

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA DE MATTOS NESI

**ESTUDO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA
QUEIMA DE BIOMASSA DE MADEIRA EM ARGAMASSAS**

GUARAPUAVA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANA PAULA DE MATTOS NESI

**ESTUDO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA
QUEIMA DE BIOMASSA DE MADEIRA EM ARGAMASSAS**

Study of the Potential Use of Ashes from Wood Biomass Combustion in Mortars

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel/Licenciado em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Dra. Géssica Katalyne Bilcati

GUARAPUAVA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANA PAULA DE MATTOS NESI

**ESTUDO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DA QUEIMA
DE BIOMASSA DE MADEIRA EM ARGAMASSAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de
Bacharel/Licenciado em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Dra. Géssica Katalyne Bilcati

Data de aprovação: 11/Setembro/2024

Géssica Katalyne Bilcati

Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Henrique Ajuz Holzmann

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

Edson Florentino De Souza

Mestre

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Guarapuava

GUARAPUAVA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por toda força e proteção. Obrigada, Pai, por todas as bênçãos nessa caminhada.

Aos meus pais, Maristela e Irineu, e meus irmãos, Giuliano, Patricia e Analia, deixo expressa minha eterna gratidão, que por vezes distantes, sempre me apoiaram, colocarem fé no meu potencial, me incentivaram e jamais descreditaram de mim.

A toda minha família, que foram fundamentais para minha perseverança.

Ao meu companheiro e colega de graduação, Antonio Ricardo, por todo o apoio incondicional e amor ao longo dos anos, encarar essa jornada acadêmica ao seu lado tornou tudo mais fácil e gratificante.

A todos os amigos que estiveram comigo dentre tantas experiências acadêmicas, principalmente dentro da Empresa Junior, de maneira geral, vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha orientadora Géssica Katalyne Bilcati, pela disponibilidade, experiência compartilhada, amizade, apoio e contribuição no amadurecimento do meu conhecimento. E também por sempre estar pronta a ajudar, doando-se em um trabalho conjunto. Agradeço imensamente as sugestões que engrandeceram esse trabalho.

À técnica de laboratório Rafaella Salvador, pela assistência e apoio imprescindível durante os experimentos, sempre disponível, sendo indispensável durante essa pesquisa.

A professora Eloise Aparecida Langaro da Universidade Estadual de Ponta Grossa pela doação da cinza de madeira pronta para o uso.

Enfim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, seus colaboradores e servidores, pelo ensino público e de qualidade.

RESUMO

O desempenho das argamassas é influenciado pelas matérias-primas utilizadas e pelas proporções em que são combinadas, o que determina tanto o comportamento do material durante a aplicação quanto a microestrutura do produto final endurecido. A utilização de materiais de construção civil que ofereçam maior desempenho, reduzam custos e minimizem impactos ambientais é uma alternativa promissora. Nesse contexto, a presente pesquisa avaliou a utilização de cinzas provenientes da queima de biomassa de madeira na substituição parcial do cimento em teores de 10% e 15% em argamassas no estado fresco. O estudo foi desenvolvido considerando o impacto das substituições da cinza de madeira nas argamassas através da consistência, por meio do ensaio *flow-table*, da densidade de massa, do teor de ar incorporado e do comportamento reológico através do ensaio de *squeeze-flow*. A substituição parcial em 10% e 15% resultou na redução do índice de consistência das argamassas em 5,76% e 9,61%, respectivamente, em comparação com a argamassa de referência, o que se deve à natureza hidrofílica da cinza. Por outro lado, a substituição de cinza de madeira não alterou a densidade de massa nem o teor de ar incorporado. Em relação ao comportamento reológico, as argamassas com cinza de madeira apresentaram menor deslocamento, o que indica redução da capacidade de acomodar deformações estruturais e um maior risco de fissuras. Essa redução de plasticidade foi observada independentemente do tempo de mistura (15, 30 ou 45 minutos). Apesar dos impactos positivos na sustentabilidade, a incorporação das cinzas reduziu a trabalhabilidade das argamassas, sugerindo a necessidade de estudos adicionais que incluam aditivos plastificantes para viabilizar o uso desse material em larga escala.

Palavras chaves: Cinza de madeira, argamassas, substituição parcial do cimento, *squeeze-flow*.

ABSTRACT

The performance of mortars is influenced by the raw materials used and the proportions in which they are combined, which determine both the material's behavior during application and the microstructure of the final hardened product. The use of civil construction materials that offer higher performance, reduce costs, and minimize environmental impacts is a promising alternative. In this context, the present research evaluated the use of ashes from wood biomass burning as partial replacement of cement at levels of 10% and 15% in fresh state mortars. The study was developed considering the impact of wood ash substitutions on mortars through consistency, using the flow-table test, bulk density, air content, and rheological behavior through squeeze-flow test. The partial replacement at 10% and 15% resulted in a reduction in mortar consistency index by 5.76% and 9.61%, respectively, compared to the reference mortar, attributed to the hydrophilic nature of the ash. On the other hand, wood ash replacement did not alter bulk density or air content. Regarding rheological behavior, mortars with wood ash showed less displacement, indicating reduced ability to accommodate structural deformations and a higher risk of cracking. This reduction in plasticity was observed regardless of mixing time (15, 30, or 45 minutes). Despite the positive impacts on sustainability, ash incorporation reduced the workability of mortars, suggesting the need for additional studies that include plasticizing additives to enable the widespread use of this material.

Keywords: Wood ash, mortars, partial cement replacement, squeeze-flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio reológico de squeeze-flow identificando a condição de início e final de ensaio.....	18
Figura 2 – Perfil de uma curva carga versus deslocamento de um ensaio de <i>squeeze-flow</i> com controle de deformação.....	19
Figura 3 - Fluxograma Experimental.....	22
Figura 4 – Amostras de cinza.....	23
Figura 5 – Argamassas após a retirada do tronco de cone na flow-table.....	28
Figura 6 – Medição do espalhamento das argamassas.....	29
Figura 7 – Medição dos recipientes com argamassa. (a) argamassa de referência; (b) argamassa com 10% de substituição do cimento; (c) argamassa com 15% de substituição do cimento.....	30
Figura 8 - Máquina universal de ensaios - EMIC DL30000N.....	31
Figura 9 – Ensaio <i>Squeeze-Flow</i> em argamassa com 15% de substituição.....	32
Figura 10 – Ensaio <i>Squeeze-Flow</i> argamassa de referência.....	32
Figura 11 – Ensaio <i>squeeze-flow</i> em base cerâmica. (a) Argamassa com 15% de substituição sob a base. (b) Momento do ensaio da amostra. (c) Base cerâmica após retirada imediata da amostra.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulação, traço e quantidade de materiais para produção da argamassa.....	26
Tabela 2 – Relação água/cimento e índice de consistência resultante.....	27
Tabela 3 – Massa específica e massa unitária.....	32
Tabela 4 – Composição granulométrica areia natural.....	33
Tabela 5 – Massa específica e massa unitária dos aglomerantes.....	34
Tabela 6 – Massa específica e massa unitária dos aglomerantes.....	35
Tabela 7 – Resultados para densidade de massa nas argamassas.....	37
Tabela 8 – Resultados para teor de ar incorporado nas argamassas.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das argamassas quanto suas funções.....	16
Quadro 2 – Ensaio de caracterização dos materiais.....	23
Quadro 3 – Resumo das especificações da ABNT para cimento Portland.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/cimento
cm	Centímetro
CP	Cimento Portland
C.V.	Coeficiente de variação
Desv. Pad	Desvio padrão
DXR	Difração de Raio-X
g	grama
IC	Índice de Consistência
NBR	Normas Brasileiras
NM	Norma Mercosul
min	Minutos
REF	Referência
SANEPAR	Companhia de saneamento do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
kg	Quilograma
kN	Quilonewton

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Utilização das argamassas na construção civil	15
2.2 Propriedades da argamassa no estado fresco	16
2.3 Squeeze-flow	18
2.4 Cinza de madeira na construção civil	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Materiais emegados na pesquisa	22
3.1.1 Caracterização da areia.....	23
3.1.2 Caracterização dos aglomerantes	25
3.1.4 Formulação das argamassas.....	26
3.1.5 Determinação da relação água/cimento	27
3.2 Métodos	28
3.2.1 Ensaio de índice de consistência (<i>flow-table</i>).....	28
3.2.5 Densidade de massa e teor de ar incorporado	29
3.2.6 Comportamento reológico (<i>Squeeze-flow</i>)	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Caracterização dos materiais	33
4.1.1 Caracterização do agregado miúdo.....	33
4.1.2 Caracterização do aglomerante e cinza	34
4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco	36
4.2.1 Caracterização da consistência das argamassas produzidas	36
4.2.2 Caracterização da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas produzidas	37
4.2.3 Caracterização do comportamento reológico das argamassas produzidas....	38
5. CONCLUSÃO	41
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	42
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

A busca por materiais para construção civil que garantam maior desempenho bem como reduzir os custos e prejuízos ambientais está em ascensão. Grande parte dos resíduos gerados por indústrias pode ser incorporado, de modo a produzir novos materiais de construção econômicos e sustentáveis, atendendo à crescente demanda que atualmente exige esta área (GLUITZ; MARAFÃO, 2013). Isso tem levado a um aumento significativo no número de publicações que abordam o estudo da utilização de resíduos na produção de materiais destinados à construção civil, como Resende (2013), Lima (2008) e Gluitz *et. al.* (2013) trouxeram em suas pesquisas.

