, K., Bilal, M., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Davila Delgado, J. M., & Owolabi, H. A. (2019). Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 223, 386–396. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.172>
- Akinyemi, B. A., & Dai, C. (2020). Development of banana fibers and wood bottom ash modified cement mortars. *Construction and Building Materials*, 241, 118041. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118041>
- Alghamdi, H., Shoukry, H., Abadel, A. A., & Khawaji, M. (2023). Performance assessment of limestone calcined clay cement (LC3)-Based lightweight green mortars incorporating recycled waste aggregate. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 2065–2074. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.01.133>
- Almeida, J., Ribeiro, A. B., Silva, A. S., & Faria, P. (2020). Overview of mining residues

- incorporation in construction materials and barriers for full-scale application. *Journal of Building Engineering*, 29, 101215. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101215>
- Antoniazzi, J. P., Mohamad, G., Casali, J. M., Schmidt, R. P. B., & Trindade, B. (2020). Ação dos aditivos estabilizador de hidratação e incorporador de ar em pastas de cimento Portland. *Ambiente Construído*, 20(3), 249–262. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300427>
- Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2007). Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 767–775. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.02.023>
- Areias, I. O. R., Vieira, C. M. F., Manhães, R. da S. T., & Intorne, A. C. (2017). Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 63(367), 343–349. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672004>
- Arizzi, A., & Cultrone, G. (2012). The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical–mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 42(6), 818–826. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.03.008>
- Asante, B., Schmidt, G., Teixeira, R., Krause, A., & Savastano Junior, H. (2021). Influence of wood pretreatment and fly ash particle size on the performance of geopolymer wood composite. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(3), 597–609. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01671-9>
- Ayano, T. (2002). Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement-based materials. *Materials and Structures*, 35(247), 134–140. <https://doi.org/10.1617/13693>
- Baert, G., Hoste, S., De Schutter, G., & De Belie, N. (2008). Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94(2), 485–492. <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8787-z>
- Banfill, P., & Frias, M. (2007). Rheology and conduction calorimetry of cement modified with calcined paper sludge. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.11.013>
- Barbosa, M. S. L. G. J. R. D. M. do N. P. L. G. C. J. M. F. (2020, September). Estudo comparativo entre resultados de resistência à compressão de concretos tradicionais e sustentáveis com adição de cinza de caldeira. *IBRACON - Congresso Brasileiro Do Concreto*, 1–17.

- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., & Mendes, B. (2013). Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Construction and Building Materials*, 48, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031>
- BASTOS, C. L. C. M. de P. F. I. K. C. L. E. K. P. S. S. J. M. de O. S. V. M. Z. (2018, June 14). Utilização de Lodo para Produção de Materiais Cimentícios Empregados na Construção Civil. *Universidade Evangélica de Goiás*.
- Bayuseno, A. P., & Schmahl, W. W. (2011). Characterization of MSWI fly ash through mineralogy and water extraction. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(5), 524–534. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.002>
- Beatriz, A., Pegoretti, P., & Andrade, D. E. (2012). *UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE LAMINAÇÃO DA MADEIRA PARA A PRODUÇÃO DE PAINEL ESTRUTURAL*.
- Bernardes, J. (2013, April 14). *Nova técnica diminui emissão de CO2 na produção de cimento*. Universidade de São Paulo.
- Borlini, M. C., Sales, H. F., Vieira, C. M. F., Conte, R. A., Pinatti, D. G., & Monteiro, S. N. (2005). Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. Parte I: características da cinza. *Cerâmica*, 51(319), 192–196. <https://doi.org/10.1590/s0366-69132005000300004>
- Bortoletto, M., Guimarães, P. V. C., Silva, R. G. da, & Akasaki, J. L. (2017). Avaliação do resíduo Cinza da Madeira de Eucalipto como substituição parcial da areia em argamassas de cimento. *Revista Científica ANAP Brasil*, 10(18). <https://doi.org/10.17271/19843240101820171644>
- Bozorgmehr Nia, S., & Nemati Chari, M. (2023). Applied development of sustainable-durable high-performance lightweight concrete: Toward low carbon footprint, durability, and energy saving. *Results in Materials*, 20, 100482. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2023.100482>
- Brehm, F. A., Kulakowski, M. P., Evaldt, D. C., Moraes, C. A. M., & Pampanelli, A. B. (2013). Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil. *Ambiente Construído*, 13(2), 15–27. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200003>
- Brito, L. S., & Cunha, M. E. T. (2009). Reaproveitamento de Resíduos da Indústria Moveleira. In *Exatas Technol.*
- Buselatto, D. M., Wenzel, M. C., Da Rocha, G. H., Webber, J., Da Silva, S. R., & De Oliveira

