

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

CELSO GARCIA DE FIGUEIREDO NETO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO DE
ARGAMASSAS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA QUEIMA DE
BIOMASSA DA INDÚSTRIA CERÂMICA**

Palmas, TO

2024

Celso Garcia de Figueiredo Neto

**Avaliação das propriedades no estado endurecido de argamassas com a utilização
de resíduos da queima de biomassa da indústria cerâmica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do
Tocantins (UFT), como requisito à obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Palmas, TO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- G216a Garcia de Figueiredo Neto, Celso.
 Avaliação das propriedades no estado endurecido de argamassas com a
 utilização de resíduos da queima de biomassa da indústria cerâmica. / Celso
 Garcia de Figueiredo Neto. – Palmas, TO, 2024.
 72 f.
- Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Tocantins
 – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado)
 Profissional em Engenharia Ambiental, 2024.
 Orientador: Aurélio Pessoa Picanço
 Coorientador: Marcelo Mendes Pedroza
1. Cinzas. 2. Argamassa tradicionais. 3. Resistência. 4. Sustentabilidade.. I.
 Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Celso Garcia de Figueiredo Neto

**Avaliação das propriedades no estado endurecido de argamassas com a utilização
de resíduos da queima de biomassa da indústria cerâmica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Ambiental foi avaliada para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Ambiental e aprovada
em sua forma final pelo Orientador e pela Banca
Examinadora.

Data de aprovação: 19/11/2024

Banca Examinadora

Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço, UFT (Presidente)

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza , UFT (Membro Titular Interno)

Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho, IFTO (Membro Titular Interno)

Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro, UFT (Membro Titular Externo)

Dedico este trabalho a todos que, de alguma maneira, contribuíram, mas especialmente a Deus e aos meus pais, Benevinuta Dias Wanderley Figueiredo e Flávio Bizerra Garcia de Figueiredo, pelos ensinamentos, pela paciência e por todo o suporte ao longo do processo. Muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Tocantins – UFT e a todos os seus professores pelo conhecimento, aprendizado, crescimento profissional compartilhados e por me proporcionarem um ambiente para minha formação acadêmica. Também ao Instituto Federal do Tocantins - IFTO e à Universidade de São Paulo - USP pela oportunidade de realizar os ensaios laboratoriais.

Meu sincero agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Aurélio Picanço, pela dedicação, seriedade e apoio constante durante a pesquisa. Ao coorientador, Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza, ao Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho, pelo suporte na execução dos ensaios experimentais e no desenvolvimento do trabalho e ao professor convidado, Prof. Dr. Fábio Henrique de Melo Ribeiro.

Agradeço muito a Deus. A mim, por não desistir. Aos meus pais, Benevinuta Dias Wanderley Figueiredo e Flávio Bizerra Garcia de Figueiredo, pela confiança, amor e apoio incondicional, e por serem exemplos de perseverança. À minha avó, Maria Zilda Bizerra Garcia, por suas orações, amor, conselhos e incentivo aos estudos. À minha madrinha, Terezinha de Jesus Wanderley, pelo carinho, incentivo e ensinamentos. Ao meu falecido avô, que carrego, com orgulho, seu nome, Celso Garcia de Figueiredo. À minha falecida avó, Josefa Dias de Brito. À minha falecida prima, Synara Dias Wanderley. Aos demais familiares. Aos meus queridos amigos e colegas de curso do Mestrado, Dyéssika, Eduardo e Pedro Henrique, pelos momentos de alegria, estudo, amizade e companheirismo. Ao técnico em laboratório, José Ademilson e aos colegas Ana Paula Gama e Paulo Henrique Marques, pela convivência e suporte nos ensaios laboratoriais. E agradeço à todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha jornada.

RESUMO

Na busca por inovações em materiais para a construção civil, alinhada à preocupação com a sustentabilidade, a biomassa utilizada como fonte de energia gera alguns subprodutos, sendo um deles as cinzas. No cenário da construção civil, essas cinzas apresentam uma significativa perspectiva para novas tecnologias por meio da reutilização, visando a fabricação de componentes construtivos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades física e mecânica das argamassas tradicionais no estado endurecido, substituindo a mistura tradicional da argamassa por cinzas provenientes da queima de podas de árvores de reflorestamento, o Eucalipto. Para conduzir o trabalho foi utilizado o *software Protimiza Experimental Design*, aderindo ao modelo de Delineamento de Faces Centradas (DFC) para analisar duas variáveis: a porcentagem de cinzas substituindo a mistura parcialmente e o tempo necessário para a cura úmida. Os componentes para a produção da argamassa foram submetidos a caracterização física e química, incluindo as cinzas. O modelo experimental determinou a quantidade de corpos-de-prova de argamassa prismática, com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, baseando-se nas proporções de 5%, 10% e 15% de cinzas na mistura de argamassa convencional com o tempo de cura entre 7, 14 e 21 dias. Os resultados indicaram que essa substituição parcial é uma opção sustentável e tecnicamente viável visto que o comportamento das duas variáveis foi satisfatório. Os ensaios mostraram que a substituição de 5% de cinzas na argamassa apresentou os melhores resultados de resistência: 2,90 MPa à tração após 14 dias e 10,14 MPa à compressão após 21 dias. Já com 15% de cinzas, os valores caíram para 1,10 MPa e 4,21 MPa, respectivamente. A absorção de água foi menor com 5% de cinzas (2,24 g/cm²), enquanto 15% aumentaram a porosidade, elevando o coeficiente de absorção para 34,80 g/dm².min^{1/2}. A análise estatística, por meio de gráficos e superfícies de resposta, avaliou variações e influências dos fatores. Usar cinzas no lugar de parte da mistura de argamassa foi uma forma sustentável de aproveitar esses resíduos e usar os recursos de maneira mais eficiente.

Palavras-chaves: Cinzas; Argamassa tradicionais; Resistência; Sustentabilidade.

ABSTRACT

In the search for innovations in materials for civil construction, aligned with the concern for sustainability, the biomass used as an energy source generates some byproducts, one of which is ash. In the civil construction scenario, these ashes present a significant perspective for new technologies through reuse, aiming at the manufacture of construction components. In this context, the objective of this study was to evaluate the physical and mechanical properties of traditional mortars in the hardened state, replacing the traditional mortar mixture with ash from the burning of prunings of reforestation trees, the Eucalyptus. To conduct the study, the Protimiza Experimental Design software was used, adhering to the Face Centered Design (FDC) model to analyze two variables: the percentage of ash partially replacing the mixture and the time required for wet curing. The components for the production of the mortar were subjected to physical and chemical characterization, including the ash. The experimental model determined the quantity of prismatic mortar specimens, with dimensions of 4 cm x 4 cm x 16 cm, based on the proportions of 5%, 10% and 15% of ash in the conventional mortar mixture with a curing time between 7, 14 and 21 days. The results indicated that this partial replacement is a sustainable and technically viable option since the behavior of both variables was satisfactory. The tests showed that the replacement of 5% of ash in the mortar presented the best resistance results: 2.90 MPa in tension after 14 days and 10.14 MPa in compression after 21 days. With 15% of ash, the values dropped to 1.10 MPa and 4.21 MPa, respectively. Water absorption was lower with 5% ash (2.24 g/cm²), while 15% increased porosity, raising the absorption coefficient to 34.80 g/dm².min^{1/2}. Statistical analysis, using graphs and response surfaces, evaluated variations and influences of the factors. Using ash instead of part of the mortar mix was a sustainable way to take advantage of this waste and use resources more efficiently.

Keywords: Ashes; Traditional mortar; Resistance; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção de material cerâmico em uma empresa de Palmas/TO	16
Figura 2 – Região de Novo Acordo/TO	21
Figura 3 – Madeira de Eucalipto para queima.....	22
Figura 4 – Estoque de madeira de Eucalipto para queima	23
Figura 5 – Produto da queima de madeira de Eucalipto.....	24
Figura 6 – Fluxograma das atividades que serão desenvolvidas	34
Figura 7 – Planejamento experimental por Delineamento de Faces Centradas (DFC) ..	35
Figura 8 – Ensaio de DRX – Difração de Raios X – Raw Data.....	43
Figura 9 – Ensaio de DRX – Difração de Raios X – Peak Search	43
Figura 10 – Valores observados versus previstos, para o ensaio de tração na flexão ...	52
Figura 11 – Superfície de resposta para o ensaio de tração na flexão	52
Figura 12 – Valores observados versus previstos, para o ensaio de compressão	57
Figura 13 – Superfície de resposta para o ensaio de compressão.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de cimento	30
Tabela 2 – Caracterização do cimento Portland CP II – F	31
Tabela 3 – Fatores e níveis a serem utilizados no planejamento experimental	36
Tabela 4 – Ordem dos experimentos	36
Tabela 5 – Quantidade de corpos de prova de acordo com os fatores (em triplicada) ...	37
Tabela 6 – Massa específica das cinzas.....	41
Tabela 7 – Ensaio do Teor de Umidade das Cinzas	42
Tabela 8 – Determinação de Densidade Aparente das Cinzas	42
Tabela 9 – Resultados das determinações dos elementos por ICP OES	44
Tabela 10 – Ensaio de pH.....	45
Tabela 11 – Agregado miúdo	46
Tabela 12 – Massas Específicas Materiais em Pó	46
Tabela 13 – Massa unitária do Agregado Miúdo	46
Tabela 14 – Características do Agregado Miúdo	47
Tabela 15 - Resultados dos valores médios obtidos através dos ensaios de tração na flexão	48
Tabela 16 – Tabela 10 Resistência à Tração na Flexão da NBR 13281/2023 – Parte 1	49
Tabela 17 – Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de tração na flexão	51
Tabela 18 – ANOVA, para o ensaio de tração na flexão	51
Tabela 19 – Resultados dos valores médios obtidos através dos ensaios de compressão	53
Tabela 20 - Tabela 1 da ABNT NBR 12281/2005	54
Tabela 21 – Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para compressão	56
Tabela 22 – ANOVA, para o ensaio de compressão	56
Tabela 23 – Valores médios da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade aos 28 dias.....	58

Tabela 24 – Resistência à Compressão – outros trabalhos.....	61
Tabela 25 – Resistência à Tração na Flexão – outros trabalhos.....	61
Tabela 26 – Absorção de Água por Capilaridade – outros trabalhos.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores médios de resistência mecânica de tração na flexão com o valor referência	49
Gráfico 2 – Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de tração na flexão	50
Gráfico 3 – Valores médios de resistência mecânica de compressão com o valor referência	54
Gráfico 4 – Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de compressão	55
Gráfico 5 – Valores médios de absorção de água por capilaridade.....	58
Gráfico 6 – Valores médios de coeficiente de absorção de água	59

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	51
Equação 2	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Uso de biomassa na indústria	15
3.2 Indústria Cerâmica	16
3.3 Origem sustentável da madeira na fabricação de materiais cerâmicos	17
3.3.1 Minimização do Impacto Ambiental	17
3.3.2 Promoção da renovação dos recursos naturais	18
3.3.3 Ciclo Sustentável de vida da madeira.....	18
3.3.4 Compromisso com Práticas Responsáveis	18
3.3.5 Influência na Indústria e na Comunidade	18
3.4 A espécie de madeira utilizada, o Eucalipto.....	19
3.5 O reflorestamento em Novo Acordo, no Tocantins	20
3.6 Consumo semanal de madeira em uma empresa para produção de blocos cerâmicos	22
3.7 O descarte inadequado de cinzas nas empresas.....	24
3.8 Cinzas na produção de artefatos cimentícios	25
3.9 Classificação dos resíduos.....	26
3.10 Argamassa	27
3.10.1 Aglomerante: cimento	29
3.10.2 Agregados.....	31
4 METODOLOGIA.....	33
4.1 Tipo de pesquisa	33
4.2 Planejamento Experimental	35
4.3 Materiais e Métodos	38
4.3.1 Caracterização física e química das cinzas	38
4.3.2 Caracterização física dos materiais.....	39
4.4 Ensaios mecânicos de resistência.....	39
4.5 Ensaios de absorção de água por capilaridade	40
4.6 Análise Estatística.....	40
5 RESULTADOS	41
5.1 Caracterizações das cinzas.....	41

5.1.1 Caracterização física das cinzas	41
5.1.2 Caracterização química das cinzas	43
5.2 Caracterizações dos materiais	45
5.2.1 Caracterização física dos materiais.....	46
5.3 Desempenho das argamassas com substituição parcial da mistura.....	47
5.3.1 Ensaio de resistência mecânica: tração na flexão	48
5.3.2 Ensaio de resistência mecânica: compressão.....	53
5.3.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de absorção.....	58
5.3.4 Discussão dos resultados	60
6 CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

Um dos elementos fundamentais da construção civil é a argamassa, uma substância composta por cimento, agregado miúdo, água, aditivos e adições que a tornam maleável, conferindo-lhe uma notável durabilidade. Além disso, a argamassa é altamente versátil, podendo ser empregada de várias maneiras [...] capaz de suportar esforços de cisalhamento e compressão. De acordo com a pesquisa de Matos e Guimarães (2017), a argamassa desempenha um papel de destaque na construção civil, sendo amplamente utilizada em diversos tipos e fases de obras. Suas aplicações abrangem principalmente o levantamento de alvenaria, o assentamento de materiais cerâmicos, o revestimento de paredes e tetos, contrapisos e reparos.