O emprego de resíduos em materiais de construção, tais como materiais cimentícios suplementares, que são subprodutos de indústrias como também componentes de madeira, pode ser uma alternativa vantajosa devido à redução do emprego de matérias-primas não renováveis que são necessárias às atividades da construção civil (GLUITZ, MARAFÃO, 2009).

A substituição do cimento Portland na construção civil é uma das metas perseguidas, isso porque o clínquer, principal material constituinte do cimento Portland, resultante da calcinação a 1450°C de uma mistura de calcário, argila e corretivos químicos produz 440 quilogramas de CO₂ para produzir uma tonelada do produto (KYHARA E CENTURIONE, 2005; JOHN, 2007). Portanto, as cinzas quando incorporada aos compostos cimentícios receberão um destino diferenciado, diminuindo a agressão ao meio ambiente, e promovendo a melhoria nas características físicas e mecânicas do material, assim como em suas características ecológicas (BORGES *et. al.* 2017).

O comportamento dos materiais de construção civil depende das propriedades dos componentes que os integram e suas interações. A fluidez inicial de suspensões concentradas, tais como a argamassa, também depende da composição granulométrica, do índice de forma e da textura superficial das partículas (BONEN e SARKAR, 1995).

A reologia, ciência voltada ao estudo do escoamento e da deformação da matéria, abrange diversos campos de conhecimento. A aplicação dos conceitos da reologia pode englobar diferentes materiais, entre eles os materiais à base

de cimento. Esses materiais, quando no estado fresco apresentam um comportamento intermediário entre o líquido ideal e o estado sólido, podendo conferir, em função de suas características e composições, comportamento visco plástico (OLIVEIRA, 2013). Logo, o estudo do comportamento reológico da argamassa pode ser utilizado para selecionar e otimizar as adições de materiais alternativos, bem como a utilização de resíduos, fornecendo informações úteis sobre estudos de dosagem, plasticidade e facilidade de aplicação.

Dentre os materiais de construção, destaca-se as argamassas de revestimento, responsáveis pela estanqueidade e durabilidade dos elementos de parede nas quais são aplicadas (HADDAD, 2020). As argamassas são aplicadas no estado fresco e, apesar de ser uma etapa intermediária do processo, o comportamento reológico é de fundamental importância para possibilitar uma moldagem fácil e isenta de defeitos, minimizando a ocorrência de patologia nos revestimentos após endurecimento (fissuras, descolamento e manchas) (CARDOSO, PILEGGI, JOHN, 2010).

Diante desse contexto este trabalho tem por finalidade avaliar a viabilidade técnica do emprego de cinzas oriundas da queima de biomassa de madeira, na substituição parcial do cimento em argamassas, visando proporcionar uma alternativa de destino ao resíduo por meio de sua reintrodução em uma cadeia produtiva, além de reduzir a demanda por um material de origem não renovável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho pretende avaliar a influência da substituição parcial do cimento pelas cinzas provenientes da queima de biomassa de madeira nas propriedades do estado fresco de argamassas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir argamassas com diferentes teores de substituição parcial do cimento por cinzas de madeira;
- Caracterizar as argamassas produzidas no estado fresco de acordo com as normatizações técnicas;

- Avaliar o comportamento reológico das argamassas produzidas em substratos metálicos e tempos de mistura de 15, 30 e 45 minutos e em substrato cerâmico em tempo de mistura de 15 minutos;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Utilização das argamassas na construção civil

Conforme a NBR 13529 (ABNT, 2013a), a argamassa convencional é um material de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtido através de uma mistura homogênea de um ou mais ligantes (cimento e cal), água e agregado miúdo (areia), podendo conter aditivos e adições minerais.

As principais características e desempenho da argamassa dependem principalmente da dosagem e do tipo de materiais utilizados na sua produção. Desta maneira, é importante conhecer os materiais que compõem a mesma (MATOS, 2013).

A argamassa é um material que pode ser utilizado para revestir pisos, tetos e paredes (emboço e reboco) ou para assentar tijolos, blocos, azulejos e ladrilhos, bem como para reparar obras de concreto e injeção (MEDEIROS, 2016).

Segundo Jesus (2023) a argamassa quando utilizada para função de revestimento tem como função cobrir, nivelar e proteger as alvenarias de fechamento estrutural da ação direta dos agentes agressivos e auxiliar as vedações nas suas funções de isolamento térmico e acústico.

Quando utilizada para assentamento de tijolos e blocos, conforme Oliveira (2001), a argamassa deve ter função de distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda área resistente dos blocos, unir a alvenaria para resistir a esforços laterais e absorver suas deformações naturais.

Para fins de classificação, Laverde *et al.* (2017) correlaciona as argamassas em cinco funções, o Quadro 1 mostra os tipos de argamassa para cada uma delas.

Quadro 1 - Classificação das argamassas quanto suas funções.

Função	Tipos
Para construção de alvenaria	Argamassa de assentamento Argamassa de fixação (ou encunhamento)
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco Argamassa de emboço Argamassa de reboco

	Argamassa de camada única Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de piso	Argamassa de contrapiso Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes/pisos)	Argamassa de assentamento de peças de cerâmica-colante Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Laverde *et al.*, 2017.

Além disso, segundo Costa (2016), para que as argamassas funcionem adequadamente, elas precisam apresentar propriedades específicas, que podem estar nos dois estados que os materiais passam durante o processo de emprego como insumo de um sistema de revestimento e assentamento: estado fresco e endurecido.

As proporções entre aglomerante e agregado, componentes da argamassa, também devem ser determinadas. A indicação dessas proporções é chamada traço, que é tradicionalmente indicado em volumes (FIORITO, 1994).

Além do traço, fatores como granulometria do agregado, compactação da massa e modo de lançamento, condições de temperatura e umidade e quantidade de água, fazem com que a resistência aos esforços mecânicos da argamassa mude de comportamento (FIORITO, 1994; MOLITERNO, 1995).

2.2 Propriedades da argamassa no estado fresco

De acordo com o Manual de Revestimentos da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2002), as propriedades da argamassa devem ser compatíveis com a forma de aplicação, à natureza da base, às condições climáticas locais e ao sistema de acabamento recomendado.

Algumas características são essenciais para verificar o desempenho da argamassa no estado fresco, avaliar o seu processo de adensamento e homogeneidade da mistura. Entre elas destacam-se a trabalhabilidade, consistência, incorporação de ar e densidade da massa.

A trabalhabilidade é a característica mais importante, quando relacionada ao estado fresco, ela determina a facilidade com a qual as argamassas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas e acabadas com uma condição homogênea (CARASEK, 2017). Sendo assim, a trabalhabilidade da argamassa influencia diretamente no manuseio do material, e sua avaliação depende da sensibilidade e experiência dos trabalhadores envolvidos (SOUSA; BAUER, 2002).

Por essa razão, Giroto *et al.* (2014) explicam que o conceito de trabalhabilidade deve ser traduzido em medidas reológicas mensuráveis para que essa avaliação seja de comum interpretação. O método de ensaio *Squeeze-flow* atualmente surge como uma alternativa para avaliação do comportamento reológico nas argamassas. Segundo Freitas (2010) o ensaio reside no fato de que a deformação efetiva do material comprimido entre as placas ocorre por cisalhamento radial quando a razão entre o diâmetro (D) e a espessura da amostra (h) for elevada ($D/h > 5$). Razões inferiores levam ao surgimento de tensões de compressão (MEETEN, 2004).

A consistência é uma propriedade que descreve a capacidade da argamassa fluir e preencher o volume onde é contida, para a determinação da homogeneidade, resistindo à segregação e à exsudação (CARDOSO, 2017), ou seja, a dosagem de água na formulação e a capacidade de resistir a deformações são fatores que impactam diretamente essa propriedade.

Para avaliação do índice de consistência é realizado o ensaio de mesa de fluidez (*flow-table*), que se constitui e em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone (CARDOSO, 2009).

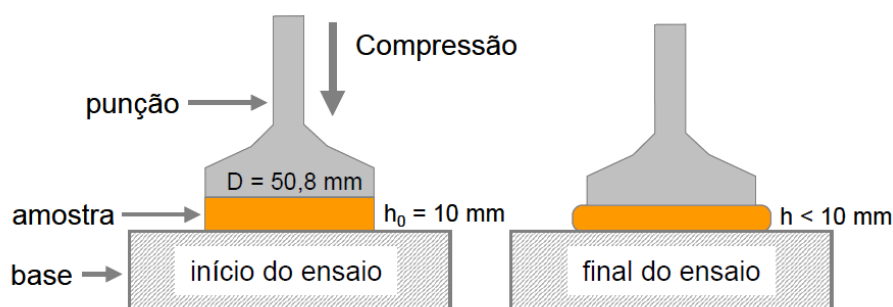
Segundo Koehler, *et al.* (2003), os resultados obtidos não dissociam a contribuição de cada um dos parâmetros reológicos (viscosidade e tensão de escoamento), e são apresentados quantitativamente na forma de índice de consistência ou porcentagem de espalhamento e não em termos de unidades reológicas fundamentais. Outra desvantagem do método quando utilizado para caracterização de argamassas é que não reproduz as condições de aplicação práticas do material (lançamento com alto impacto seguido de espalhamento sob intenso cisalhamento).