- Andrade, J. J. (2019). Use of water treatment sludge (WTS) as fine aggregate in concretes: Evaluation of physical-mechanical properties. *Revista Materia*, 24(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0645>
- Cacuro, T. A., & Waldman, W. R. (2015). Fly-ash from biomass burning: Applications and potentialities. *Revista Virtual de Quimica*, 7(6), 2154–2165. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150127>
- Carrajola, R., Hawreen, A., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2021). Fresh properties of cement-based thermal renders with fly ash, air lime and lightweight aggregates. *Journal of Building Engineering*, 34, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101868>
- Celik, K., Meral, C., Petek Gursel, A., Mehta, P. K., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2015). Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 56, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>
- Chatterji, S. (2003). Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 759–765. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00099-9)
- Cheah, C. B., & Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 669–685. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.02.002>
- Cheah, C. B., & Ramli, M. (2012). Mechanical strength, durability and drying shrinkage of structural mortar containing HCWA as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 30, 320–329. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.009>
- Çimen, Ö. (2021). Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127180. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127180>
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., & Siddique, R. (2016). Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. *Construction and Building Materials*, 123, 281–289. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.011>
- Cotto-Ramos, A., Dávila, S., Torres-García, W., & Cáceres-Fernández, A. (2020). Experimental design of concrete mixtures using recycled plastic, fly ash, and silica

- nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 254, 119207. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119207>
- da Silva, C. A., Rezende, L. C. S. H., Cusioli, L. F., Shimabuku-Biadola, Q. L., Nishi, L., & Bergamasco, R. (2020). Incorporation of water treatment plant sludge in wood-based particleboard manufacturing. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 173, 148–155. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.24722>
- Da Silva, L. C. . N. F. F. . C. A. L. . S. B. A. . B. L. R. . C. S. C. . B. C. A. . R. J. L. (2014, May). ESTUDO DO APROVEITAMENTO DO LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DE TEÓFILO OTONI (MG) PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. *58º Congresso Brasileiro de Cerâmica*.
- Dawood, E. T., Al-Attar, A. A., & Zinad, O. S. (2020). *The influence of wood ash on different cement mortar mixes*. 020073. <https://doi.org/10.1063/5.0000392>
- de Brito, J., & Kurda, R. (2021). The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, 281, 123558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>
- De Lima, E. G., & Da Silva, D. A. (2005). RESÍDUOS GERADOS EM INDÚSTRIAS DE MÓVEIS DE MADEIRA SITUADAS NO PÓLO MOVELEIRO DE ARAPONGAS-PR. *FLORESTA*, 35(1). <https://doi.org/10.5380/rf.v35i1.2434>
- Del Brío, J. Á., & Junquera, B. (2003). A review of the literature on environmental innovation management in SMEs: implications for public policies. *Technovation*, 23(12), 939–948. [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(02)00036-6)
- Dias Haddad, L., Martin Costa, C., Pires Lopes, P. H., Neves de Carvalho Júnior, A., & dos Santos, W. J. (2016). Análise da influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas de revestimento. *Ciência & Engenharia*, 25(1), 07–16. <https://doi.org/10.14393/19834071.2016.29553>
- Diniz, M. A. O. M., & Melo, D. D. C. P. de. (2019). Potencial aproveitamento de lodo de ETE na construção civil em Recife/PE. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 10(5), 187–203. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2019.005.0017>
- Do Couto, Á. F., Nogueira, G. S. F., Sandoval, G. F. B., Schwantes-Cezario, N., & Morales, G. (2019). Initial study of eucalyptus wood ash (EWA) as a mineral admixture in concrete1. *DYNA (Colombia)*, 86(208), 264–270. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74580>
- Dong, H., Gao, P., & Ye, G. (2017). Characterization and comparison of capillary pore structures of digital cement pastes. *Materials and Structures*, 50(2), 154.