Há diversas estratégias disponíveis para atenuar as emissões de gases na atmosfera, e uma dessas abordagens está intrinsecamente associada ao setor da construção civil, desempenhando um papel crucial na redução da liberação de dióxido de carbono (CO₂). A motivação subjacente à pesquisa em relação à substituição parcial do cimento está firmemente fundamentada na necessidade de diminuir tanto a produção quanto o consumo de cimento, que constituem fontes significativas de poluentes, exercendo impactos diretos sobre o meio ambiente, especialmente durante a fase de fabricação da matéria-prima conhecida como clínquer. De acordo com os estudos conduzidos por Sales (2012), a maneira mais simplificada pela qual a indústria da construção pode contribuir para a redução das emissões de CO₂ é através da redução da quantidade de cimento empregada em suas operações.

Uma maneira de atenuar esses impactos prejudiciais provenientes das altas fornalhas das indústrias de cimento poderiam estar relacionada à diminuição no consumo de cimento ou à sua substituição por outros materiais de menor impacto ambiental, como, por exemplo, a utilização de cinzas de cinzas da queima de biomassa geradas em várias atividades diferentes, de acordo com Demis (2014), que foi o foco deste estudo.

No entanto, procurou-se abordar a produção de argamassas convencionais com a substituição parcial da mistura desta por resíduos, no caso as cinzas de biomassa para que possam ser utilizados para fins construtivos, avaliando se essas inclusões de resíduos podem contribuir para a redução do consumo de cimento e se esses materiais são adequados para substituição desse componente, segundo Sata (2012).

Uma solução promissora é a substituição parcial do cimento por materiais alternativos, como cinzas da queima de biomassa e resíduos industriais. Além de reduzir o consumo de clínquer, que é a principal fonte de poluentes na produção de cimento, essa prática diminui a

extração de recursos naturais e aproveita resíduos que antes seriam descartados. O impacto positivo vai além da preservação ambiental, pois essas ações também ajudam a construir um futuro mais equilibrado e responsável.

No âmbito deste trabalho, propõe-se a substituição parcial de materiais como as cinzas provenientes da queima de podas de árvores provenientes do reflorestamento, no caso o Eucalipto, na produção de materiais cerâmicos, em prol do desenvolvimento sustentável. Em consonância com essa tendência, a demanda por cimento é substancial e em constante crescimento no Brasil e em países como a China e a Índia.

Essas iniciativas trazem como pequenas mudanças podem trazer grandes resultados. Ao incorporar cinzas provenientes da queima de podas de árvores como o eucalipto, é possível não apenas economizar recursos, mas também dar um destino sustentável a esses resíduos. Isso também reduz a dependência de fontes não renováveis, contribuindo para um ciclo de produção mais limpo e eficiente. A redução do clínquer nas argamassas, por sua vez, diminui significativamente a emissão de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que estimula a inovação na construção civil.

Nesse contexto, a utilização desses resíduos como componentes da argamassa pode se apresentar como uma alternativa viável na construção civil, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais. Considerando a possibilidade de aproveitar as cinzas resultantes da queima de podas de árvores do Cerrado na produção de blocos cerâmicos, atualmente descartadas, surge a indagação sobre como esses resíduos de biomassa, ao substituir parcialmente a mistura tradicional de argamassa, afetarão as propriedades físicas e mecânicas da argamassa, promovendo a sustentabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A pesquisa teve como objetivo analisar o desempenho físico (absorção de água por capilaridade) e mecânico (resistência a tração na flexão e compressão) de argamassas com a utilização de resíduos provenientes da queima de biomassa da indústria cerâmica, em substituição parcial da mistura tradicional para a produção de argamassas, a partir de um planejamento experimental.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar as características físicas e químicas das cinzas provenientes da queima de madeira de reflorestamento;
2. Verificar estatisticamente como duas variáveis, sendo a quantidade de cinzas substituindo parcialmente a mistura de argamassa tradicional e o período em dias de cura, afetam a qualidade de argamassa convencional;
3. Analisar as propriedades físicas e mecânicas de argamassas tradicionais após sua solidificação em corpo de prova (estado endurecido) e a possibilidade da substituição da mistura tradicional de argamassa pelas cinzas da queima de Eucalipto.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Uso de biomassa na indústria

Biomassa refere-se à matéria orgânica utilizada na geração de energia (BIOMASSABR, 2023). Nem toda a produção primária do planeta contribui para o aumento da biomassa vegetal, uma vez que parte dessa energia acumulada é consumida pelo ecossistema para sua própria manutenção. As vantagens do uso de biomassa na produção de energia incluem baixo custo, natureza renovável, capacidade de reutilizar resíduos e uma pegada ambiental significativamente menor em comparação com outras fontes de energia, como petróleo ou carvão mineral.

A utilização de biomassa para a produção de energia é uma prática adotada devido aos benefícios tanto ambientais quanto econômicos que ela oferece. Essa abordagem envolve a exploração de diversas fontes renováveis de biomassa, incluindo carvão vegetal, lenha e resíduos provenientes de materiais vegetais, tais como poda urbana, cascas de árvores, pó de serra, e outras (SIMIONI *et al.*, 2018).

A biomassa proveniente de florestas representa um potencial significativo no país, que possui quase 9 milhões de hectares de áreas florestadas (IBÁ, 2021). Os resíduos florestais referem-se ao material resultante do processamento ou colheita da madeira que pode permanecer sem uma utilização específica durante a produção de um determinado produto, por razões diversas (HANSTED *et al.*, 2022).

Dessa maneira, o uso da biomassa, desde que não seja realizado de maneira predatória, não provoca alterações na composição atmosférica. A biomassa é notável por sua elevada densidade energética e pela facilidade de armazenamento, conversão e transporte (BIOMASSABR, 2023).

Apesar das vantagens trazidas pelo uso da biomassa como fonte de energia, é crucial enfatizar a necessidade de um controle rigoroso sobre as áreas desmatadas (BIOMASSABR, 2023). Um exemplo disso ocorreu durante a expansão da indústria de álcool no Brasil, quando diversas florestas foram desmatadas para dar lugar às plantações de cana-de-açúcar. Portanto, a preocupação ambiental deve ser uma prioridade absoluta no uso da biomassa (BIOMASSABR, 2023).

Nos dias de hoje, os resíduos provenientes do processamento da madeira constituem uma parte significativa dos resíduos gerados por atividades industriais, evidenciando um impacto econômico substancial e relevância ambiental. Entretanto, o potencial de reciclagem

desses resíduos é subaproveitado, especialmente devido à escassez de alternativas que sejam ambientalmente sustentáveis (BERGER *et al.*, 2020).

A biomassa proveniente de florestas é uma fonte renovável que pode servir como uma alternativa às energias fósseis, especialmente em setores que dependem intensivamente de carbono e energia, como a produção de cimento, alumínio e aço. Como resultado, a demanda por florestas plantadas está em crescimento, buscando assim reduzir a pressão sobre a exploração de florestas naturais. Além disso, a necessidade de produtos mais uniformes, com características conhecidas que permitam a otimização dos processos industriais, tem impulsionado o setor florestal (SIMIONI *et al.*, 2018).

3.2 Indústria Cerâmica

O Brasil registra uma produção mensal impressionante de 4 bilhões de blocos/tijolos cerâmicos, segundo valor da ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica). Para a produção de 2000 blocos, conforme Lopes (2016), é necessário um volume de 2800 m³ de cavacos de lenha. Fazendo uma análise proporcional com os números da ANICER e os fornecidos por Lopes (2016), a produção dos 4 bilhões de blocos/tijolos demandaria cerca de 5,6 bilhões de m³ de cavacos. A Figura 1 mostra a produção de materiais cerâmico que é produzido em uma empresa na cidade de Palmas, no Tocantins.

Figura 1 – Produção de material cerâmico em uma empresa de Palmas/TO



Fonte: Autor (2023)

O mercado nacional, conforme apontado pela ANICER em seu site oficial, abriga aproximadamente 6.903 fábricas de cerâmica e olarias, responsáveis por mais de 293 mil empregos diretos, 900 mil indiretos e um faturamento anual de R\$ 18 bilhões, o que representa 4,8% do faturamento total da indústria da construção civil (ANICER, 2023).

A ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) destaca que o setor industrial, em particular a Indústria da Cerâmica Vermelha, é o principal consumidor de energia proveniente de biomassa, sendo a lenha um recurso crucial para a produção de blocos (LOPES; BRITO; MOURA, 2016).

Escobar (2016) indica que o Eucalyptus e o Pinus geram 0,5% e 0,25% de cinzas, respectivamente. Considerando o consumo mensal de 5,6 bilhões de m³ pela indústria cerâmica, isso resulta em um volume aproximado de 28 milhões de m³ de cinzas. No entanto, grande parte dessas cinzas, como aponta Vaske (2012), é descartada sem um controle adequado, representando um risco significativo para a contaminação do solo, lençol freático e do ar.

Visando minimizar os impactos ambientais, a Fundação Nacional da Cerâmica (FUNDACER) destaca que as indústrias têm adotado o uso de biomassas renováveis em seus fornos, aproveitando o que é descartado pelas indústrias agrícolas e moveleiras, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente.

3.3 Origem sustentável da madeira na fabricação de materiais cerâmicos

A decisão de utilizar madeira proveniente de reflorestamento na fabricação de materiais cerâmicos é uma prática que reflete um compromisso consciente com a sustentabilidade ambiental. Essa escolha estratégica está alinhada com a compreensão de que os recursos naturais são finitos e que a exploração responsável é crucial para preservar os ecossistemas e garantir o equilíbrio ambiental.

3.1.1 Minimização do Impacto Ambiental

A extração de madeira de florestas naturais pode resultar em impactos significativos, como a perda de biodiversidade, degradação do solo e emissões de carbono. Optar por madeira proveniente de reflorestamento significa reduzir a pressão sobre ecossistemas naturais, minimizando esses impactos negativos. O manejo sustentável das florestas contribui para a conservação da biodiversidade e a manutenção dos serviços ecossistêmicos citado pelo WWF Brasil (2023).

3.1.2 Promoção da renovação dos recursos naturais

O reflorestamento é uma prática que envolve o plantio planejado de árvores, garantindo a reposição e a renovação dos recursos naturais. De acordo com ECycle (2023) a escolha de madeira de fontes sustentáveis contribui para a manutenção da saúde das florestas e a mitigação dos efeitos do desmatamento. A regeneração das áreas plantadas promove a absorção de dióxido de carbono atmosférico, contribuindo para os esforços globais de combate às mudanças climáticas.