Por fim, a incorporação de ar e densidade de massa também são parâmetros importantes que influenciam na trabalhabilidade da argamassa. A presença de ar incorporado no estado fresco, provoca ganho de consistência e plasticidade (BAUER, 2005). Por sua vez, Cintra et. al. (2014) define a densidade de massa como a relação entre as massas da argamassa e o seu volume, além disto argamassas densas demandam maior força de aplicação, consequentemente dificultando o manuseio da mão-de-obra (LACERDA et. al, 2023).

2.3 Squeeze-flow

Utilizada para a caracterização dos mais diversos tipos de pastas, o “squeeze-flow” é a técnica multiponto mais indicada na caracterização reológica de argamassas. O método baseia-se na medida do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas, e pode ser realizado em equipamentos do tipo máquina universal de ensaios (CARDOSO, 2009).

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio reológico de *squeeze-flow* identificando a condição de início e final de ensaio.



Fonte: Cardoso et. al (2005).

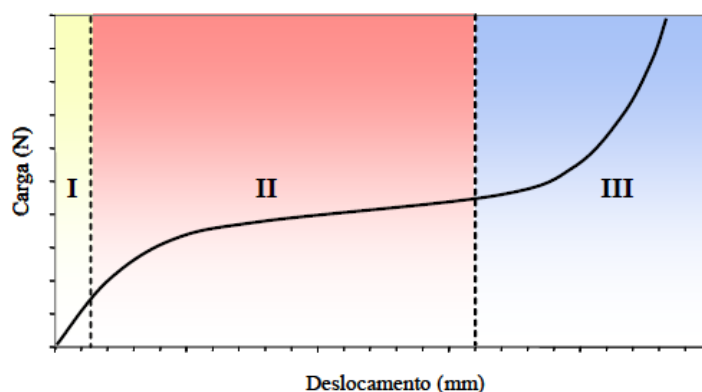
Nota: D = diâmetro da punção (placa superior) = diâmetro da amostra; h_0 = distância inicial entre o punção e a base (placa inferior) = altura inicial da amostra; h = altura da amostra variável em função do deslocamento do punção superior.

Quando o comportamento reológico da argamassa não é adequado à energia de lançamento utilizada, são criados vazios na região da interface que permanecem após o endurecimento, reduzindo a área de contato e consequentemente, a aderência entre o revestimento e a base (ANTUNES, 2005). Portanto, a adequação (seja manual ou mecânica) fornece condições de

processamento mais favoráveis para a obtenção das máximas propriedades finais do revestimento. (CARDOSO, 2009).

Segundo Cardoso (2009) a resposta do ensaio é expressa de maneira simples e direta. Resultando em gráficos de carga vs. deslocamento ou tensão vs. deslocamento, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Perfil de uma curva carga versus deslocamento de um ensaio de *squeeze-flow* com controle de deformação.



Fonte: Betioli *et. al* (2009).

Segundo Cardoso *et. al* (2010) os resultados obtidos pelo perfil das três regiões podem ser explicados como:

“No primeiro estágio, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear, o que diz que a argamassa possivelmente apresentará problemas de fissuração ainda no estado fresco devido à recuperação elástica após a retirada do esforço (após a passagem da desempenadeira). No estágio seguinte, em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação, superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico, e assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento de argamassas. Já no terceiro estágio, em grandes deformações, ocorre um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para prosseguir a deformação do material. Provavelmente, este é um estágio de comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material devem ser dificultados, devido às altas cargas (tensões) necessárias para deformá-lo, possivelmente levando a um acabamento defeituoso (CARDOSO *et al.*, 2010, p 18).”

O método *squeeze-flow* permite a variação da taxa de cisalhamento e também da magnitude das deformações. Compressão simples controlada por deslocamento, oscilação, compressão por força controlada, aplicação de patamares de relaxação, são procedimentos que podem ser utilizados para

determinação de diversos parâmetros reológicos e também para a simulação de situações práticas (MEETEN, 2000; MEETEN, 2004; OSKAN *et. al.*, 2009)

No lançamento contra o substrato, por exemplo, a argamassa é solicitada em altas taxas de cisalhamento e grandes deformações, enquanto as etapas de desempenho e acabamento podem submetê-la a deformações e taxas de cisalhamento bastante variáveis. (CARDOSO *et al.*, 2010). Ficando evidente que o estudo do comportamento reológico das argamassas é fundamental, pois possibilita avaliar a facilidade de aplicação do material (MATTANA *et. al.*, 2013)

2.4 Cinza de madeira na construção civil

Há milhares de anos o homem usa a madeira como combustível e, com o passar do tempo, a sua utilização e importância aumentou cada vez mais, principalmente para fins industriais (BORGES *et.al.*, 2017). De acordo com John (2003), cinzas, de forma geral, podem ser utilizadas como adição mineral em composto cimentícios seguindo alguns critérios básicos, tais como: ser de origem industrial ou vegetal, ser predominantemente siliciosa, que possa ser produzida no estado amorfo e com finura adequada. Nesta conjuntura, o estudo dos resíduos provenientes de cinzas da madeira empregadas nesse estudo, que foram incorporadas em argamassas, podem minimizar o impacto ambiental.

De acordo com Borlini *et. al.* (2005) entre as alternativas tecnológicas que visam diminuir os impactos ambientais oriundos da liberação indiscriminada de resíduos, em especial as cinzas, a melhor seria o seu uso em produtos relacionados à construção civil. Visto que se trata de materiais produzidos em grandes quantidades e é facilmente encontrado no país, além de possuir características físicas pela presença de partículas finas das adições, preenchendo os vazios, ocorrendo a diminuição dos poros da estrutura e causando o efeito filler. (BORGES, *et. al.* 2017).

Além disso, a presença das pequenas partículas, apesar de serem menos reativas que o cimento, provocam o surgimento de locais de nucleação para a precipitação de produtos de hidratação, tornando a pasta mais densa e homogênea pela diminuição do diâmetro e melhor distribuição dos poros (MORAES, 2001).

De forma similar às cinzas de casca de arroz e às cinzas de bagaço de cana de açúcar, estas cinzas de cavaco de eucalipto se amorfas e com composição química adequada podem apresentar-se como pozolanas para a produção de concretos mais resistentes e menos porosos. Adicionalmente, no caso de serem cristalinas, elas podem, também, atuar como filler e também melhorar as propriedades do concreto. Em ambos os casos essas cinzas são materiais importantes para a produção de concretos duráveis. A reatividade das cinzas no cimento depende de sua superfície específica e do teor de sílica amorfa presente (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A utilização da cinza da serragem, por exemplo, como substituto parcial do cimento Portland é recente e pode contribuir em dois aspectos: a redução da eliminação deste resíduo no meio ambiente e a diminuição da quantidade/custo de cimento utilizado em argamassas e concretos (ELINWAH e MAHMOOD, 2004).

Dessa forma, fica evidente que a compreensão da utilização das cinzas de madeira em substituição parcial do cimento é fundamental para que se avance no desenvolvimento de técnicas para a viabilização desse produto em escala comercial.

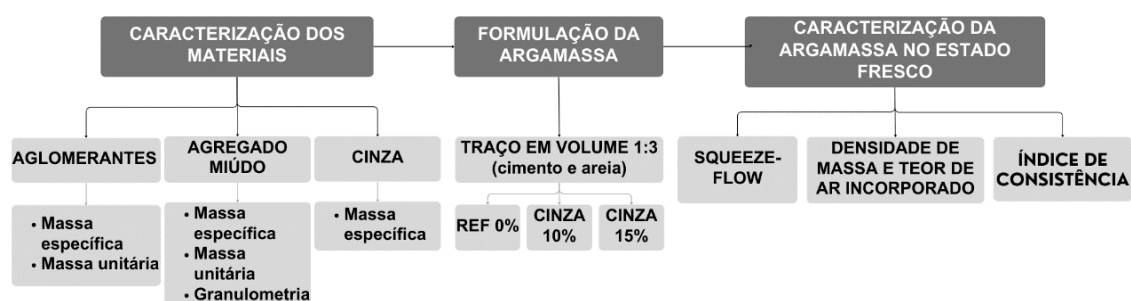
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item é apresentada a descrição do programa experimental da pesquisa, e para sua estruturação foram definidos parâmetros que constituem as variáveis da análise experimental sendo os teores de substituição parcial do cimento em 10% e 15% em relação a massa do cimento e o traço empregado de 1:3 (em volume), 1 de cimento e 3 de areia.

Os materiais utilizados na execução dos ensaios desta pesquisa foram cimento Portland CP II F-32, areia natural, água e cinzas provenientes da queima de madeira do beneficiamento de grãos.

A Figura 3 apresenta um fluxograma do planejamento da desta pesquisa.

Figura 3 - Fluxograma Experimental



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1 Materiais empregados na pesquisa

Para essa pesquisa utilizou-se o cimento Portland CP II F-32, o qual é comum na fabricação de argamassas. Este tipo de cimento reduz o impacto ambiental, já que a extração e aplicação do mineral libera menos CO₂ para o meio ambiente Bilcati *et al.* (2020).