- <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1023-9>
- Drougkas, A., Roca, P., & Molins, C. (2016). Compressive strength and elasticity of pure lime mortar masonry. *Materials and Structures*, 49(3), 983–999. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0553-2>
- Durability of Concrete Incorporating High Volumes of Fly Ash From Sources in the U.S.A. (1994). *ACI Materials Journal*, 91(1). <https://doi.org/10.14359/4411>
- Engequisa. (2019). *Engequisa - Laboratório de Análises Ambientais*. ABNT NBR ISO/IEC 17025.
- Ferdosian, I., & Camões, A. (2017). Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 84, 146–156. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.08.019>
- Fernandez, L. P., Mikowski, P. C. B., Macioski, G., Nagalli, A., & Freire, F. B. (2018). Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(3). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0490>
- Fontes, W. . (2013). *Rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento*.
- França, D. F. S., Rey, R. O., Ferreira, L. R. C., & Ribeiro, D. V. (2016). 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*, 16(3), 153–166. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300098>
- Freitas, J. R. (2013). *Influência da Substituição Parcial de Cimento Portland por Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar nos Tempos de Início e Fim de Pega e no Calor de Hidratação de Produtos Cimentícios*. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Fuller, A., Stegmaier, M., Schulz, N., Menke, M., Schellhorn, H., Knödler, F., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2018). Use of wood dust fly ash from an industrial pulverized fuel facility for rendering. *Construction and Building Materials*, 189, 825–848. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.016>
- Fusade, L., Viles, H., Wood, C., & Burns, C. (2019). The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings. *Construction and Building Materials*, 212, 500–513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.326>
- Gerges, N., Issa, C. A., Antoun, M., Sleiman, E., Hallal, F., Shamoun, P., & Hayek, J. (2021). Eco-friendly mortar: Optimum combination of wood ash, crumb rubber, and fine crushed

- glass. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00588. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00588>
- Giannetti, B. F. . A. C. M. V. B. (2012). *Ecologia industrial - conceitos, ferramentas e aplicações: Vol. 3ª* (Blucher).
- Gluitz, A. C., Marafão, D., & Branco, P. (2013). *UTILIZAÇÃO DA CINZA DA MADEIRA DE EUCALIPTO NA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND EM ARGAMASSA*.
- Gomes, R., Tibiriçá, A., Nalon, G., & Carvalho, J. M. (2023, May 23). *Use of residues from the furniture industry as a construction material: an inventory and proposal for the furniture hub of Ubá, MG, Brazil*. <https://doi.org/10.55449/conresol.6.23.V-005>
- González-Kunz, R. N., Pineda, P., Bras, A., & Morillas, L. (2017). Plant biomass ashes in cement-based building materials. Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts. *Sustainable Cities and Society*, 31, 151–172. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.001>
- Goyal, S., Siddique, R., Jha, S., & Sharma, D. (2019). Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. *Construction and Building Materials*, 214, 169–177. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.023>
- Guo, A., Aamiri, O. B., Satyavolu, J., & Sun, Z. (2019). Impact of thermally modified wood on mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 208, 413–420. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.016>
- He, J., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2012). The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 30, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.011>
- He, Z., Zhao, X., Zhang, X., Zuo, W., Nie, X., & Zhao, J. (2025). Optimization of alkali-activated mortar utilizing municipal solid waste incinerator bottom ash and slag: A multi-objective response surface method approach. *Construction and Building Materials*, 458, 139660. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.139660>
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO2 utilization and removal. *Nature*, 575(7781), 87–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
- Hill, R. L., Sarkar, S. L., Rathbone, R. F., & Hower, J. C. (1997). An examination of fly ash carbon and its interactions with air entraining agent. *Cement and Concrete Research*,