3.1.3 Ciclo Sustentável de vida da madeira

A madeira proveniente de reflorestamento segue um ciclo de vida sustentável, desde o plantio até a colheita. O manejo florestal adequado inclui práticas como o replantio constante e a proteção de ecossistemas adjacentes, como mostra em Madeira (2023). Essas estratégias visam garantir que a produção de madeira não comprometa a capacidade da floresta de se regenerar, resultando em um recurso renovável e de baixo impacto ambiental.

3.1.4 Compromisso com Práticas Responsáveis

A escolha de madeira de reflorestamento não é apenas uma questão de gestão de recursos; Madeira (2023) relata que é também um compromisso com práticas empresariais responsáveis. Empresas que adotam essa abordagem demonstram preocupação com a conservação ambiental, construindo uma reputação sustentável e atraindo consumidores conscientes que valorizam a responsabilidade ambiental.

3.1.5 Influência na Indústria e na Comunidade

Ao escolher madeira sustentável, as empresas da indústria cerâmica podem influenciar positivamente as práticas de toda a cadeia produtiva. Essa abordagem pode inspirar outras indústrias a adotarem práticas mais sustentáveis, criando um impacto mais amplo na promoção de práticas responsáveis, Araújo *et. al.* (2011). Os mesmos autores retratam que a escolha de madeira proveniente de reflorestamento na fabricação de materiais cerâmicos não apenas atende às necessidades industriais, mas também destaca um compromisso valioso com a

sustentabilidade ambiental, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e a promoção de práticas responsáveis na indústria.

3.4 A espécie de madeira utilizada, o Eucalipto

A escolha do Eucalipto como a espécie de madeira principal no processo de fabricação de materiais cerâmicos destaca-se como uma decisão estratégica com base em diversas vantagens, principalmente relacionadas ao seu notável crescimento rápido e à sua ampla popularidade no Estado.

De acordo com a Embrapa (2023), o Eucalipto é conhecido por seu extraordinário índice de crescimento rápido, uma característica valiosa para a indústria cerâmica. Em comparação com outras espécies de árvores, o Eucalipto atinge a maturidade em um período significativamente menor, proporcionando ciclos de colheita mais curtos. Essa eficiência no tempo é crucial para garantir um suprimento constante de matéria-prima, contribuindo para a continuidade da produção.

A rapidez com que o Eucalipto cresce permite um manejo florestal mais eficiente e sustentável. Ciclos de colheita mais curtos significam que as plantações podem ser renovadas em intervalos regulares, sem esgotar excessivamente os recursos florestais. Essa prática sustentável contribui para a preservação dos ecossistemas e a promoção da biodiversidade, Embrapa (2023).

O Eucalipto demonstra uma boa adaptação às condições climáticas do Estado, o que é crucial para o sucesso do cultivo em escala industrial. Sua capacidade de prosperar em diferentes climas e solos, conforme Embrapa (2023), torna-o uma escolha robusta para a produção de madeira em áreas específicas, como a região de Novo Acordo próxima a Palmas/TO.

A árvore de Eucalipto é uma presença conhecida e aceita no Estado, o que facilita a aceitação social e a integração na comunidade local. Embrapa (2023) refere-se que o reconhecimento da espécie pode criar um senso de familiaridade e aceitação entre os residentes, estabelecendo uma conexão entre a indústria cerâmica e a comunidade.

A escolha do Eucalipto não apenas atende às necessidades de crescimento rápido, mas também contribui para a eficiência econômica. O ciclo curto de colheita e a capacidade de adaptação à região resultam em operações mais eficientes e custos logísticos reduzidos, Embrapa (2023). Isso pode impactar positivamente a competitividade da indústria cerâmica local.

Optar pelo Eucalipto na produção cerâmica contribui para a conservação de florestas nativas. O crescimento rápido da espécie significa que há menos dependência de madeira de florestas naturais, reduzindo a pressão sobre esses ecossistemas delicados, Amorim *et. al.* (2021).

A escolha do Eucalipto, fundamentada em seu crescimento rápido, adaptação local e aceitação, destaca-se como uma estratégia que não apenas atende às necessidades da indústria cerâmica, mas também se alinha com princípios de sustentabilidade, eficiência operacional e responsabilidade social, Amorim *et. al.* (2021).

3.5 O reflorestamento em Novo Acordo, no Tocantins

A decisão de reflorestar Eucalipto na região de Novo Acordo, próxima à cidade de Palmas/TO, destaca uma abordagem estratégica que considera diversos fatores, desde a sustentabilidade ambiental até a eficiência logística. Essa escolha específica demonstra um compromisso em otimizar o ciclo de produção, minimizando os impactos ambientais e beneficiando a comunidade local.

A escolha de Novo Acordo, localizada na Figura 2 a seguir, como local para o reflorestamento leva em consideração a proximidade geográfica com a cidade de Palmas/TO, onde está próxima do local da indústria cerâmica. A proximidade reduz os custos e a emissão de gases de efeito estufa associados ao transporte de materiais. Isso não apenas beneficia a eficiência operacional, mas também contribui para a redução da pegada de carbono associada à logística.

A região de Novo Acordo foi escolhida não apenas pela proximidade, mas também por suas condições climáticas favoráveis ao cultivo eficiente de Eucalipto. Essa espécie é conhecida por se adaptar a diferentes climas, e a escolha estratégica da região leva em conta um ambiente propício ao crescimento saudável das árvores. Isso contribui para a maximização da produtividade e para a sustentabilidade a longo prazo do reflorestamento.

A eficiência logística é um elemento crucial na cadeia de abastecimento, especialmente em operações que dependem de matéria-prima como a indústria cerâmica. Ao ter a madeira de Eucalipto reflorestada em uma localização estratégica, a eficiência logística é maximizada. Isso reduz os custos operacionais, os tempos de transporte e os riscos associados ao deslocamento de grandes volumes de madeira. A eficiência logística resultante pode ter um impacto positivo tanto na competitividade quanto na sustentabilidade da operação.

Figura 2 – Região de Novo Acordo/TO



Fonte: IBGE (2023)

A escolha de Novo Acordo como local para o reflorestamento também pode ter implicações socioeconômicas positivas. O envolvimento da comunidade local no processo de reflorestamento pode gerar empregos, promover o desenvolvimento econômico regional e criar um senso de responsabilidade compartilhada. Essa integração é fundamental para o sucesso a longo prazo, alinhando os interesses da indústria com os da comunidade.

A decisão estratégica de reflorestar Eucalipto em Novo Acordo sugere um compromisso com o manejo sustentável da área. Práticas responsáveis, como o replantio contínuo e a regeneração da floresta, garantem a renovação constante dos recursos florestais. Isso não apenas assegura a oferta contínua de madeira, mas também contribui para a preservação dos ecossistemas locais.

Ao reflorestar Eucalipto em Novo Acordo, a indústria cerâmica demonstra uma abordagem integrada que equilibra eficiência operacional, sustentabilidade ambiental e responsabilidade social. Essa estratégia não apenas atende às necessidades da produção, mas também cria um modelo sustentável que beneficia a empresa, a comunidade local e o meio ambiente.

3.6 Consumo semanal de madeira em uma empresa para produção de blocos cerâmicos

A utilização de aproximadamente 30m³ de madeira por semana na produção de materiais cerâmicos, equivalente a uma queima para produção de aproximadamente 20.000 unidades de blocos cerâmicos, destaca a escala significativa da operação e a importância da madeira não apenas como matéria-prima, mas também como fonte de energia no processo de queima.

O consumo semanal de 30m³ de madeira revela a magnitude da demanda desse recurso na indústria cerâmica, como mostra na Figura 3 a seguir. A escolha do Eucalipto, com seu rápido crescimento, contribui para atender a essa necessidade em uma escala que sustenta a produção em larga escala de blocos cerâmicos.

Figura 3 – Madeira de Eucalipto para queima



Fonte: Autor (2023)

A madeira desempenha um papel duplo na produção de materiais cerâmicos: não apenas como matéria-prima, mas também como fonte de energia durante o processo de queima. A queima é uma etapa crucial na produção cerâmica, conferindo às peças as propriedades desejadas. O volume substancial de madeira consumido reflete a demanda energética associada a essa fase do processo.

A relação entre o consumo de madeira e a produção de blocos cerâmicos destaca a eficiência do processo. A capacidade de produzir aproximadamente 20.000 unidades semanais demonstra a otimização da operação, onde a gestão eficaz dos recursos é essencial para atender à demanda do mercado.

A escala de produção destaca a importância de estratégias sustentáveis na gestão da madeira. O manejo florestal adequado, o replantio constante e a busca por fontes de energia

renovável são considerações críticas para garantir a sustentabilidade ambiental da operação a longo prazo.

O elevado consumo de madeira, como mostra na Figura 4 a seguir, também apresenta desafios em termos de gestão de recursos naturais e emissões associadas à queima. Ao mesmo tempo, representa uma oportunidade para a indústria investir em tecnologias mais eficientes e sustentáveis, como a utilização de biomassa certificada ou a implementação de práticas de queima mais limpas.

Figura 4 – Estoque de madeira de Eucalipto para queima



Fonte: Autor (2023)

O equilíbrio entre o volume significativo de madeira consumido e a produção expressiva de blocos cerâmicos destaca o compromisso da indústria com a eficiência operacional. Isso não apenas influencia a competitividade no mercado, mas também reforça a importância de estratégias sustentáveis para garantir a continuidade e a responsabilidade ambiental.

O uso considerável de madeira na produção semanal de blocos cerâmicos reflete não apenas a necessidade de matéria-prima, mas também a relevância da madeira como fonte de energia. Esse cenário destaca a importância da gestão sustentável dos recursos naturais e o potencial para inovações que otimizem tanto a eficiência quanto a sustentabilidade na indústria cerâmica.

3.7 O descarte inadequado de cinzas nas empresas

A geração de aproximadamente 80kg de cinzas após o processo de queima na produção de materiais cerâmicos, como mostra na Figura 5 a seguir, é um aspecto relevante a ser considerado, não apenas pelo volume significativo, mas também pelos desafios associados ao descarte inadequado desses resíduos. A gestão apropriada das cinzas é fundamental para a sustentabilidade ambiental da indústria cerâmica.

A produção de 80kg de cinzas semanalmente destaca a quantidade substancial desse subproduto na operação cerâmica. As cinzas são geradas a partir da queima da madeira, desempenhando um papel importante no processo de transformação das matérias-primas em produtos cerâmicos. As cinzas resultantes da queima contêm diversos minerais provenientes da madeira, bem como elementos que podem ter influência nas propriedades físicas e químicas dos produtos cerâmicos. A compreensão da composição das cinzas é crucial para avaliar seu potencial impacto ambiental e explorar possíveis utilizações ou tratamentos.

Figura 5 – Produto da queima de madeira de Eucalipto



Fonte: Autor (2023)

O descarte inadequado das cinzas pode representar um desafio significativo para a sustentabilidade. Se não gerenciadas adequadamente, as cinzas podem contaminar o solo e a água, prejudicando ecossistemas locais. Além disso, a liberação inadequada de substâncias químicas presentes nas cinzas pode ter impactos negativos na qualidade do ar.

Ao invés de descartar as cinzas de forma inadequada, a indústria cerâmica pode explorar oportunidades para a reutilização ou reciclagem desse resíduo. As cinzas podem conter elementos que, se tratados corretamente, podem ser reaproveitados em outros processos industriais ou até mesmo como fertilizantes agrícolas, dependendo de sua composição.

Investir em tecnologias que permitam o tratamento adequado das cinzas é essencial. Isso pode incluir processos de neutralização para reduzir a alcalinidade, filtragem para remover impurezas e a implementação de medidas para evitar a liberação descontrolada de resíduos no meio ambiente.

Garantir o descarte ou reutilização das cinzas em conformidade com as regulamentações ambientais é crucial. Isso não apenas evita possíveis penalidades legais, mas também promove uma cultura de responsabilidade ambiental na indústria cerâmica.