A areia utilizada foi fornecida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e caracterizada de acordo com a NBR 16915 (ABNT, 2021) estabelecendo os procedimentos para amostragem dos agregados.

A água utilizada foi fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná decorrente da Companhia de Saneamento Básico do Paraná (SANEPAR).

A cinza foi proveniente da queima de biomassa de madeira de uma empresa da cidade de Ponta Grossa.

Figura 4 – Amostras de cinza



Fonte: Autoria própria (2024)

A fim de obter o valor das propriedades de cada um dos materiais utilizados nesse estudo, os ensaios foram parametrizados de acordo com as normas técnicas correspondentes, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 2 – Ensaios de caracterização dos materiais

Aglomerante	
Propriedade	Norma Utilizada
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR NM 23 (ABNT, 2001)
Agregado miúdo	
Propriedade	Norma Utilizada
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica	NBR 9776 (ABNT, 1986)
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2001)
Cinza	
Propriedade	Norma Utilizada
Massa específica	-
Massa unitária	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: Autoria Própria (2024).

3.1.1 Caracterização da areia

Através das diretrizes apresentadas pela norma ABNT NBR NM 248 (2001) foi possível executar os ensaios para a caracterização do agregado miúdo

utilizado. As amostras de areia estavam previamente secas em estufa por um período mínimo de 24h a $100 \pm 5^\circ\text{C}$.

Os equipamentos e materiais utilizados para o ensaio de granulometria foram peneiras com aberturas entre 0,15mm a 4,75mm, uma balança de precisão, a amostra do material, peneira de fundo e tampa e escova de cerdas macias.

Inicialmente o material é separado em 500 g dentro de um recipiente, as peneiras empilhadas de maneira decrescente com o fundo colocado na parte inferior do empilhamento e são colocadas no agitador mecânico. Logo, a amostra é adicionada na peneira superior e tampada e inicia-se a agitação por 15 minutos. Areia retida em cada peneira é pesada e o cálculo da composição granulométrica é realizado, sendo a porcentagem de material retido em relação a massa total da amostra seca, resultando no gráfico de curva granulométrica

Para determinar a massa específica foi realizado o método do frasco Chapman regido pela norma ABNT NBR 9776 (1986). No primeiro momento, colocou-se água no frasco Chapman até a marca de 200 cm^3 . Na sequência, foram pesados 500 g de areia, os quais foram introduzidos no frasco com a ajuda de um funil. Por fim, foi feita a leitura do volume deslocado pelo conjunto de água e agregado na graduação do gargalo do frasco. Logo, a massa específica foi determinada pela Equação 1.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (1)$$

Sendo:

γ a massa específica do agregado miúdo, em g/cm^3 ;

L a leitura final obtida no frasco, em cm^3 .

Por fim, a massa unitária no estado do agregado miúdo, foi regida pela norma ABNT NBR NM45 (2006), sendo pesado um recipiente vazio para determinar sua massa e calcular seu volume, posteriormente, o mesmo recipiente é preenchido com a amostra de areia até um terço, adensado com 25 golpes e logo em seguida adicionado o restante do agregado, com a ajuda de uma régua metálica a amostra é nivelada e o recipiente pesado. Logo, a massa unitária é obtida pela Equação 2.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} \quad (2)$$

Sendo:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado, em g/cm³;

m_r = massa do recipiente vazio, em g;

m_{ar} = massa do recipiente com a amostra, em g;

V = volume do recipiente, em cm³.

3.1.2 Caracterização dos aglomerantes

Para determinar a massa específica do aglomerante foi utilizado o método do frasco Le Chatelier regido pela norma NBR NM 23 (ABNT, 2000). O ensaio iniciou com a pesagem de 60 g de cimento Portland CP || F-32, em seguida em um frasco volumétrico Le Chatelier foi preenchido com solvente orgânico, aguarrás, até atingir a marca de 0,5cm³ e o aglomerante foi adicionado ao frasco com auxílio de um funil, O frasco foi então agitado, realizando-se movimentos circulares para retirar as borbulhas de ar presentes e garantindo que todo o material precipitasse até o fundo. Logo, a massa específica foi obtida pela Equação 3.

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_2} \quad (3)$$

Sendo:

ρ = massa específica do aglomerante, em g/cm³;

m = massa do aglomerante, em g;

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado, dado pela diferença entre o volume inicial (V_1) e o volume final (V_2) em cm³;

Para determinação da massa unitária no estado do aglomerante, foi utilizada a norma ABNT NBR NM45 (2006). Sendo pesado um recipiente vazio para determinar sua massa e calcular seu volume, posteriormente, o mesmo recipiente é preenchido com a amostra de cimento até um terço, adensado com 25 golpes e logo em seguida adicionado o restante do aglomerante, com a ajuda de uma régua metálica a amostra é nivelada e o recipiente pesado. Logo, a massa unitária é obtida pela Equação 2 mencionado nos ensaios anteriores.

As cinzas de madeira foram caracterizadas por meio do ensaio de difratometria de raios-x. Os dados de difração foram coletados em um

difratômetro, operando em modo de transmissão, usando a radiação $\text{CuK}\alpha 1$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), na faixa de 10 a 70°, com tamanhos de grau de 0,015° e um tempo de contagem de 100s a cada 1,05°.

3.1.3 Caracterização da cinza de madeira

Para determinar a massa específica da cinza foi utilizado o método do frasco Le Chatelier regido pela norma ABNT NBR NM 23 (2000), como já mencionado acima. O ensaio iniciou com a pesagem de 30 g de cimento Portland CP II F-32, em seguida em um frasco volumétrico Le Chatelier foi preenchido com solvente orgânico, aguarrás, até atingir a marca de 0,5cm³ e a cinza foi adicionada com cuidado ao frasco. Posteriormente, o frasco foi então agitado, realizando-se movimentos circulares para retirar as bolhas de ar presentes e garantindo que todo o material precipitasse até o fundo. Logo, a massa específica foi obtida pela Equação 3, a mesma utilizada para o aglomerante.

A fim de determinar propriedades estruturais e físicas da cinza de madeira foi realizada o ensaio de difratometria de raio-x no Laboratório de Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

3.1.4 Formulação das argamassas

Após a realização das caracterizações dos materiais foi possível preparar as argamassas. Para isso, utilizou-se o traço 1:3, em volume de cimento e areia e sua formulação teve como base a norma ABNT NBR 16541:2016. A padronização do procedimento se deu conforme os seguintes passos:

- Mistura na argamassadeira por 60 segundos do cimento, areia e água;
- O equipamento é desligado para que seja feita a raspagem da cuba com o auxílio de uma espátula;
- Mistura lenta para homogeneização por mais 60 segundos.

Posteriormente, uma nova formulação foi realizada, considerando a substituição de 10% da cinza em relação a massa de cimento. Por fim, a última formulação considerou a substituição de 15% da cinza em relação a massa de cimento. A Tabela 1 apresenta um resumo dos componentes dos materiais

necessários para produzir uma quantidade específica de cada argamassa que permitisse o preenchimento completo do volume do Tronco de Cone, que possui uma altura de 6,5cm, raio menor de 4cm e raio maior de 6,25cm.

Tabela 1 – Formulação, traço e quantidade de materiais para produção da argamassa.

Formulação	Traço (Volume)	Traço (Massa)	Cimento (g)	Areia (g)	Substituição de cinza (g)
REF 0%	1:3	1:4,42	176,41	797	0
CINZA 10%			158,77		17,64
CINZA 15%			149,95		26,46

Fonte: Autoria Própria (2024).

3.1.5 Determinação da relação água/cimento

Para a determinação da relação água/cimento das argamassas, foi fixada a consistência segundo a norma ABNT NBR 13276 (2005) que padroniza um índice de consistência de 260 ± 10 mm de espalhamento, sendo variado o teor de água nas argamassas de referência até atingir esse número. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de relação água/cimento e seus respectivos índices de consistência.

Tabela 2 – Relação água/cimento e índice de consistência resultante.

Relação a/c	Índice de consistência (mm)
0,9	225
1,00	235
1,05	280
1,02	265

Fonte: Autoria Própria (2024).

Portanto, seguindo uma relação água/cimento de 1,02 resultou num índice de consistência de 265mm, dentro dos parâmetros anteriormente estabelecidos fixou-se esse valor para a produção de todas as argamassas que compuseram os ensaios desta pesquisa.

3.2 Métodos

As propriedades determinadas no estado fresco foram: índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e parâmetros reológicos (ensaio *Squeeze-Flow*). Além da caracterização dos materiais para esses ensaios. Os ensaios foram realizados em triplicata para melhor confiabilidade dos resultados.

3.2.1 Ensaio de índice de consistência (*flow-table*)

Por meio da mesa de consistência (*flow-table*) é possível avaliar o espalhamento horizontal de uma argamassa após esta ser submetida a uma série de impactos (KOEHLER; FOWLER, 2003). O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 13276 (2010), e iniciou-se com a argamassa sendo adicionada em um molde em forma de tronco de cone em camadas de um terço em um terço em seu interior, sendo aplicado 15, 10 e 5 golpes em cada uma respectivamente e após preencher até o nível do molde o restante de material é rasado por uma régua metálica, dessa forma é garantido o adensamento perfeito do material.