- 27(2), 193–204. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00008-2)
- Horgnies, M., Chen, J. J., & Bouillon, C. (2013). *Overview about the use of Fourier Transform Infrared spectroscopy to study cementitious materials*. 251–262. <https://doi.org/10.2495/MC130221>
- Hossain, M. S., Ha, T., Song, C., & Yun, K. K. (2024). Influence of water-repellent admixtures (Sitren and Stearate materials) on the microstructure and mechanical performance of conventional Portland cement paste and mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e04036. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E04036>
- Ikotun, B. D., & Raheem, A. A. (2023). The comparative study of using wood ash in lieu of fly ash in South African blended cement paste and mortar. *Materials Today: Proceedings*, 85, 1–4. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.05.240>
- Ismail, M. K., & Hassan, A. A. A. (2016). Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 125, 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.044>
- Izquierdo, M., & Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*, 94, 54–66. <https://doi.org/10.1016/J.COAL.2011.10.006>
- Jamora, J. B., Go, A. W., Gudia, S. E. L., Giduquio, M. B., & Loretero, M. E. (2023). Evaluating the use of rice residue ash in cement-based industries in the Philippines – Greenhouse gas reduction, transportation, and cost assessment. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136623. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136623>
- Jiang, Z. Y., Sun, X. P., Luo, Y. Q., Fu, X. L., Xu, A., & Bi, Y. Z. (2024). Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials. *Construction and Building Materials*, 432, 136609. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.136609>
- Kamali, M., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. *Energy and Buildings*, 204, 109479. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109479>
- Kibert, C. J. (2007). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery 4th Edition* (US Green Building Council (Ed.); 3^a Edição).
- Krejcirikova, B., Ottosen, L. M., Kirkelund, G. M., Rode, C., & Peuhkuri, R. (2019). Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar. *Journal*

- of Building Engineering*, 21, 396–403. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.021>
- Kwan, A. K. H., & Li, Y. (2013). Effects of fly ash microsphere on rheology, adhesiveness and strength of mortar. *Construction and Building Materials*, 42, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.015>
- Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., & Bae, D. B. (2004). Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(4), 631–640. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.10.012>
- Liang, C., Le, X., Fang, W., Zhao, J., Fang, L., & Hou, S. (2022). The Utilization of Recycled Sewage Sludge Ash as a Supplementary Cementitious Material in Mortar: A Review. *Sustainability*, 14(8), 4432. <https://doi.org/10.3390/su14084432>
- Linkosalmi, L., Husgafvel, R., Fomkin, A., Junnikkala, H., Witikkala, T., Kairi, M., & Dahl, O. (2016). Main factors influencing greenhouse gas emissions of wood-based furniture industry in Finland. *Journal of Cleaner Production*, 113, 596–605. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.11.091>
- Machado, F. G. D. (2019). *Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do concreto de pós reativos utilizando resíduo de granito, no estado fresco e endurecido*. Universidade Federal de Viçosa.
- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 38, 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- Maffessoni, D. (2012). *Análise da situação ambiental das indústrias do pólo moveleiro de Bento Gonçalves*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Malathy, R., Shanmugam, R., Chung, I.-M., Kim, S.-H., & Prabakaran, M. (2022). Mechanical and Microstructural Properties of Composite Mortars with Lime, Silica Fume and Rice Husk Ash. *Processes*, 10(7), 1424. <https://doi.org/10.3390/pr10071424>
- Martínez-García, R., Jagadesh, P., Zaid, O., Şerbănoiu, A. A., Fraile-Fernández, F. J., de Prado-Gil, J., Qaidi, S. M. A., & Grădinaru, C. M. (2022). The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review. *Materials*, 15(15), 5349. <https://doi.org/10.3390/ma15155349>
- Martins, A. C. P., Franco de Carvalho, J. M., Duarte, M. do N., Lima, G. E. S. de, Pedroti, L. G., & Peixoto, R. A. F. (2022). Influence of a LAS-based modifying admixture on cement-based composites containing steel slag powder. *Journal of Building Engineering*, 53, 104517. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104517>