A implementação bem-sucedida de práticas sustentáveis na gestão das cinzas também envolve a educação e conscientização dos funcionários e da comunidade local. Compreender a importância do tratamento adequado das cinzas contribui para uma abordagem mais holística da sustentabilidade.

O desafio das cinzas na produção cerâmica oferece oportunidades para inovações sustentáveis. Ao gerenciar esses subprodutos de maneira responsável, a indústria cerâmica pode não apenas minimizar os impactos ambientais negativos, mas também explorar alternativas que contribuam para práticas mais sustentáveis e responsáveis.

3.8 Cinzas na produção de artefatos cimentícios

A indústria cerâmica se destaca como uma das líderes na prática de reciclagem de resíduos industriais e urbanos, graças ao seu considerável volume de produção, que possibilita a absorção de quantidades significativas de rejeitos. Esse elevado consumo, combinado com as características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e as particularidades do processo cerâmico, a coloca como uma das principais escolhas para a reciclagem de resíduos sólidos (PEREIRA *et al.*, 2012; MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

Nos últimos anos, a crescente pressão sobre o meio ambiente global e a busca por segurança energética impulsionaram o interesse em fontes de energia renováveis e na diversificação das opções energéticas. A biomassa, considerada uma fonte de energia renovável e neutra em CO₂, tem ganhado destaque nesse contexto. Sua taxa de consumo é inferior ao crescimento, o que a torna um potencial fornecedor de energia para aquecimento, geração elétrica e transporte a partir de uma mesma instalação (RAJAMMA *et al.*, 2009).

A aplicação e incorporação de resíduos industriais, especialmente no setor da construção civil, são de extrema importância e necessidade. Isso se deve ao elevado consumo de matéria-prima pelo setor na produção de seus itens. Além disso, a inclusão de resíduos na composição cerâmica proporciona várias vantagens para a indústria, incluindo a preservação de matérias-primas não renováveis, a criação de produtos com forte apelo ambiental e a redução do consumo de energia, entre outros benefícios (PEREIRA *et. al.*, 2012).

Diversos tópicos de pesquisa são explorados nesse campo, abrangendo a disponibilidade e logística da biomassa, tecnologias de conversão como combustão, cogeração e gaseificação, além da redução de emissões, entre outros. A combustão de biomassa sólida é uma tecnologia comprovada para a produção de calor e energia. No entanto, um desafio associado à combustão de biomassa está relacionado às cinzas, tanto no processo de conversão térmica, como na formação de escória e incrustação, quanto na gestão ambiental para uma destinação final apropriada (YIN *et al.*, 2008).

Uma pesquisa foi conduzida sobre a adição de resíduos sólidos provenientes de curtumes em massas cerâmicas para a fabricação de corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 50mm de altura. Os parâmetros analisados incluíram resistência à compressão, absorção de água, lixiviação e solubilização. Com uma adição de 6% de aditivo, a resistência mecânica à compressão permaneceu dentro dos padrões estabelecidos pelas normas em vigor (PEREIRA *et. al.*, 2012).

Apesar dos desafios, a utilização de cinzas de biomassa como ligante alternativo em cimentos tradicionais tem sido identificada como tendo potencial a longo prazo. Isso pode resultar em dois efeitos benéficos: a redução do consumo de energia e matérias-primas pela indústria cimenteira, além da diminuição do descarte direto dos resíduos da combustão da biomassa em aterros. No entanto, é importante considerar que alguns elementos potencialmente tóxicos presentes nas cinzas de biomassa podem ser liberados no meio ambiente em diferentes estágios do ciclo de vida do cimento contendo cinzas volantes, como na reutilização dos agregados de cimento após seu uso inicial em aplicações estruturais (TOSTI *et al.*, 2020).

3.9 Classificação dos resíduos

Resultantes de diversas atividades humanas em todos os momentos, os resíduos apresentam vários impactos, sendo a emissão significativa de gases do efeito estufa um dos mais destacados (MASILAMANI *et al.*, 2017). Nos últimos anos, houve uma transformação na

percepção dos resíduos, que deixaram de ser considerados simples sobras indiscriminadas para se tornarem matéria-prima valiosa (MELO, 2012).

Pode-se ressaltar que o que anteriormente era rotulado como 'lixo' ou rejeito descartado agora é tratado de maneira diferenciada, sendo classificado e processado com o objetivo de reintegrá-lo à cadeia produtiva. Esses resíduos podem ter origem em diversas atividades, destacando-se entre elas as industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de varrição, entre outras.

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, desempenha um papel fundamental na gestão adequada de resíduos sólidos, classificando-os com base em sua origem e periculosidade. Este marco legal é essencial nas ações de gestão de resíduos, sendo aplicado por instituições e órgãos fiscalizadores.

A classificação proporcionada pela lei permite que o gerador de resíduos identifique naturalmente o potencial de risco associado a eles, além de reconhecer as melhores alternativas para reciclagem e/ou destinação final. No artigo 13 da Lei nº 12.305/2010, são apresentadas as classificações dos resíduos, tanto em relação à sua origem quanto à sua periculosidade.

Os resíduos de biomassa provêm de diversas fontes, como doméstica, agropecuária e industrial, e sua disposição inadequada pode resultar em sérios impactos ambientais e ameaças à saúde pública (BIOMASSABR, 2023). Contudo, devido à sua disponibilidade imediata e custo reduzido, esses resíduos podem ser eficientemente aproveitados, proporcionando não apenas economia nos custos de produção, mas também mitigando a poluição ambiental (BIOMASSABR, 2023).

Diante disso, é possível explorar o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a transformação desses resíduos em novos produtos, visando não apenas a redução dos impactos negativos associados aos materiais residuais, mas também a sua conversão em soluções ambientalmente sustentáveis (BIOMASSABR, 2023).

3.10 Argamassa

O uso da argamassa é fundamental na construção civil, sendo composta por cimento, agregado miúdo, água, aditivos e adições. Ela é maleável, durável, pode assumir diversas formas e demonstra resistência mecânica tanto a esforços de cisalhamento quanto a compressão. Na área da construção civil, há uma oportunidade significativa para a inovação de novos materiais, explorando a reutilização de resíduos próprios na composição de elementos construtivos. Esse processo pode acarretar alterações nas propriedades mecânicas, como o

aumento da presença de cinzas resultantes da queima de madeira em alto forno (NETO *et. al.*, 2020).

A argamassa é um material amplamente utilizado na construção civil, desempenhando diversos papéis em diferentes fases e tipos de obras. Ela é aplicada principalmente no levantamento de alvenaria, assentamento cerâmico, revestimento de paredes e tetos, contrapisos, e em reparos estruturais. O cimento Portland é o aglomerante principal utilizado nessas composições. Para avaliar uma argamassa de maneira abrangente, é necessário analisar diversas propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

Entre as propriedades essenciais das argamassas, destacam-se a trabalhabilidade, a densidade e a absorção. A norma NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece as especificações para qualificar as argamassas com base em várias propriedades, incluindo: Densidade de massa no estado fresco e teor de ar incorporado - NBR 13278 (ABNT, 2005); Densidade de massa aparente no estado endurecido - NBR 13280 (ABNT, 2005); Retenção de água - NBR 13277 (ABNT, 2005); Resistência de aderência à tração - NBR 13528 (ABNT, 2010); Resistência à tração na flexão - NBR 13279 (ABNT, 2005); Coeficiente de capilaridade - NBR 15259 (ABNT, 2005).

A trabalhabilidade, considerada uma propriedade crucial no estado fresco da argamassa, indica quão fácil é misturar, transportar e aplicar o material. Determinar essa propriedade é complexo, pois depende do tipo de substrato onde será aplicada, além de outras características como plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa, adesão inicial e consistência (MATOS, GUIMARÃES *et al.*, 2017; CARASEK, 2007).

Quanto ao comportamento mecânico, especialmente a resistência à compressão, é crucial que a argamassa adquira rapidamente alguma resistência, permitindo o assentamento de várias fiadas no mesmo dia e desenvolvendo resistência ao longo do tempo. No entanto, não é necessário que as argamassas de assentamento tenham resistências elevadas para garantir o desempenho adequado das paredes; pelo contrário, a resistência da argamassa não deve exceder a do bloco (CARASEK, 2007). O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão, conforme previsto na NBR 13279 (ABNT, 2005), pode ser realizado para avaliar as propriedades mecânicas das argamassas (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

3.10.1 Aglomerante: cimento

O cimento Portland é uma substância em pó finamente moída com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que solidifica quando em contato com a água. Uma vez endurecido, mesmo se exposto novamente à água, o cimento Portland não sofre decomposição. Quando misturado com água e outros materiais de construção, como agregado miúdo, pedra britada, pó-de-pedra, cal e outros, resulta na formação de concretos e argamassas. Esses materiais são amplamente utilizados na construção de residências, edifícios, pontes, barragens, entre outros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

O cimento, como material, teve sua origem aproximadamente há 4500 anos. A palavra "cimento" tem sua origem no latim "*cementu*", principalmente utilizada pelos romanos para descrever a união de pedras naturais provenientes de rochedos de calcário com cinzas vulcânicas da região de Pozzuoli (GRANDE, 2003).

Os materiais à base de cimento, como argamassas e concretos, são amplamente empregados devido às suas características que facilitam a produção, moldabilidade e proporcionam elevadas resistências mecânicas, resultando em uma variedade de elementos na indústria da construção civil, tanto para fins estruturais quanto não estruturais (MOHAMAD *et al.*, 2022).

Em termos de volume, o cimento é o produto manufaturado mais abundante no mundo. Materiais que incorporam cimento em sua composição são formados ao serem misturados com água e agregados minerais, como é o caso do concreto. O cimento é a segunda substância mais amplamente utilizada globalmente, após a água. O ambiente construído, tal como o conhecemos hoje, é majoritariamente composto por esse material. Atualmente, o concreto e a argamassa continuam sendo materiais de construção acessíveis e energeticamente eficientes (SCRIVENER *et al.*, 2018).

As características e propriedades dos concretos e argamassas são influenciadas pela qualidade e proporções dos materiais que os compõem. Dentre esses materiais, o cimento desempenha um papel químico fundamental. Pode-se afirmar que o cimento é o principal agente responsável por conduzir a transformação da mistura dos componentes desses materiais em produtos finais desejados, como lajes, vigas ou revestimentos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

O cimento pode ser caracterizado como um aglomerante hidráulico composto por óxidos (cálcio, silício, ferro e alumínio), que, ao entrar em contato com a água, possui a capacidade de endurecer. A norma C 150 (ASTM, 2018) define o Cimento Portland como um aglomerante

hidráulico obtido pela moagem do clínquer, composto essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos, frequentemente com a inclusão de um ou mais tipos de sulfatos de cálcio como produto adicional.

O progresso na produção de cimento está intrinsecamente relacionado à atividade econômica, aos níveis de industrialização e ao desenvolvimento da infraestrutura. Observa-se uma tendência de redução na intensidade da demanda por cimento em países mais desenvolvidos, enquanto essa demanda cresce em nações em desenvolvimento (STAFFORD *et al.*, 2016).

Segundo informações do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento do Brasil (SNIC, 2021), o consumo anual de cimento em 2021 registrou um aumento de 1,6% em comparação com 2020, totalizando quase 65 milhões de toneladas vendidas no ano.

No contexto brasileiro, a Associação Brasileira de Cimento Portland classifica diversos tipos de cimento Portland, identificados pela sigla CP seguida de algarismos romanos de I a V. Além disso, existem classificações adicionais com outra sigla, conforme a composição e propriedades, como apresentado na Tabela 1 (CNI, 2017) a seguir.