Em seguida, o molde foi retirado verticalmente e o motor da *flow table* foi acionado. Com isso, a mesa iniciou um movimento para cima e para baixo por meio de 30 golpes aplicados dentro de 30 segundos, fazendo com que a argamassa fluísse e se espalhasse. Imediatamente após o último golpe mede-se o diâmetro de espalhamento da argamassa, sendo o índice de consistência dado pelo diâmetro médio de espalhamento. Quanto maior for o índice de consistência, mais fluida é a argamassa e, conseqüentemente, maior sua plasticidade.

A Figura 5 mostra o formato que uma argamassa adquire logo após a retirada do molde. Por sua vez, a Figura 6 ilustra o estado da argamassa no fim do ensaio e o método de medição de um diâmetro de espalhamento.

Figura 5 – Argamassas após a retirada do tronco de cone na flow-table.



Fonte: Aatoria Própria (2024).

Figura 6 – Medição do espalhamento das argamassas.



Fonte: Aatoria Própria (2024).

3.2.5 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Através das especificações da NBR 13278 (2005) foi possível realizar o ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado. O processo inicia com a preparação de cilindros de amostra e pesado o recipiente vazio, em seguida a argamassa com e sem a substituição parcial de cinza é adicionada em três camadas, adensados com 20 golpes cada, por fim foi realizada a pesagem das amostras.

A densidade de massa real e a densidade de massa teórica são obtidos pelas seguintes Equações 4 e 5:

$$d = \frac{M_c - M_v}{V_r} * 1000 \quad (4)$$

Sendo:

d = Densidade de massa, em g/cm^3 ;

M_c = Média da massa do recipiente, em g;

M_v = Massa do recipiente vazio, em g;

V_r = volume do recipiente, em cm^3 ;

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{y_i}} \quad (5)$$

Sendo:

d_t = Densidade de massa teórica da argamassa sem vazios, em g/m^3 ;

m_i = Massa seca de cada componente da argamassa, mais massa de água, em g;

y_i = Massa específica de cada componente da argamassa, em g/m^3 ;

Usualmente, a densidade de massa teórica apresenta um valor maior do que a densidade de massa real, e essa diferença está associada ao teor de ar incorporado. Por meio da Equação 6, que correlaciona as duas grandezas, é possível determinar o teor de ar incorporado à argamassa.

$$A = 100 * \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (6)$$

Sendo:

A = Teor de massa incorporado, em porcentagem;

Figura 7 – Medição dos recipientes com argamassa. (a) argamassa de referência; (b) argamassa com 10% de substituição do cimento; (c) argamassa com 15% de substituição do cimento.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria Própria (2024).

3.2.6 Comportamento reológico (*Squeeze-flow*)

Com relação ao seu comportamento reológico, as argamassas foram avaliadas pelo método de *Squeeze-flow*. O ensaio foi realizado conforme prescreve a norma ABNT NBR 5839 (2010), na prensa EMIC (Figura 7), cujas configurações estão descritas na sequência:

- As amostras foram desenvolvidas com 10mm de altura e 101mm de diâmetro;
- Utilizou-se no equipamento uma célula de carga de 20 kN;
- A velocidade de descolamento foi considerada em 1mm/s.

Figura 8 - Máquina universal de ensaios - EMIC DL3000N.



Fonte: Autoria própria (2024)

De acordo com Cardoso (2009), a velocidade recomendada para esse ensaio pode variar de 0,1mm/s a 3mm/s, já que essa faixa atua dentro dos fenômenos práticos que ocorrem na aplicação da argamassa de revestimento ao substrato.

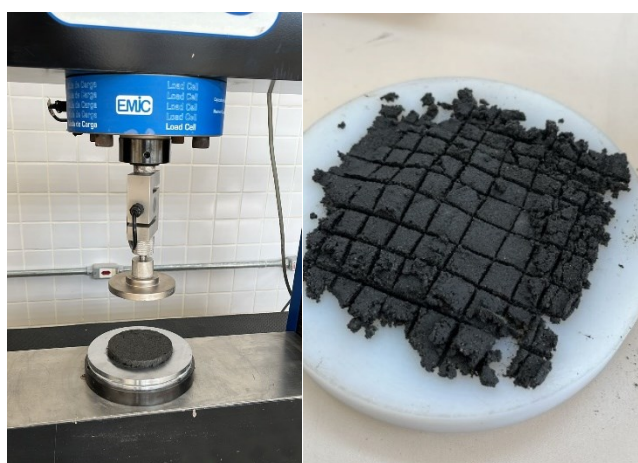
Primeiramente obteve-se a amostra para o ensaio. Logo, o ensaio foi realizado em três etapas, com 15, 30 e 45 minutos após o início da mistura. A amostra foi aplicada sobre a placa inferior metálica utilizando um molde de plástico e para garantir um preenchimento uniforme, utilizou-se um gabarito e uma espátula. Após a aplicação da argamassa, o molde foi cuidadosamente removido, mantendo a amostra centralizada para o ensaio, conforme ilustrado

na Figura 9. Por fim, a argamassa é prensada e na máquina e seu término se dá quando a carga máxima atinge 1kN, conforme ilustrado na Figura 10.

Para o ensaio realizado sobre o substrato cerâmico utilizou-se o mesmo método mencionado acima, porém com tempo de mistura de 15 minutos apenas, a Figura 11 ilustra essa etapa do ensaio.

Os resultados devem ser expressos através de gráfico de carga em (N) x deformação em (mm).

Figura 9 – Ensaio *Squeeze-Flow* argamassa com 15% de substituição.



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 10 – Ensaio *Squeeze-Flow* argamassa de referência.



Fonte: Autoria própria (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Caracterização do agregado miúdo

A massa específica e a massa unitária da areia podem ser observadas conforme no Tabela 3.

Tabela 3 – Massa específica e massa unitária.

Propriedade	Valor (g/cm ³)
Massa específica	2,59
Massa unitária	1,63

Fonte: Autoria própria (2024)

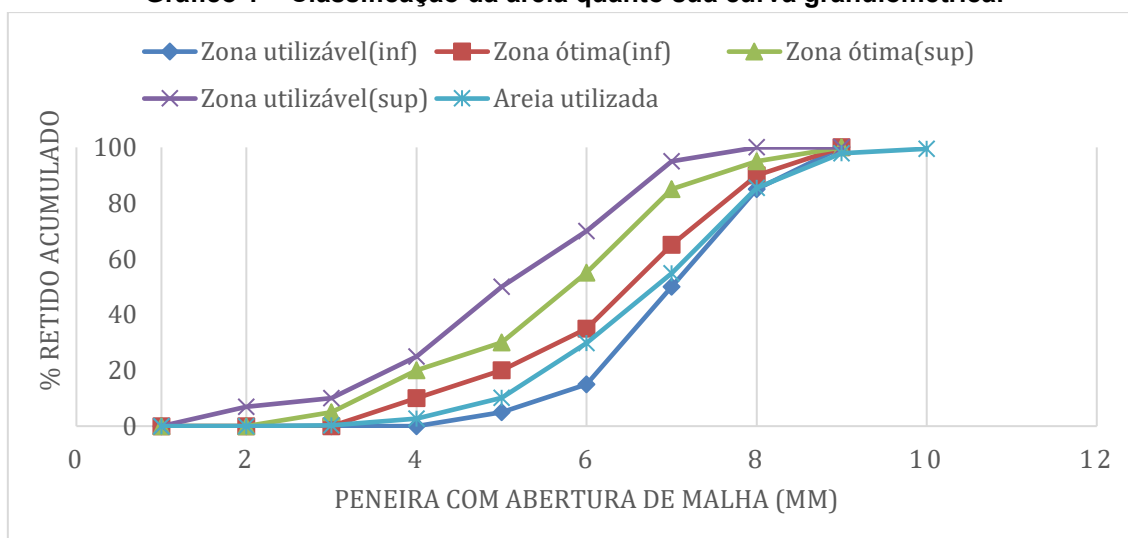
Segundo Carasek *et al.* (2016) em seus estudos encontrou uma massa específica de 2,73 g/cm³ e a massa unitária de 1,53 g/cm³ na amostra de areia, logo é possível afirmar que os valores obtidos nessa pesquisa correspondem dados encontrados na literatura.

A composição granulométrica da areia pode ser observada no Tabela 4, bem como a representação gráfica desses dados pode ser encontrada no Gráfico 1.

Tabela 4 – Composição granulométrica areia natural.

Peneira com abertura de malha (mm)	Massa retida (g)	Percentual retido (%)	Percentual retido acumulado (%)	Percentual passante acumulado (%)
9,5	0	0,00	0,0	100%
6,3	0	0,00	0,0	100%
4,75	6,58	1,3160	1,3	99%
2,36	7,37	1,4740	2,8	97%
1,18	18	3,6000	6,4	94%
0,6	96,95	19,3900	25,8	74%
0,3	166,92	33,3840	59,2	41%
0,15	160,26	32,0520	91,2	9%
0,075	38,83	7,7660	99,0	1%
(Fundo)	4,31	0,8620	100	0%

Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 1 – Classificação da areia quanto sua curva granulométrica.

Fonte: Autoria própria (2024)

Com esses resultados foi possível calcular um módulo de finura 2,85 para a amostra em questão, através da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de agregado, em todas as peneiras da série normal e dividindo por 100. Classificando o agregado miúdo utilizado nesse estudo como areia média. Bem como, observa-se que a areia utilizada está próxima a zona ótima inferior e zona utilizável inferior classificando como aceitável pela ABNT NBR 248 (2003).