- Maschio, S., Tonello, G., Piani, L., & Furlani, E. (2011). Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere*, 85(4), 666–671. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.06.070>
- Matias, A. C. de P. (2018). *Utilização de escórias de aciaria em argamassas sustentáveis para revestimento de alvenarias*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Matos, J. P. C., & Alencar, T. C. D. S. B. D. de. (2018). Gerenciamento de resíduos sólidos e a aplicação da logística reversa no segmento da construção civil. *ID on Line REVISTA DE PSICOLOGIA*, 13(43), 784–807. <https://doi.org/10.14295/idonline.v13i43.1516>
- Medina, C., Sáez del Bosque, I. F., Frías, M., & Sánchez de Rojas, M. I. (2018). Design and characterisation of ternary cements containing rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 187, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.174>
- Mehta, P. . M. (2006). *Microstructure, Properties and Materials* (New York: McGraw-Hill (Ed.); P. Concrete).
- Modolo, R. C. E., Ferreira, V. M., Tarelho, L. A., Labrincha, J. A., Senff, L., & Silva, L. (2013). Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. *Construction and Building Materials*, 45, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.093>
- MOLLAH, M., KESMEZ, M., & COCKE, D. (2004). An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) investigation of the long-term effect on the solidification/stabilization (S/S) of arsenic(V) in Portland cement type-V. *Science of The Total Environment*, 325(1–3), 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.09.012>
- Moon, G. D., Oh, S., & Choi, Y. C. (2016). Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 124, 1072–1080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.148>
- Nadeem, A., Memon, S. A., & Lo, T. Y. (2013). Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin mortar at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 38, 338–347. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.042>
- NAHUZ, M. A. (2005). Resíduos da Indústria Moveleira. *SEMINÁRIO DE PRODUTOS SOLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO*.
- Nalon, G. H., Lopes Ribeiro, J. C., Duarte de Araújo, E. N., Marcio da Silva, R., & Pedroti, L. G. (2023). Effects of shrinkage-reducing admixtures and expansive agents on the self-sensing behavior of nanomodified cement-based materials. *Journal of Building*

- Engineering*, 78, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107648>
- Nasrazadani, S., Eghtesad, R., Sudoi, E., Vupputuri, S., Ramsey, J. D., & Ley, M. T. (2016). Application of Fourier transform infrared spectroscopy to study concrete degradation induced by biogenic sulfuric acid. *Materials and Structures*, 49(5), 2025–2034. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0631-5>
- NBR 13276. (2016). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência*.
- Neville, A., & Aïtcin, P.-C. (1998). High performance concrete—An overview. *Materials and Structures*, 31(2), 111–117. <https://doi.org/10.1007/BF02486473>
- Nwankwo, C. O., Bamigboye, G. O., Davies, I. E. E., & Michaels, T. A. (2020). High volume Portland cement replacement: A review. *Construction and Building Materials*, 260, 120445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120445>
- Ofosu-Adarkwa, J., Xie, N., & Javed, S. A. (2020). Forecasting CO₂ emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109945. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109945>
- Paiva, H., Silva, L. M., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2006). Effects of a water-retaining agent on the rheological behaviour of a single-coat render mortar. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1257–1262. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.02.018>
- Pan, S.-C., Tseng, D.-H., Lee, C.-C., & Lee, C. (2003). Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1749–1754. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00165-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00165-0)
- Park, J. H., & Yoon, C. B. (2024). Experimental Study of the Moisture Resistance of Cement Mortar Using Pozzolan Materials and Calcium Stearate. *Materials*, 17(5), 1014. <https://doi.org/10.3390/ma17051014>
- Patural, L., Marchal, P., Govin, A., Grosseau, P., Ruot, B., & Devès, O. (2011). Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 46–55. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.004>
- Pavlíková, M., Zemanová, L., Pokorný, J., Záleská, M., Jankovský, O., Lojka, M., Sedmidubský, D., & Pavlík, Z. (2018). Valorization of wood chips ash as an eco-friendly mineral admixture in mortar mix design. *Waste Management*, 80, 89–100. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.09.004>
- Pczieccek, A., Schackow, A., Effting, C., Gomes, I. R., & Dias, T. F. (2018). PROPERTIES