Tabela 1 – Tipos de cimento

	Sigla	Diferencial
Cimento Portland Comum	CP I	Cimento comum
Cimento Portland Comum com adição	CP I - S	Cerca de 5% de material pozolânico
Cimento Portland Composto	CP II	Cimento comum com adição de material (E, Z ou F)
Cimento Portland Composto com Escória	CP II - E	Adição de 6% a 34% de escória de alto forno
Cimento Portland Composto com Pozolana	CP II - Z	Adição de 6% a 14% de material pozolânico
Cimento Portland Composto com Filer	CP II - F	Adição de 6% a 10% de filer de calcário
Cimento Portland de Alto-Forno	CP III	Adição de 35% a 70% de escória de alto-forno
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	Adição de 15% a 50% de material pozolânico
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V – ARI	Moagem mais fina, clínquer mais tempo no moinho
Cimento Portland Resistente a Sulfatos	CP (X) RS	Cimentos que resistem a meios sulfatados
Cimento Portland Baixo Calor de Hidratação	CP (X) BC	Geram até 260 J/g e até 300 J/g aos 3 dias e 7 dias
Cimento Portland Branco	CP B	Baixo teores de óxidos de ferro e manganês

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2023)

Quando menciona o CP II-F, observa-se sua ampla aplicação em diversas situações, como na formulação de argamassas de assentamento, revestimento, estruturas de concreto armado, solo-cimento, pisos e pavimentos de concreto, entre outras aplicações. Esse tipo específico de cimento é composto por 90% a 94% de clínquer e gesso, complementados por 6% a 10% de material carbonático ou filer, apresentando classes de resistência de 25, 32 e 40 Mpa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991). Conforme Tabelas 2, a caracterização do cimento Portland CP II – F.

Tabela 2 – Caracterização do cimento Portland CP II – F

PROPRIEDADES	MÉTODOS DE ENSAIO	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	PARÂMETROS NORMATIVOS DA NBR 11578: 1991
Massa unitária (g/cm ³)	NBR NM 23: 2001	1,05	-
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23: 2001	3,17	-
Finura Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76: 1998	4380	≥ 2600
Resíduo na peneira # 200, 75mm (%)	NBR 11579: 1991	0,8	≤ 12
Resíduo na peneira # 325, 45 mm (%)	NBR 12826: 1993	5,8	-
Tempo de início de pega (h, min)	NBR NM 65: 2003	2 h, 20 min	≥ 1 h
Tempo de fim de pega (h, min)	NBR NM 65: 2003	3 h, 00 min	≤ 10 h (facultativo)
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	NBR 7215: 1996	23,0	≥ 10
7 dias (MPa)		31,5	≥ 20
28 dias (MPa)		40,0	≥ 32
Teor de MgO (%)	NBR NM 14: 2012	1,04	≤ 6,5
Teor de SO ₃ (%)	NBR NM 14: 2012	2,65	≤ 4,0

Fonte: Carasek, Araújo, 2016

3.10.2 Agregados

Os agregados desempenham um papel crucial na elaboração da dosagem do concreto, sendo um dos ingredientes mais importantes. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que aproximadamente 70 a 80% do volume total do concreto é composto por agregados, resultando em um custo mais baixo por unidade de volume, uma vez que esses materiais são geralmente

mais acessíveis que o cimento. A atuação dos agregados é determinante em diversas propriedades, incluindo a redução da retração na pasta, o aumento da resistência ao desgaste e a melhoria na trabalhabilidade (NEVES, 2009).

A escolha de utilizar agregados é fundamentada na compreensão de que quanto maior a quantidade de agregado, menor será a relação água/cimento efetiva. Em outras situações, um teor mais elevado de agregado resultaria em menor retração e exsudação, minimizando assim o impacto na aderência entre o agregado e a pasta, além de reduzir as variações térmicas devido ao calor gerado durante a hidratação do cimento (NEVILLE, 2015). Neville (2015) destaca que a influência do agregado na resistência do concreto não se limita apenas à sua resistência mecânica, mas também está significativamente relacionada à absorção e às características de aderência.

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento desempenha um papel crucial na resistência do concreto, especialmente em relação à resistência à flexão. Um exemplo prático desse conceito é que uma superfície mais áspera, como a de partículas britadas, resulta em uma melhor aderência devido ao intertravamento mecânico.

Em relação às dimensões, os agregados são categorizados em dois grupos distintos. Os miúdos referem-se às areias quartzosas, enquanto os graúdos incluem seixos rolados, cascalho, britas, e os agregados pétreos de grandes grãos, que variam de 250 mm a 76 mm e de 76 mm a 250 mm, conforme as especificações da NBR 7211 (ABNT, 2019) e NBR 9935 (ABNT, 2011). Os agregados inorgânicos leves, também conhecidos como granulado celular, são classificados em dois grupos de acordo com as normas brasileiras. O Grupo I, composto por agregados miúdos, é caracterizado quando pelo menos 98% dos grãos passam pela peneira de 4,8 mm. Já o Grupo II, que engloba os agregados graúdos, é definido quando pelo menos 90% dos grãos ficam retidos na peneira de 4,8 mm, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 7213 (ABNT, 2013).

4 METODOLOGIA

4.1 Tipo de pesquisa

O presente trabalho foi classificado em pesquisa bibliográfica quantitativa e exploratória experimental, com formato de valores que pode se transformar em números, ou seja, valida suposições a partir dos valores recolhidos de uma qualidade considerável de corpos de prova (objeto de estudo) e desenvolve os resultados.

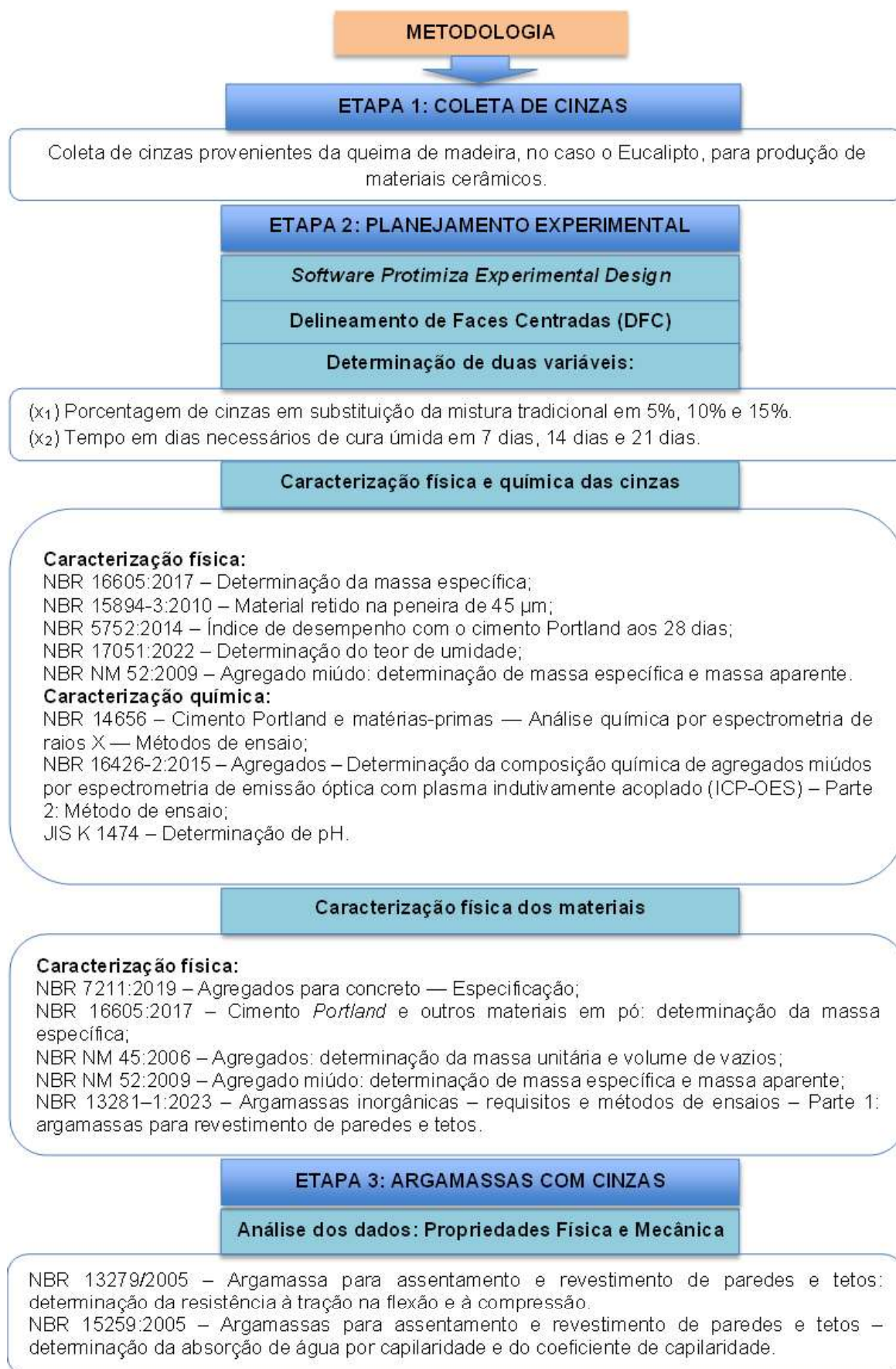
O material estudado foram as cinzas provenientes da queima de podas de árvore típicas de reflorestamento, no caso o Eucalipto, coletadas em uma indústria de produção de materiais cerâmicos, no estado do Tocantins. A metodologia adotada para este estudo foi estruturada em três etapas distintas, cada uma desempenhando um papel crucial no desenvolvimento e análise dos materiais cerâmicos.

A primeira etapa consistiu na coleta das cinzas resultantes da queima de madeira, especificamente do Eucalipto, diretamente de dentro do forno para melhor qualidade da amostra, destinadas à produção dos materiais cerâmicos em questão. Em seguida, na segunda etapa, empregou-se a um planejamento experimental conduzido pelo software *Protimiza Experimental Design*. Este planejamento, baseado em um Delineamento de Faces Centradas (DFC), permitiu a determinação de dois fatores essenciais.

Além disso, durante esta fase, realizou-se uma caracterização física e química das cinzas obtidas e dos materiais utilizados na produção de argamassa tradicional. Adicionalmente, procedeu-se com uma análise das propriedades dessas argamassas. Na terceira etapa, focou-se na geração de corpos de prova de argamassas tradicionais com substituição parcial da mistura por cinzas, visando explorar e otimizar as propriedades desejadas para o contexto específico do estudo.

Este sequenciamento metodológico permitiu uma abordagem abrangente, desde a obtenção das matérias-primas até a formulação e desempenho das argamassas. A evolução metodológica dos procedimentos realizados está representada na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Fluxograma das atividades que serão desenvolvidas



Fonte: Autor (2024)

4.2 Planejamento Experimental

O planejamento experimental inicia com a análise estatística dos experimentos que foi realizada utilizando o programa *Protimiza Experimental Design*. As variáveis independentes analisadas foram a porcentagem de cinzas em substituição do cimento (x_1) e o tempo em dias necessários de cura úmida (x_2) com um desenho fatorial 2^2 (quadrático) adotando 3 repetições no ponto central.

De acordo com o delineamento experimental utilizado, o número total de combinações experimentais no ensaio mostrou 11 sem perder a qualidade pois, no modelo quadrático adotado, necessitou de pelo menos 6 parâmetros diferentes, ou seja, teve um grau de liberdade relevante para obter os 6 parâmetros. A repetição genuína foi de 3 devido ensaio de bancada ser em triplicada, e os pontos centrais foram gerados automaticamente, quando se colocou os níveis de -1 a +1.

As variáveis dependentes, ou seja, as respostas previstas foram ajustadas por um modelo de segunda ordem, sendo o comportamento mecânico de resistência e absorção de água por capilaridade. Para a otimização das variáveis de resposta, foi realizado o delineamento experimental fatorial 2^2 (DFC) com 2 variáveis independentes, cada uma em três níveis (-1, 0, +1) totalizando 11 ensaios – sendo (-1) para o menor valor, 5% e 7 dias, (0) para 10% e 14 dias e (+1) para 15% e 21 dias (como citado anteriormente, os ensaios foram feitos em triplicada). O material colocado em estudo foi as cinzas de provenientes da queima de podas de árvore típicas de reflorestamento, no caso o Eucalipto, coletadas em uma indústria de produção de material cerâmico, no estado do Tocantins.