4.1.2 Caracterização do aglomerante e cinza

As caracterizações físicas, químicas e mecânicas foram obtidas junto ao fabricante para o cimento Portland se encontra-se no Quadro 5.

Quadro 3 – Resumo das especificações da ABNT para cimento Portland.

Parâmetros	Limite NBR 16697:2018
Tempo de início de pega (minutos)	≥60
MgO (%)	-
Perda ao fogo (%)	≤ 12,5
Resíduo insolúvel (%)	≤ 7,5
SO ₃ (%)	≤ 4,5
Resistência à Compressão (Mpa)	
1 dia	-
3 dias	≥ 10,0
7 dias	≥ 20,0
28 dias	≥ 32,0
Adições Permitidas (%)	

Escórias	0
Filer Calcário	11 a 25
Material Pozolânico	0

Fonte: Fabricante Itambé (2023)

A massa específica e a massa unitária do cimento, bem como a massa específica da cinza, podem ser observadas conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Massa específica e massa unitária dos aglomerantes.

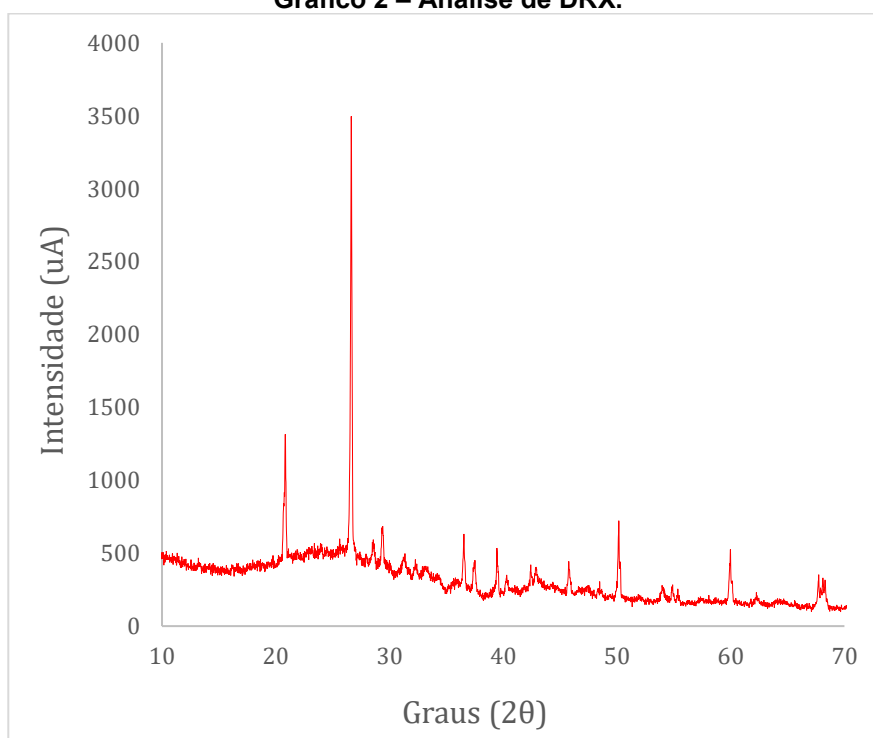
Propriedade	Valor (g/cm ³)
Massa específica (Cimento CP II-F-32)	2,91
Massa unitária (Cimento CP II-F-32)	1,04
Massa específica (Cinza)	2,24

Fonte: Autoria própria (2024)

Segundo Furtado *et al.* (2022) a pesquisa obteve valores para massa unitária do cimento de 3,00 g/cm³, e a específica de 0,96 g/cm³, portanto, os valores encontrados neste estudo são próximo a autora e corresponde dados encontrados na literatura.

O resultado da análise de difratometria de raio-x da cinza pode ser observada conforme o Gráfico 2:

Gráfico 2 – Análise de DRX.



Fonte: Autoria própria (2024)

Através da análise de DRX foi possível identificar que as amostras atingiram picos na região cristalina ($26^\circ \leq 2\theta \leq 27^\circ$). Detectou-se a ocorrência de uma série de picos cristalinos na mesma posição do difratograma. Dessa forma, evidencia-se que há presença de fases cristalinas justificando o efeito filer da cinza, e que não possui reatividade pozolânico.

Gluitz e Marafão (2013) obtiveram dados semelhantes ao realizar o difratograma da cinza de madeira de eucalipto estuda em sua pesquisa. Identificando a presença apenas da fase cristalina, caracterizada pela intensa quantidade de picos apresentados. Além disso, Resende (2013) caracterizou a cinza de cavaco de eucalipto de seu estudo com baixa atividade pozolânica.

Assim, é possível dizer que os resultados obtidos nesta pesquisa condizem com os encontrados na literatura.

4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

4.2.1 Caracterização da consistência das argamassas produzidas

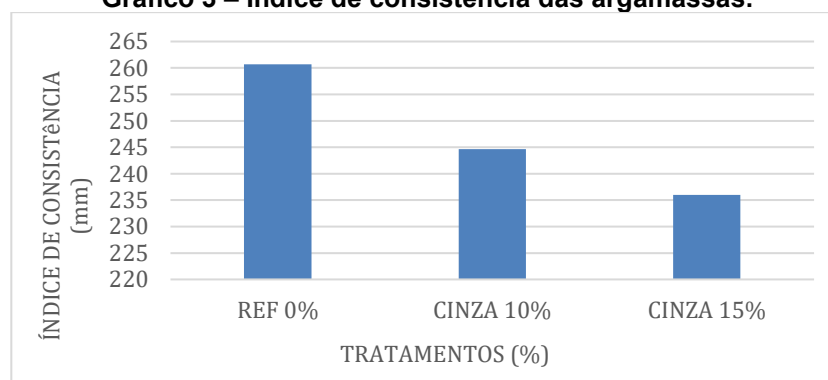
Após a realização do ensaio *flow-table* para determinar o índice de consistência das argamassas, foi possível obter as conclusões conforme mostra a Tabela 6 e representa no Gráfico 3.

Tabela 6 – Massa específica e massa unitária dos aglomerantes.

Tratamento (%)	IC Médio (mm)	Desvio Padrão (mm)	C.V (%)
REF 0%	261	4,04	1,6
CINZA 10%	245	2,52	1,0
CINZA 15%	236	5,29	2,2

Fonte: Autoria própria (2024)

Gráfico 3 – Índice de consistência das argamassas.



Fonte: Autoria própria (2024)

É possível observar que a presença da cinza substituindo parcialmente o cimento em 10% e 15% reduziram o índice de consistência em 5,76% e 9,61%, respectivamente, em relação às argamassas de referência. A argamassa de referência atingiu a exigência de sua consistência estar na faixa de 260 ± 10 mm, já as argamassas com cinza de madeira não atingiram a consistência recomendada por norma.

A redução da consistência pode ser atribuída à natureza hidrofílica da cinza de madeira, que absorve água da mistura, diminuindo a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento e, conseqüentemente, afetando a trabalhabilidade e a homogeneidade da argamassa. Esse efeito não apenas dificulta a aplicação do material, mas também pode comprometer a resistência e a durabilidade da argamassa final, uma vez que a hidratação inadequada do cimento é um fator crítico para o desenvolvimento das propriedades mecânicas e de durabilidade.

4.2.2 Caracterização da densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas produzidas

Após a realização do ensaio para determinar a densidade de massa e teor de ar incorporado das argamassas, foi possível compilar os resultados de densidade de massa na Tabela 7 e de teor de ar incorporado na Tabela 8.

Tabela 7 – Resultados para densidade de massa nas argamassas.

	Média Densidade de Massa (g/cm³)	Dev. Padrão Densidade de Massa (g/cm³)	C.V Densidade de Massa (g/cm³)
REF 0%	1,86	0,012	0,6
CINZA 10%	1,87	0,003	0,2
CINZA 15%	1,85	0,002	0,1

Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 8 – Resultados para teor de ar incorporado nas argamassas.

	Média Teor de ar Incorporado (%)	Dev. Padrão Teor de ar Incorporado (%)	C.V Teor de ar Incorporado (g/cm³)
REF 0%	11,9	0,6	4,7
CINZA 10%	11,3	0,3	2,4
CINZA 15%	12,2	0,1	0,9

Fonte: Autoria própria (2024)

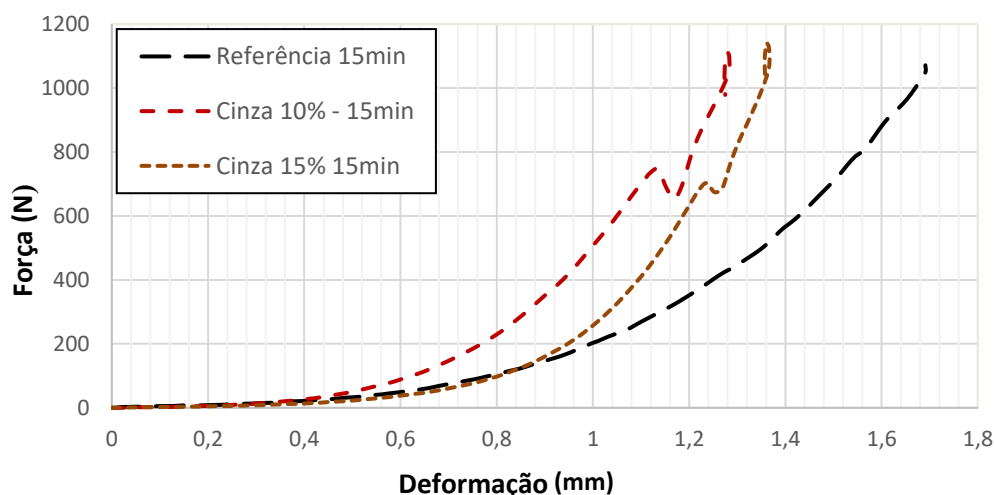
Baseado nos resultados obtidos, identificou-se que a substituição do cimento pela cinza de madeira nas argamassas não influenciou na densidade de massa e no teor de ar incorporado. Em relação a trabalhabilidade esse impacto é positivo, uma vez que, dessa forma, não haverá aumento da densidade e isso facilitará o processo de lançamento da argamassa.