- OF MORTARS CONTAINING TIRE RUBBER WASTE AND EXPANDED POLYSTYRENE (EPS). *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 219–225. <https://doi.org/10.4090/juee.2017.v11n2.219225>
- PEDERSEN, K., JENSEN, A., SKJOTHRASMUSSEN, M., & DAMJOHANSEN, K. (2008). A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(2), 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.03.002>
- Pedroso, M., Flores-Colen, I., Silvestre, J. D., Gomes, M. G., Silva, L., & Ilharco, L. (2020). Physical, mechanical, and microstructural characterisation of an innovative thermal insulating render incorporating silica aerogel. *Energy and Buildings*, 211, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109793>
- Polli, F. H., Fioravante, E. V., Silva, S. H. L. da, Costa, M. do R. de M. M. da, & Pereira, E. (2023). Influência da ação combinada de aditivos, incorporador de ar e estabilizador de hidratação, nas propriedades da argamassa estabilizada por até 48 horas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 28(1). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620230001.1336>
- Rais, M. S., Shariq, M., Masood, A., Umar, A., & Alam, M. M. (2019). An experimental and analytical investigation into age-dependent strength of fly ash mortar at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 222, 300–311. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.06.167>
- Ramos, T., Matos, A. M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Mortar with wood waste ash: Mechanical strength carbonation resistance and ASR expansion. In *Construction and Building Materials* (Vol. 49, pp. 343–351). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.026>
- Rebello, T. A., Zulcão, R., Calmon, J. L., & Gonçalves, R. F. (2019). Comparative life cycle assessment of ornamental stone processing waste recycling, sand, clay and limestone filler. *Waste Management & Research*, 37(2), 186–195. <https://doi.org/10.1177/0734242X18819976>
- Resende, D. S. (2013). *Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavacode eucalipto como material cimentício suplementar*. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Ribeiro, N. P. (2009). *Alvenarias e argamassas: restauração e conservação*. 63–89.
- Riul, M. S. L. F. C. R. E. L. (2011, June). *Aspectos e Impactos Sociais e Ambientais da Indústria Moveleira e Experiências de Gestão*. 79–95.
- Romano, R. C. D. O., Torres, D. D. R., & Pileggi, R. G. (2015). Impact of aggregate grading

- and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. *Construction and Building Materials*, 82, 219–226. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.02.067>
- Roussel, N. (2012). *Understanding the rheology of concrete*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857095282>
- Rumman, R., Kamal, M. R., Bediwy, A., & Alam, M. S. (2023). Partially burnt wood fly ash characterization and its application in low-carbon mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 402, 132946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132946>
- Samya de Freitas, M., Sara Dorea de Oliveira, S., Aline Souza, S., & Antônio, P. J. (2019). O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. *Brazilian Applied Science Review*, 3(3), 1564–1585. <https://doi.org/10.34115/basrv3n3-006>
- Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2015). Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, 95, 197–206. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.07.164>
- Siddique, R. (2012). Utilization of wood ash in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 27–33. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2012.07.004>
- Silva, A. L. B. (2017). *PRODUÇÃO DE CONCRETO UTILIZANDO CINZAS DAS INDÚSTRIAS DE CERÂMICA VERMELHA EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO*. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
- Silva, G. J. B., Santana, V. P., & Wójcik, M. (2021). Investigation on mechanical and microstructural properties of alkali-activated materials made of wood biomass ash and glass powder. *Powder Technology*, 377, 900–912. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.09.048>
- Snellings, R., Chwast, J., Cizer, Ö., De Belie, N., Dhandapani, Y., Durdzinski, P., Elsen, J., Haufe, J., Hooton, D., Patapy, C., Santhanam, M., Scrivener, K., Snoeck, D., Steger, L., Tongbo, S., Vollpracht, A., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2018). RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures*, 51(6), 172. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1298-5>
- Soliman, A., Hafeez, G., Erkmen, E., Ganesan, R., Ouf, M., Hammad, A., Eicker, U., & Moselhi, O. (2022). Innovative construction material technologies for sustainable and