O estudo em questão teve por finalidade o desempenho dos corpos de prova prismáticos de argamassa tradicional em substituição parcial da mistura por cinzas, seguindo o planejamento experimental, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Planejamento experimental por Delineamento de Faces Centradas (DFC)



Fonte: Autor (2024)

Inicialmente, foi feito o levantamento de normativas, respeitando o recomendado de 7 a 21 dias, depois o percentual de cinzas foi determinado por literatura, sendo 5%, 10% e 15%. Em seguida o planejamento, número de ensaios, ensaio de bancada e análise dos resultados dos ensaios. Foram colocados os valores reais de bancada, sendo os valores centrais os 3 últimos na ordem de ensaio, e o motivo de serem 3 ensaios iguais foi devido serem o ponto central, no qual foi uma repetição para ver o erro de um experimento.

Os domínios das faixas dos parâmetros estudados foram de acordo a seguir. Sendo assim, os ensaios foram realizados de acordo com os fatores e níveis, conforme expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores e níveis a serem utilizados no planejamento experimental

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
% de cinzas substituídas pela mistura da argamassa	5	10	15
Tempo de cura úmida, em dias	7	14	21

Fonte: Autor (2023)

A ordem dos experimentos empregados no planejamento experimental está expressa com seus respectivos fatores e níveis, como mostra na Tabela 4 a seguir, sendo executados de acordo com a porcentagem de cinzas substituídas pela mistura da argamassa tradicional com a quantidade de dias estabelecidos.

Tabela 4 – Ordem dos experimentos

Ordem dos experimentos	Fatores	
	% de cinzas substituídas pela mistura (x ₁)	Tempo de cura úmida, em dias (x ₂)
1	5 (-1)	7 (-1)
2	15 (+1)	7 (-1)
3	5 (-1)	21 (+1)
4	15 (+1)	21 (+1)
5	5 (-1)	14 (0)
6	15 (+1)	14 (0)
7	10 (0)	7 (-1)
8	10 (0)	21 (+1)
9	10 (0)	14 (0)
10	10 (0)	14 (0)
11	10 (0)	14 (0)

Fonte: Autor (2023)

A quantidade de corpos de prova confeccionados foi determinada a partir do Delineamento de Faces Centradas (DFC), com total de 11 corpos de prova prismáticos de argamassa com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm, nas proporções e realizado em triplicada, seguindo a Tabela 5. Vale ressaltar que o ensaio será realizado em triplicada.

Tabela 5 – Quantidade de corpos de prova de acordo com os fatores (em triplicada)

% de cinzas substituídas pela mistura	Quantidade de corpo de prova (unid)	Tempo de cura úmida (dias)
5%	3	7
	3	14
	3	21
	3	7
10%	9	14
	3	21
	3	7
15%	3	14
	3	21

Fonte: Autor (2024).

A quantidade de materiais que precisou ser separado para cada traço, foi calculada a partir da substituição parcial da massa da mistura para produção dos corpos de prova de argamassa como também dos valores obtidos da caracterização dos próprios materiais. Isso através do volume correspondente do corpo de prova, a partir do traço convencional de argamassa 1:2:6.

A preparação dos materiais e a confecção dos corpos de prova representaram etapas cruciais no processo de avaliação do desempenho da resistência à tração na flexão e à compressão de argamassas, conforme estabelecido pela norma NBR 13279/2005. Durante essa fase, foi fundamental que os corpos de prova fossem meticulosamente moldados e separados em proporções distintas de cinzas, além de serem numerados de forma a garantir um controle preciso dos valores obtidos.

A confecção dos corpos de prova seguiu rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelas normas, garantindo a uniformidade dos procedimentos. Posteriormente, o desmolde dos corpos de prova permitiu a análise do desempenho de sua resistência à tração na flexão e à compressão, fornecendo informações cruciais para a avaliação da qualidade das argamassas utilizadas em assentamento e revestimento de paredes e tetos.

Os corpos de prova foram submetidos a cura úmida através da NBR 13281-1/2023 Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios, após o desmolde, respeitando o

período de 48h, sendo o tempo em dia, de acordo com o Delineamento de Faces Centradas (DFC).

4.3 Materiais e Métodos

Os materiais necessários que foram utilizados no presente trabalho constituíram-se de cimento, agregado miúdo, cinzas e cal. O primeiro (o cimento) foi do tipo *Portland* CP-II F 32, o segundo (o agregado miúdo), foi do tipo médio, o terceiro (as cinzas) foi recolhido em uma indústria de produção de materiais cerâmicos, no estado do Tocantins, e o quarto (a cal) foi do tipo hidratada.

Assim como, a utilização dos equipamentos e utensílios, tais como: argamassadeira; balança de precisão de 1 g; balança comum; séries de peneiras; hastes metálicas; fôrmas prismáticas 4 cm x 4 cm x 16 cm; desmoldante; palha de aço; mesa de adensamento por choque; máquina universal de ensaios; elermeyer; água deionizada; chapa de aquecimento por indução; pHmetro modelo A201; proveta; cadinho de porcelana; estufa; dessecador; recipientes de armazenagem; espátula; e outros seguindo as normas citadas.

Os procedimentos metodológicos que envolvem os ensaios laboratoriais e caracterizações dos materiais foram realizados no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Universidade Federal do Tocantins (UFT), no laboratório de materiais e no laboratório de análises de águas, como também na Universidade de São Paulo (USP). O tempo para realizar todos os procedimentos metodológicos foi de 47 dias.

4.3.1 Caracterização física e química das cinzas

As cinzas provenientes da queima de madeira de reflorestamento foram passadas por ensaios técnicos laboratoriais conforme estabelecem as NBRs abaixo.

- NBR 16605:2017 – Determinação da massa específica;
- NBR 15894-3:2010 – Material retido na peneira de 45 µm;
- NBR 5752:2014 – Índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias;
- NBR 17051:2022 – Determinação do teor de umidade;
- NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo: determinação de massa específica e massa aparente.

Na caracterização química, tem-se:

- NBR 14656 – Cimento Portland e matérias-primas — Análise química por espectrometria de raios X — Métodos de ensaio;
- NBR 16426-2:2015 – Agregados – Determinação da composição química de agregados miúdos por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) – Parte 2: Método de ensaio;
- JIS K 1474 – Determinação de pH.

4.3.2 Caracterização física dos materiais

Os materiais presentes na mistura da argamassa foram submetidos a ensaios técnicos em laboratório de acordo com as normas estabelecidas nas seguintes NBRs.

Caracterização física em:

- NBR 7211:2019 – Agregados para concreto — Especificação;
- NBR 16605:2017 – Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica;
- NBR NM 45:2006 – Agregados: determinação da massa unitária e volume de vazios;
- NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo: determinação de massa específica e massa aparente;
- NBR 13281-1:2023 – Argamassas inorgânicas – requisitos e métodos de ensaios – Parte 1: argamassas para revestimento de paredes e tetos.

4.4 Ensaios mecânicos de resistência

Os corpos de prova prismáticos foram submetidos a uma sequência de ensaios mecânicos para análise do seu desempenho. Inicialmente, foi realizado o ensaio de tração na flexão, no qual cada corpo de prova foi posicionado horizontalmente, com os lados de superfície lisa voltados para a prensa hidráulica. Uma carga foi aplicada até atingir o ponto de ruptura, dividindo assim o corpo de prova em duas partes iguais.

Posteriormente, as duas partes resultantes foram submetidos ao ensaio de compressão, aplicando uma força axial em ambas as metades, conforme os parâmetros estabelecidos pela norma NBR 13279/2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Este procedimento permitiu uma análise abrangente do desempenho mecânica das argamassas tradicionais com utilização de resíduos de biomassa da indústria cerâmica, garantindo conformidade com os padrões estabelecidos para esses tipos específicos de ensaios.

4.5 Ensaios de absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi embasado através da NBR 15259/2005 – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. É necessário para entender como materiais como argamassas absorvem água através de seus poros quando estão em contato direto com o líquido.

Durante o teste, uma extremidade do material é colocada em água, permitindo que a umidade se infiltre gradualmente pelos capilares. A capacidade de absorção de água por capilaridade pode influenciar não apenas a resistência do material, mas também seu isolamento térmico e sua aparência ao longo do tempo, especialmente em ambientes com condições climáticas variadas.

4.6 Análise Estatística

O procedimento experimental, Delineamento de Faces Centradas (DFC), desempenhou um papel fundamental ao fornecer valores estatísticos relevantes para a análise do nível de significância. Esses valores foram expressos de maneira visualmente informativa por meio de gráficos e superfícies de resposta, utilizando o software *Protimiza Experimental Design*. Nesse contexto, o software revelou não apenas a função de regressão, mas também realizou uma Análise de Variância (ANOVA) para avaliar a existência de diferenças significativas entre as médias obtidas, considerando o tipo de traço de argamassa adotado em duas hipóteses distintas.

Através dessa análise estatística, foi possível observar a dispersão dos valores obtidos nos ensaios experimentais, oferecendo insights valiosos sobre as variações nos resultados. Além disso, a representação gráfica dos valores no diagrama de Pareto permitiu identificar e priorizar os fatores mais influentes, destacando as principais contribuições para as variações observadas. As superfícies de resposta complementam essa análise, proporcionando uma compreensão visual das relações complexas entre as variáveis estudadas.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterizações das cinzas

As cinzas provenientes da queima de madeira de reflorestamento passaram por uma série de ensaios técnicos laboratoriais para garantir sua adequação e eficiência em diversas aplicações na construção civil. Esses ensaios seguiram normas brasileiras (NBRs) específicas, cada uma abordando diferentes aspectos físicos e químicos das cinzas.

5.1.1 Caracterização física das cinzas

Primeiro, foi utilizada a NBR 15894-3:2010 – Material retido na peneira de 45 µm para separar melhor a quantidade de partículas finas presentes nas cinzas. Esse procedimento foi essencial, pois a quantidade de partículas finas poderia afetar significativamente a facilidade de manuseio da mistura. A norma mostrou como fazer o peneiramento da amostra de cinzas para ser feita de forma padronizada, garantindo que obtivesse material mais homogêneo e consistente sobre a granulometria.

Para entender a densidade das cinzas, aplicou-se a NBR 16605:2017 – Determinação da massa específica. Esse teste foi fundamental, pois ajudou a calcular a proporção correta de cinzas a serem misturadas em compósitos de cimento. A norma estabeleceu para medir a massa específica das cinzas, garantindo que os cálculos fossem mais precisos. Com essas informações, pôde-se ajustar as dosagens de forma adequada, assegurando que a mistura de cimento tivesse as propriedades desejadas de resistência e durabilidade, tendo como resultado exposto no Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Massa específica das cinzas

Característica	Valor
Massa específica das cinzas (g/cm ³)	2,63

Fonte: Autor (2024).

Como também a medição do teor de umidade das cinzas conforme a NBR 17051:2022 – Determinação do teor de umidade. Saber o nível de umidade foi necessário, pois isso poderia afetar diretamente a consistência da mistura de argamassa e descobrir quanto de água a mistura absorveu do ambiente. Os resultados mostraram uma média de 2,33% para os três valores obtidos. Esses valores foram essenciais para ajustar a quantidade de cinzas na mistura,

assegurando assim que se obteve uma combinação uniforme e eficiente, conforme Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Ensaio do Teor de Umidade das Cinzas

Valores	Amostra 01	Amostra 02	Cadinho 03
P1 (g)	34,42	47,07	45,66
P2 (g)	35,39	48,05	46,64
P0 (g)	1,00	1,00	1,00
Teor de umidade (%)	3,00	2,00	2,00
Teor de umidade médio (%)		2,33	
Desvio Padrão		0,01	
Coefficiente de Variação (%)		24,74	

Fonte: Autor (2024).