Além disso, as argamassas foram classificadas como classe DF3, pois todas obtiveram uma densidade de massa entre 1800 e 2000 kg/m³, de acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2023). Essa classificação indica que as argamassas possuem uma densidade dentro da faixa específica para uso em revestimentos de paredes de tetos, garantindo um desempenho adequado em termos de aderência, resistência e durabilidade, conforme os requisitos normativos estabelecidos para essa categoria de argamassas.

4.2.3 Caracterização do comportamento reológico das argamassas produzidas

A caracterização reológica das argamassas com substituição parcial do cimento pela cinza foi avaliada a partir do método de *Squeeze-Flow*, os resultados dos ensaios para diferentes teores de substituição do cimento em relação ao tempo após a mistura em 15, 30 e 45 minutos podem ser observado através dos Gráficos 4, 5 e 6.

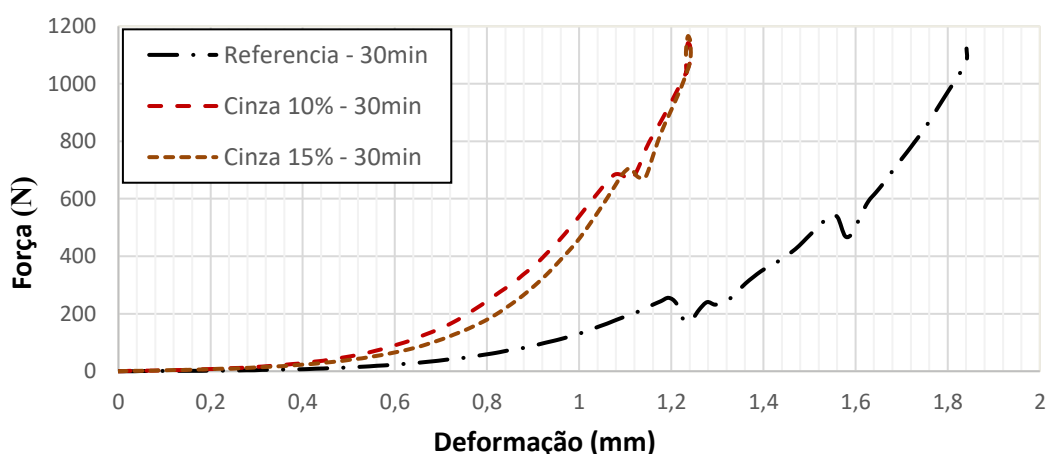
Gráfico 4 – Resultados do ensaio *Squeeze-flow* para 15 minutos.



Fonte: Autoria própria (2024)

Foi possível verificar que a transição para o estágio de enrijecimento por deformação ocorreu com um deslocamento de 1,5 mm para a amostra de referência. As argamassas produzidas com cinza de madeira tiveram seus deslocamentos reduzidos em 1,0 mm. Com base nos resultados obtidos foi possível avaliar que as cinzas de madeira proporcionaram uma redução da plasticidade das argamassas, o que sugere que a presença das cinzas influencia negativamente na capacidade da argamassa de acomodar pequenas movimentações ou deformações estruturais, potencialmente aumentando o risco de fissurações em condições de uso.

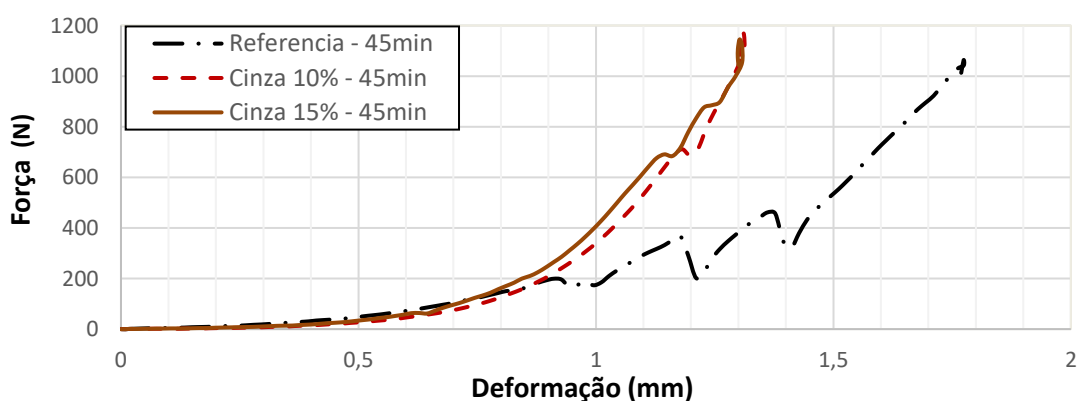
Gráfico 5 – Resultados do ensaio *Squeeze-flow* para 30 minutos.



Fonte: Autoria própria (2024)

Em 30 minutos de mistura, foi possível observar o mesmo comportamento que em 15 minutos de mistura, onde as cinzas de madeira proporcionaram uma redução da plasticidade das argamassas nos dois tempos de mistura.

Gráfico 6 – Resultados do ensaio *Squeeze-flow* para 45 minutos.

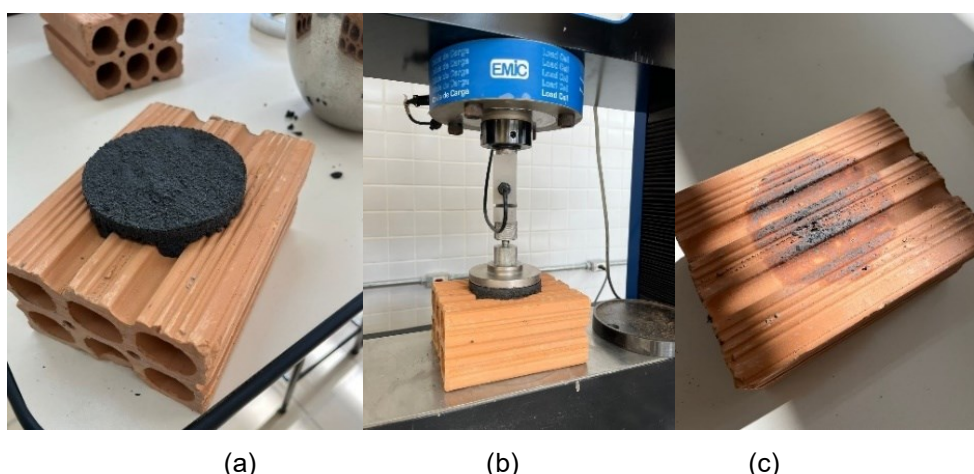


Fonte: Autoria própria (2024)

Ao analisar a influência do tempo de utilização de 45 minutos fica evidente que as argamassas com cinza de madeira também proporcionaram um deslocamento menor quando comparadas a referência, onde o mesmo ocorreu em 15 e 30 minutos de mistura sendo menor que 1,5mm, ou seja, comportamento caracterizado pelo enrijecimento por deformação. Esse comportamento consistente indica que a incorporação das cinzas de madeira na mistura afeta a trabalhabilidade do material de maneira similar, independentemente do tempo de mistura. A redução da plasticidade, portanto, está relacionada intrínsecas das cinzas, que influenciam a retenção de água e a coesão da mistura e não ao tempo de processamento das argamassas.

Por fim, analisou-se a influência na base cerâmica, que pode ser justificada pela proximidade com a utilização prática da argamassa. O bloco cerâmico caracteriza-se com dimensões medias de 90 x 140 x 190mm e a Figura 11 a seguir demonstra o ensaio. Além disso, para essa etapa o ensaio foi realizado para tempo de mistura de 15 minutos e o resultado pode ser observado através do Gráfico 7.

Figura 11 – Ensaio squeeze-flow em base cerâmica. (a) Argamassa com 15% de substituição sob a base. (b) Momento do ensaio da amostra. (c) Base cerâmica após retirada imediata da amostra.