- resilient civil infrastructure. *Materials Today: Proceedings*, 60, 365–372. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.01.248>
- Song, Y., Xiang, J., Cui, W., & Xiong, G. (2023). Anhydrous ethanol as a medium used to grind soda-lime glass for cement-based materials preparation: Evaluating its rheological behavior by the Herschel–Bulkley and Modified–Bingham models. *Journal of Building Engineering*, 63, 105553. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.105553>
- SOUZA, A. H. F. DE, GONÇALVES, N. A. A., MONTEIRO, V. I., SANTOS, C. Q., & PAES, I. N. L. (2023, November 26). AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO CAPILAR DE ÁGUA DE DIFERENTES ARGAMASSAS E SUA RELAÇÃO COM A MICROESTRUTURA. <https://doi.org/10.46421/sbta.v14.4758>
- Supit, S. W. M., Shaikh, F. U. A., & Sarker, P. K. (2014). Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 51, 278–286. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.002>
- Tantawy, M. A. (2017). Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 05(11), 33–48. <https://doi.org/10.4236/msce.2017.511004>
- Teófilo, R. F., & Ferreira, M. M. C. (2006). Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. *Química Nova*, 29(2), 338–350. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000200026>
- Torres, I., Matias, G., & Faria, P. (2020). Natural hydraulic lime mortars - The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering*, 32, 101747. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101747>
- Trezza, M. ., & Lavat, A. . (2001). Analysis of the system $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O--CaCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ by FT-IR spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 869–872. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00502-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00502-6)
- Tyagi, B., Chudasama, C. D., & Jasra, R. V. (2006). Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 64(2), 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2005.07.018>
- Utama, D. M., Ardiyanti, N., & Putri, A. A. (2022). A new hybrid method for manufacturing sustainability performance assessment: a case study in furniture industry. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 760–783. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2141366>

- Vamvuka, D. (2009). Comparative fixed/fluidized bed experiments for the thermal behaviour and environmental impact of olive kernel ash. *Renewable Energy*, *34*(1), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.032>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, *94*, 1–33. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2011.09.030>
- Vieira, D. R., Calmon, J. L., & Coelho, F. Z. (2016). Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *124*, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125>
- VISENTIN, R. . M. C. M. D. A. . E. M. S. T. . B. R. L. V. . C. C. V. (2017, June 20). COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO EM BOTUCATU: AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE CUSTOS. *Anais Do 8º Forum Internacional de Resíduos Sólidos*.
- Wang, H., Wu, J.-J., Zhu, X., Liao, Q., & Zhao, L. (2016). Energy–environment–economy evaluations of commercial scale systems for blast furnace slag treatment: Dry slag granulation vs. water quenching. *Applied Energy*, *171*, 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.079>
- Wang, S., & Baxter, L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology*, *88*(11–12), 1165–1170. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.016>
- Wei, J., & Cen, K. (2019). Empirical assessing cement CO₂ emissions based on China’s economic and social development during 2001–2030. *Science of The Total Environment*, *653*, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.371>
- Wihersaari, M. (2005). Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. *Biomass and Bioenergy*, *28*(5), 444–453. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.011>
- Xia, B., Ding, T., & Xiao, J. (2020). Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, *105*, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015>
- Xiao, J., Wang, C., Ding, T., & Akbarnezhad, A. (2018). A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, *199*, 868–881. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.210>
- Yan, S., Sagoe-Crentsil, K., & Shapiro, G. (2011). Reuse of de-inking sludge from wastepaper recycling in cement mortar products. *Journal of Environmental Management*, *92*(8),

2085–2090. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.03.028>

- Yaseen, S. A., Yiseen, G. A., & Li, Z. (2019). Elucidation of Calcite Structure of Calcium Carbonate Formation Based on Hydrated Cement Mixed with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. *ACS Omega*, 4(6), 10160–10170. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b00042>
- Zeng, X., Chen, L., Zheng, K., Ling, C., Zhu, H., Liu, H., Wang, P., Li, K., Liu, Z., & Wang, M. (2020). Electrical resistivity and capillary absorption in mortar with styrene-acrylic emulsion and air-entrained agent: improvement and correlation with pore structure. *Construction and Building Materials*, 255, 119287. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119287>
- Zhang, J., Qin, L., & Li, Z. (2009). Hydration monitoring of cement-based materials with resistivity and ultrasonic methods. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(1), 15–24. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9363-0>
- Zhang, S., Zhang, Y., & Li, Z. (2018). Ultrasonic monitoring of setting and hardening of slag blended cement under different curing temperatures by using embedded piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials*, 159, 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.124>
- Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 95, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.050>
- Zmamou, H., Leblanc, N., Levacher, D., & Kubiak, J. (2021). Recycling of high quantities of wastepaper sludge ash for production of blended cements and alternative materials. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101524. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101524>
- Zutshi, A., Creed, A., Holmes, M., & Brain, J. (2016). Reflections of environmental management implementation in furniture. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 44(8), 840–859. <https://doi.org/10.1108/IJRDM-10-2015-0154>