Em seguida, a NBR NM 52:2009 – Agregado miúdo: determinação de massa específica e massa aparente foi aplicada para entender melhor como são as cinzas, ajudando a ajustar a quantidade certa delas em misturas usadas na construção, levando em conta os poros permeáveis, dividindo a massa pelo volume.

A diferença entre a densidade aparente e a massa específica das cinzas da queima de biomassa de eucalipto está no volume considerado. A massa específica mede apenas o volume das partículas sólidas, enquanto a densidade aparente inclui também os espaços vazios entre elas, resultando em um valor menor. Essa diferença é importante porque influencia o comportamento das cinzas em misturas, como argamassas, impactando a eficiência e a qualidade do material final.

O resultado foi uma média de densidade aparente de 0,612 g/cm³, conforme mostrado na Tabela 8 a seguir.

Este teste foi importante pois a densidade aparente está diretamente ligada à quantidade de poros na argamassa após o endurecimento, o que impacta nas suas propriedades finais.

Tabela 8 – Determinação de Densidade Aparente das Cinzas

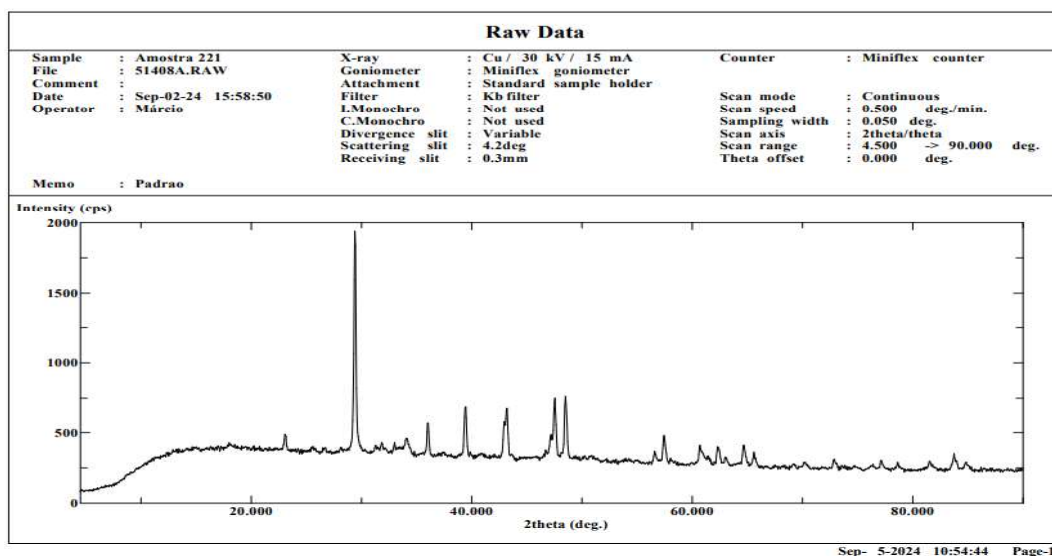
Volume (mL)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
10	5,80	0,580
20	12,34	0,617
30	18,81	0,627
40	24,86	0,622
50	30,81	0,616
Densidade aparente média (g/cm³)		0,612
Desvio padrão		0,02
Coefficiente de variação (%)		3,03

Fonte: Autor (2024).

5.1.2 Caracterização química das cinzas

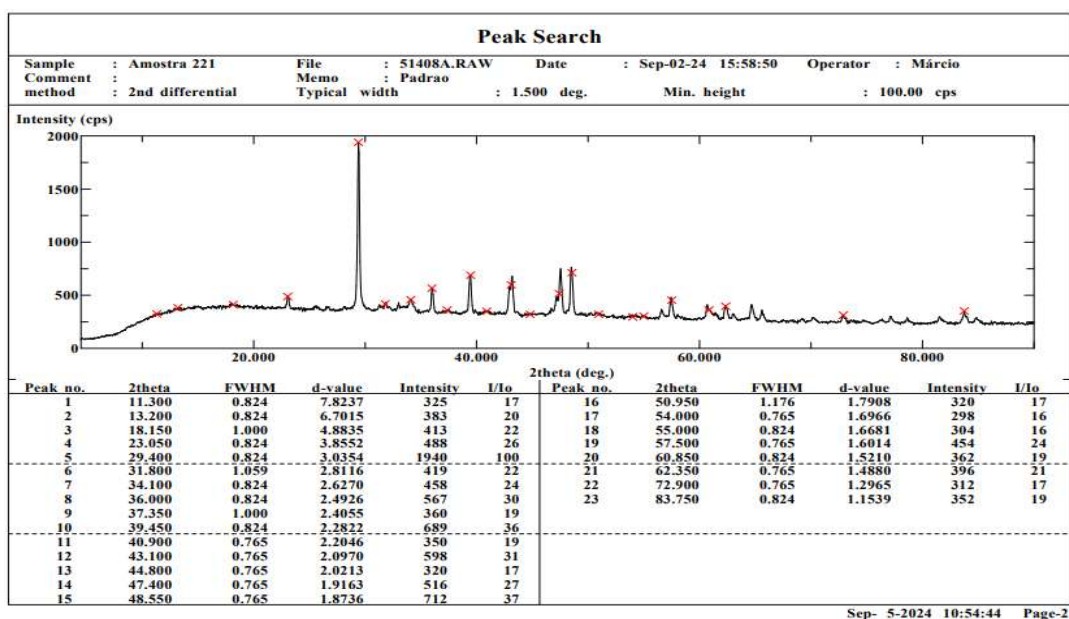
Para entender melhor as propriedades das cinzas, utilizou-se algumas normas de caracterização química. Através da aplicação da NBR 14656 – que mostrou métodos de análise por espectrometria de raios X para cimento Portland e matérias-primas – conseguiu-se identificar e medir os elementos presentes, conforme Figuras 8 e 9 a seguir.

Figura 8 – Ensaio de DRX – Difração de Raios X – Raw Data



Fonte: Centro Analítico de Instrumentação de São Paulo (2024).

Figura 9 – Ensaio de DRX – Difração de Raios X – Peak Search



Fonte: Centro Analítico de Instrumentação de São Paulo (2024).

Isso foi importante para entender melhor como as cinzas podem reagir, sendo importante para sua utilização. O ensaio de difração de raios X (DRX) mostrou que a amostra possui várias fases cristalinas, com um pico significativo em torno de 30° , sugerindo a presença de um mineral dominante, possivelmente quartzo ou silicato de cálcio, que indicam boa capacidade de cimentação. Além disso, outros picos menores apontam para a presença de aluminatos e fases relacionadas às cinzas, sugerindo que o material tem potencial reativo.

Embora a presença de fases inertes não contribua diretamente para a resistência, elas podem melhorar a trabalhabilidade e reduzir os custos.

Além disso, utilizou-se a norma NBR 16426-2:2015 para examinar os componentes químicos das cinzas. Essa norma, que emprega a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), forneceu informações mais precisas sobre a presença de diferentes metais e elementos, conforme Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Resultados das determinações dos elementos por ICP OES

Amostra	Al (ppm)	Ca (%)	Fe (ppm)	Si (%)
Amostra	6157,97	31,58	5603,31	2,48
	6167,25	31,69	5754,04	2,32

Fonte: Centro Analítico de Instrumentação de São Paulo (2024).

A digestão da amostra foi realizada por fusão alcalina com tetraborato de lítio, seguida de dissolução com ácido nítrico; Resultados em porcentagem em massa, $1\% = 10.000\text{ ppm}$ (mg.kg^{-1} ou mg.L^{-1}).

Isso colaborou com a compreensão da composição dos materiais que foram utilizados. Os resultados da análise da amostra, realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) seguindo a norma NBR 16426-2:2015, revelaram concentrações significativas de alumínio, cálcio, ferro e silício. O alumínio, com uma concentração média de 6157,61 ppm, pode aumentar a resistência e a durabilidade da argamassa. O cálcio, com 31,63%, é fundamental para as reações de endurecimento da mistura, e o silício, com 2,40%, contribui para a formação do silicato de cálcio hidratado, crucial para a resistência mecânica. O ferro, presente em 5678,72 ppm, tem um impacto menos significativo, mas deve ser monitorado.

Utilizou-se também a normativa de caracterização química, no caso, o de pH.

O ensaio de pH foi como um indicador que diz se uma solução aquosa é ácida, neutra ou alcalina. Nas cinzas que foram analisadas, o pH foi medido mostrando que são mais alcalinas, conforme apresentado na Tabela 10 a seguir. Esse ensaio foi importante pois serve para evitar danos à pasta de cimento quando as cinzas são usadas.

Tabela 10 – Ensaio de pH

Ensaio	Valor
pH	11,41

Fonte: Autor (2024).

Os sais de cálcio presentes nas cinzas da queima de biomassa de eucalipto são responsáveis por elevar o pH do material, já que possuem uma natureza alcalina. Isso pode ser confirmado ao comparar os dados da Tabela 9, que mostram a composição química das cinzas (incluindo óxidos de cálcio), com os valores de pH apresentados na Tabela 10. Essa relação indica que a presença de compostos de cálcio nas cinzas aumenta a alcalinidade do material, o que pode beneficiar misturas cimentícias, melhorando a hidratação e contribuindo para o ganho de resistência ao longo do tempo.

Esses ensaios garantiram que as cinzas de madeira de reflorestamento, o Eucalipto, pudessem ser usadas de maneira eficaz e segura na confecção dos corpos de prova de argamassa, aproveitando ao máximo suas propriedades e contribuindo para a sustentabilidade. Essa abordagem assegurou que cada etapa do processo de seleção e teste fosse conduzida, permitindo a ligação entre os compostos responsáveis desses materiais.

5.2 Caracterizações dos materiais

No estudo realizado, explorou-se a caracterização física dos materiais, focando em entender as propriedades como massa específica, densidade e volume de vazios. Utilizou-se normas técnicas reconhecidas para determinar essas características, o que permitiu ter uma visão das condições físicas dos materiais que foram analisados. Essa caracterização foi muito importante para avaliar como esses materiais se comportam em diferentes aplicações industriais e construtivas.

5.2.1 Caracterização física dos materiais

A Brasileira NBR 7211:2019 estabeleceu as especificações técnicas para os agregados utilizados na produção das argamassas. Essa norma definiu os requisitos mínimos de qualidade para os diferentes tipos de agregados, como agregado miúdo e agraúdo, garantindo que eles atendessem aos padrões necessários de resistência, durabilidade e tamanho das partículas para serem usados em construções. Teve como resultado da caracterização de agregado miúdo os valores na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Agregado miúdo	
Caracterização	Valores
Módulo de finura agregado miúdo (g/cm^3)	1,97
Dimensão máxima (mm)	2,38

Fonte: Autor (2024).

A NBR 16605:2017 estabeleceu os métodos para determinar a massa específica dos cimentos Portland e outros materiais em pó. Essa medida foi crucial para garantir a qualidade e a consistência dos materiais usados na construção civil, já que a densidade dos materiais afeta diretamente as propriedades da argamassa produzidos. Os resultados das massas específicas estão expostos na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12 – Massas Específicas Materiais em Pó	
Caracterização	Valores
Massa Específica do Cimento (g/cm^3)	3,17
Massa específica da cal (g/cm^3)	2,61

Fonte: Autor (2024).

A NBR NM 45:2006 estabeleceu os métodos para determinar a massa unitária e o volume de vazios dos agregados usados na construção civil. Essas medições foram necessárias para calcular a quantidade de agregado necessária na produção de argamassa, garantindo o desempenho da compactação adequada e a resistência final do material. Tendo como resultado, de acordo com a Tabela 13 a seguir.

Tabela 13 – Massa unitária do Agregado Miúdo	
Caracterização	Valor
Massa unitária do agregado miúdo (g/cm^3)	1,46

Fonte: Autor (2024).

A NBR NM 52:2009 estabeleceu os métodos para determinar a massa específica e a massa aparente dos agregados miúdos, como areia e brita fina, usados na produção de concreto e argamassa. Esses parâmetros foram importantes para garantir a dosagem correta dos materiais, o que influencia diretamente nas propriedades finais da argamassa utilizados na construção. A Tabela 14 a seguir mostra do resultado dessa caracterização.