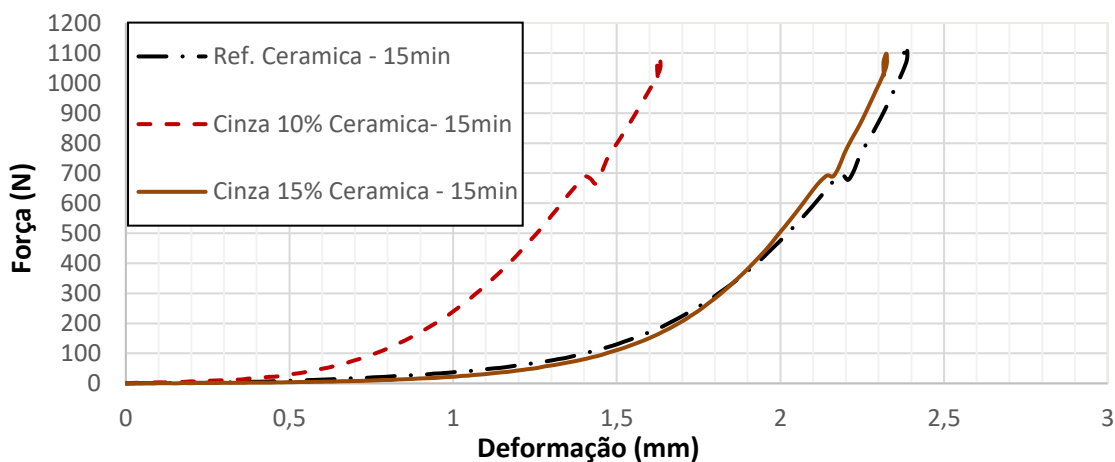
(a)

(b)

(c)

Fonte: Autoria própria (2024).

Gráfico 7 – Resultados do ensaio *Squeeze-flow* para 15 minutos na base cerâmica.



Fonte: Autoria própria (2024)

Para a base cerâmica, foi possível analisar que as argamassas com 15% obtiveram um comportamento semelhante a argamassa de referência, mostrando que essa proporção não alterou significativamente as propriedades de deformação da mistura. Por outro lado, a argamassa com 10% de cinza reduziu os deslocamentos em 0,5 mm, indicando uma diminuição na capacidade de deformação. Esse resultado sugere que uma menor quantidade de cinza de madeira para a base cerâmica, pode ter um efeito mais significativo na argamassa, limitando sua plasticidade e, conseqüentemente, sua capacidade de acomodar deformações.

5. CONCLUSÃO

As argamassas produzidas foram caracterizadas no estado fresco e assim, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- Em relação ao ensaio de consistência, foi possível concluir que a substituição parcial do cimento por cinza de madeira em 10% e 15% resultaram na redução do espalhamento das argamassas. Esse efeito pode ser atribuído a natureza hidrofílica da cinza de madeira, que compromete a trabalhabilidade e hidratação do cimento;
- Argamassas produzidas com cinzas de madeira não influenciaram nos resultados de densidade de massa e teor de ar incorporado, mantendo esses parâmetros dentro de faixas esperadas;

- Com relação ao comportamento reológico determinado por meio do ensaio de *Squeeze-flow*, as argamassas produzidas com cinzas de madeira apresentaram um menor deslocamento em comparação com a argamassa de referência, o que caracteriza menor plasticidade. Assim, pode-se concluir que o resíduo proveniente de cinza de madeira, pode afetar negativamente a trabalhabilidade das argamassas.
- De maneira geral, este estudo evidenciou que as cinzas de madeira tiveram grande impacto nas argamassas produzidas, onde foi possível identificar que as formulações empregadas nessa pesquisa proporcionaram uma redução significativa na trabalhabilidade das argamassas.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Visando viabilizar o uso das cinzas de madeira em escala comercial e o aprofundamento das pesquisas de materiais cimentícios com substituição do cimento pela cinza de madeira, recomenda-se avaliar adicionalmente os seguintes parâmetros:

- Estudo adicionais do emprego de aditivos plastificantes que melhoram a trabalhabilidade da argamassa;
- Analisar outros teores de substituição para se obter dados mais expressivos;
- Estudar o impacto da cinza nas propriedades do estado endurecido da argamassa.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro: 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow** – elaboração. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16514: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915/2021: Agregados -Amostragem.** Rio de Janeiro. 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2000.

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

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1. ed. São Paulo, Brasil (2002).

ANTUNES, Rubiane Paz do Nascimento; JOHN, Vanderley Moacyr. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

BILCATI, G. K. et al. **Efeito do reforço multi-escala fibra de celulose-microcelulose cristalina na fase de hidratação de pastas de cimento Portland**. Revista Matéria, v. 27, n. 04, 2022.

BONEN, D.,L. SARKAR. **The superplasticizer adsorption capacity of cementpastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss** (1995), Canadá.

BORGES, Diego et al. **Uso de cinza de madeira de eucalipto em compostos cimentícios, uma alternativa sustentável**. Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, v. 5, n. 11, 2017.

BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D.G.; MONTEIRO, S. N. **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza**. Cerâmica. v. 51, p. 192-196, 2005.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILLEGI, R. G. **Caracterização reológica de argamassas pelo método squeeze-flow**. 2007, Anais. Recife: Ed Universitária da UFPE, 2007.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILLEGI, R. G. **Squeeze-flow aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, v. 1, p. 1-29, 2010.

CARDOSO, Alceu Aparecido. **Desempenho termo físico e mecânico de argamassas de revestimento produzidas com resíduos sólidos poliméricos, minerais e vegetais**. 2017. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos Materiais na Aderência dos Revestimentos de Argamassa**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, 2001.

CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. **Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus-Propriedades relevantes**. Cerâmica, v. 60, p. 69-76, 2014.

COSTA, Ivandro. **Estudo comparativo entre as argamassas de revestimento externo: preparada em obra, industrializada fornecida em sacos, e estabilizada dosada em central**. 2016. 84 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário 50 UNIVATES, Lajeado, 2016

ELINWAH, A. U.; MAHMOOD, Y. A. **Ash from timber waste as cement replacement material**. *Cement and Concrete Composites*. y. 24. p. 219-222. 2004.

FREITAS, C. de. **Argamassas de Revestimento Com Agregados Miúdos de Britagem da Região Metropolitana de Curitiba: propriedades no estado fresco e endurecido.** Curitiba, 2010. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

FIORITO, Antônio J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos.** São Paulo: Pini, 1994

FURTADO, Gabriela Becker et al. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por resíduo de cerâmica vermelha na produção de argamassas.** Revista Internacional de Ciências, v. 12, n. 3, p. 213-230, 2022.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

GIROTTI, L. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. **Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 7, p. 24-52, 2014.

HADDAD, Lucimar Dias de Oliveira *et al.* **Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties.** Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 4, p. 9299-9314, 2020.

JOHN, V. M. **Materiais de Construção Civil e Principios da Ciência e Engenharia de Materiais;** Isaia, G. C., 1ª Ed., Ibracon: São Paulo, 2007, v. 1.

JOHN, Vanderley Moacyr; CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Maristela Gomes da. Cinzas e aglomerantes alternativos. **Tecnologias e materiais alternativos de construção,** 2003.

JESUS, Sidnei Marcondes de. **Influência da adição de microcelulose cristalina nas propriedades do estado fresco de argamassas de revestimento**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

KYHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**; Isaia, G, C., 1ª Ed., IBRACON: São Paulo, 2005, cap. 10.

KOEHLER, E.P.; FOWLER, D.W.; FERRARIS, C.F.; **Summary of concrete workability test methods**. ICAR Report 105, International Center for Aggregates Research - University of Texas, Austin (USA), 2003. 83p.

LACERDA, Matheus Pereira de et al. **Efeito da adição de polpa de celulose nanofibrilada nas propriedades de argamassas de revestimento**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 28, n. 2, p. e20230063, 2023.

LAVERDE, Albenise et al. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. ISAIA, Geraldo Cechella - São Paulo: IBRACON, 2017. 63 p.

LIMA, S. A. - **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da castanha de caju**. Dissertação- São Carlos, SP - USP - 160p. 2008.

LOPES, Herbert Medeiros Torres. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MATOS, Paulo Ricardo. **Estudo da utilização de argamassa estabilizada em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2013. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MATTANA, Alécio Júnior et al. **Influência dos constituintes do revestimento de argamassa sobre as suas propriedades reológicas**. Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias-ATIVIDADES ENCERRADAS, v. 19, n. 1, p. 33-33, 2013.

MEDEIROS, Mauriceia. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. 2016. 88 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande no Norte, Natal, 2016.

MEETEN, G. H. **Yield Stress of Structured Fluids Measured by Squeeze Flow**. *Rheologica Acta*, Berlim, v. 39, n. 4, p. 399-408, 2000.

MEETEN, G. H. **Squeeze Flow of Soft Solids Between Rough Surfaces**. *Rheologica Acta*, Berlim, v. 43, n. 1, p. 6 - 16, fev. 2004.

MEHTA, P.Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição. São Paulo: IBRACON, 674 p, 2008.

MOLITERNO, Antônio. **Caderno de Estruturas em Alvenaria e Concreto Simples**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1995.

MORAES, R da C.. **Efeito físico e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto**. 2001. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

PAULINO, Rafaella Salvador et al. **Ensaio squeeze-flow sobre substrato de cerâmica vermelha: comparativo com método normativo**. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 19, p. 1-11, 2022.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. 252 f. Tese (Doutorado) – Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

RESENDE, Domingos Sávio de. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de Eucalipto como material cimentício suplementar**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2013.

OLIVEIRA, Caroline et al. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. 2013. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

OLIVEIRA, Maria Luiza Lopes. **Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas**. 2001. 171 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.