Tabela 14 – Características do Agregado Miúdo

Caracterização	Valor
Massa específica do agregado miúdo (g/cm^3)	2,62

Fonte: Autor (2024).

Por fim, a NBR 13281-1:2023 especificou os requisitos e métodos de ensaios para argamassas inorgânicas usadas no revestimento de paredes e tetos. Ela estabeleceu os critérios mínimos de desempenho, como resistência à adesão, facilidade de aplicação e durabilidade, garantindo que as argamassas atendessem às exigências técnicas necessárias para serem aplicadas em construções civis.

5.3 Desempenho das argamassas com substituição parcial da mistura

Foi realizada uma análise para entender como diferentes variáveis afetam o desempenho das argamassas tradicionais quando substituímos parte da mistura por cinzas de madeira. Especificamente, duas variáveis principais: a porcentagem de cinzas usadas em substituição da mistura tradicional de argamassa (x_1) e o tempo necessário de cura úmida, em dia (x_2). O objetivo foi encontrar as melhores combinações dessas variáveis para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo de construção. Para isso, foi colocado em ensaio a resistência das argamassas à tração na flexão e à compressão, comparando esses resultados com os padrões estabelecidos pela NBR 13281/2023 – Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Essa norma especifica os requisitos mínimos de desempenho para garantir a segurança e a qualidade do material. Também foi feito o ensaio de absorção de água por capilaridade pela NBR 15259/2005 Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

5.3.1 Ensaio de resistência mecânica: tração na flexão

Os resultados do planejamento de Delineamento de Faces Centradas (DFC) sobre a resistência mecânica de tração na flexão foram apresentados na Tabela 15 a seguir. Esses resultados mostraram uma visão mais ampla de como diferentes combinações de variáveis influenciam o desempenho dessas argamassas.

Tabela 15 - Resultados dos valores médios obtidos através dos ensaios de tração na flexão

Ordem dos experimentos	Fatores		Resposta	Média da resistência à tração na flexão, em MPa
	% de cinzas substituídas pela mistura (x ₁)	Tempo de cura úmida, em dia (x ₂)	Resistência à tração na flexão, em MPa (y ₁)	
1	4	7	2,07	2,20*
2	15	7	1,60	
3	5	21	2,70	
4	15	21	1,90	
5	5	14	2,90	
6	15	14	1,10	
7	10	7	1,40	
8	10	21	1,80	
9	10	14	2,30	
10	10	14	2,20	
11	10	14	2,30	

* Média da resistência à tração na flexão, em MPa, do traço testemunha (sem cinzas), aos 14 dias

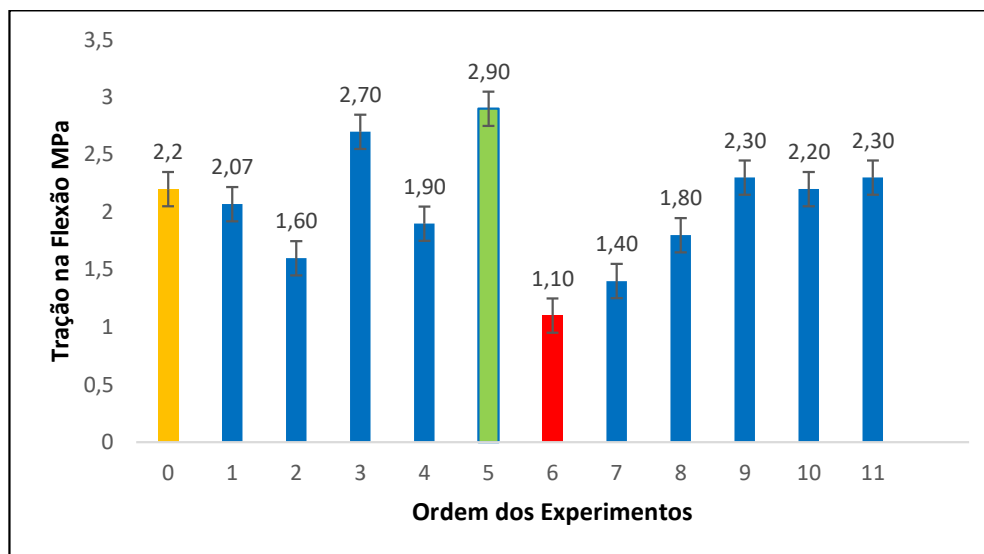
Fonte: Autor (2024).

Ao verificar a Tabela 15, pôde-se ver como a porcentagem de cinzas usadas para substituir a mistura tradicional de argamassa e o tempo de cura úmida afetaram diretamente a resistência das amostras.

Pôde-se ver que o ensaio 5 se destacou pela maior resistência mecânica à tração na flexão, alcançando uma média de 2,90 MPa com 5% de substituição de cinzas pela mistura após 14 dias de cura úmida, em verde no Gráfico 1 a seguir. Por outro lado, o ensaio 6 registrou a menor resistência, com apenas 1,10 MPa, usando 15% de substituição no mesmo período de cura, em vermelho no Gráfico 1 a seguir.

Para efeito de comparação, foi incluído na Tabela 16 para melhor visualização e assim como no Gráfico 1 um valor médio da resistência mecânica de um traço de referência, em amarelo, de 2,20 MPa, conforme NETO *et al.* (2020), que não utiliza nenhuma substituição.

Gráfico 1 – Valores médios de resistência mecânica de tração na flexão com o valor referência



Fonte: Autor (2024).

Esses resultados mostraram que as substituições estudadas apresentaram desempenho satisfatório quando comparadas ao traço de referência. Os valores satisfatórios de resistência à tração na flexão foram confirmados conforme mostrado na Tabela 10 da norma NBR 13281/2023 – Parte 1, conforme Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Tabela 10 Resistência à Tração na Flexão da NBR 13281/2023 – Parte 1

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de ensaio
R1	$R_f \leq 1,5$	ABNT NBR 13279
R2	$0,5 \leq R_f < 1,5$	
R3	$1,5 \leq R_f < 3,0$	
R4	$R_f > 3,0$	

Fonte: NBR 13281/2023

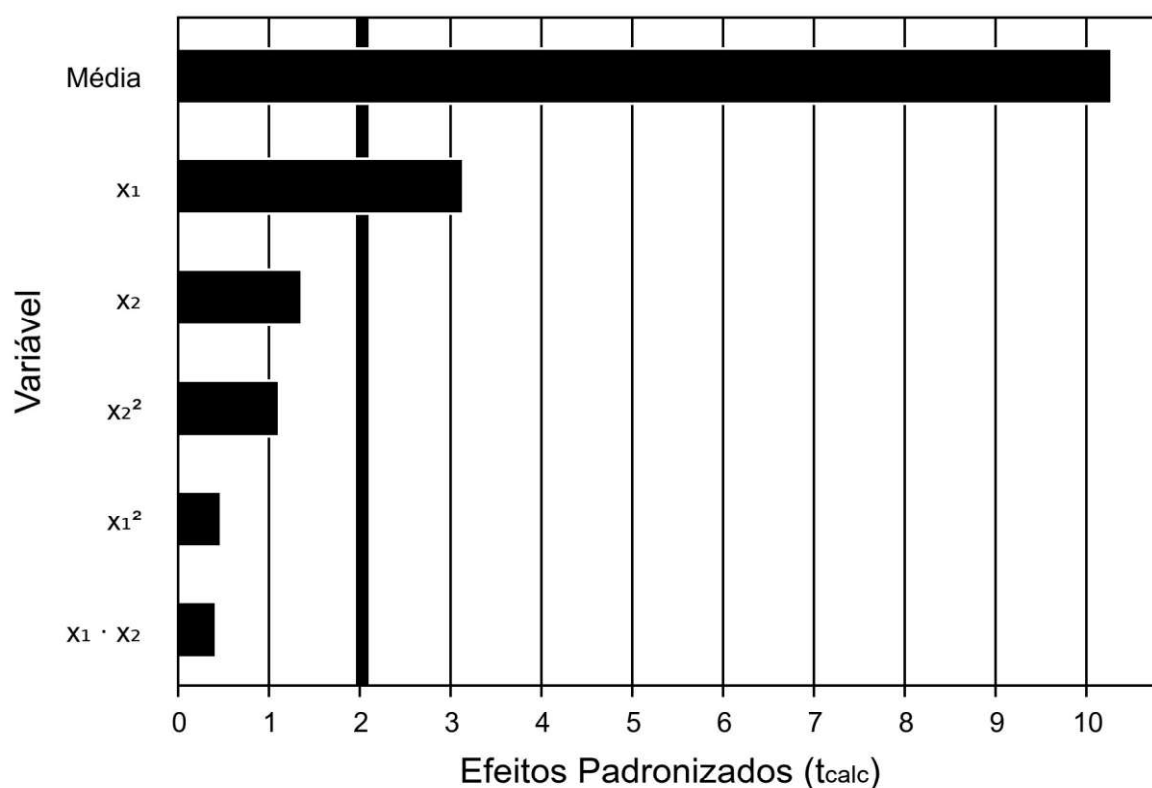
Sendo que a NBR 13281:2023 classifica as argamassas em quatro categorias, de R1 a R4, cada uma atendendo a diferentes níveis de resistência e aplicações específicas, com:

- R1: Argamassa destinada a aplicações com baixa exigência estrutural, apresentando uma resistência mínima à compressão de 2 MPa. É ideal para revestimentos internos onde a demanda mecânica é menor.

- R2: Voltada para aplicações de exigência moderada, essa argamassa tem uma resistência mínima à compressão de 4 MPa. É adequada tanto para revestimentos internos quanto externos, desde que não estejam sujeitos a condições climáticas extremas.
- R3: Projetada para aplicações de alta exigência, a argamassa R3 deve ter uma resistência mínima à compressão de 6 MPa. É recomendada para revestimentos externos que enfrentam condições climáticas adversas.
- R4: Para situações de máxima exigência, a argamassa R4 precisa apresentar uma resistência mínima à compressão de 10 MPa. É indicada para revestimentos em áreas altamente expostas e em edificações altas, onde a durabilidade e a robustez são cruciais.

Com base nos resultados obtidos e levando em conta as variáveis analisadas, conseguiu-se realizar uma análise estatística. Entre os valores coletados, o Diagrama de Pareto, ilustrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

Este diagrama, gerado a partir dos valores do planejamento fatorial, mostrou que as variáveis x_1 apresentou valor significativo e x_2 e x_2^2 não apresentaram valores significativos.

A Tabela 17 traz os coeficientes de regressão das variáveis que foi analisado. Também foi levado em conta como essas variáveis interagem entre si. Na tabela, destacou-se os efeitos que se mostraram significativos, garantindo que apenas os resultados mais confiáveis fossem evidenciados.

Tabela 17 – Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de tração na flexão

Fatores	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2,11	0,21	10,29	0,0001
X₁	-0,51	0,16	-3,13	0,0259
X₁²	0,12	0,25	0,48	0,6540
X₂	0,22	0,16	1,36	0,2329
X₂²	-0,28	0,25	-1,11	0,3157
X₁.X₂	-0,08	0,20	-0,41	0,6972

Fonte: Autor (2024).

Usando os coeficientes calculados a partir da matriz codificada, conseguiu-se criar um modelo ajustado que explica como a resistência mecânica à tração na flexão varia. Esse modelo considerou a quantidade de cinzas substituídas na mistura de argamassa convencional e o tempo de cura úmida em dias, conforme ilustrado na Equação 1.

$$Y^1 = 2,11 - 0,51 x^1 + 0,12 x^{12} + 0,22 x_2 - 0,28 x_2^2 - 0,08 x_1 x_2 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

x_1 = % de cinzas substituídas pela mistura tradicional de argamassa;

x_2 = tempo de cura úmida, em dias.

A Tabela 18 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) para a resistência mecânica de tração na flexão.

Tabela 18 – ANOVA, para o ensaio de tração na flexão

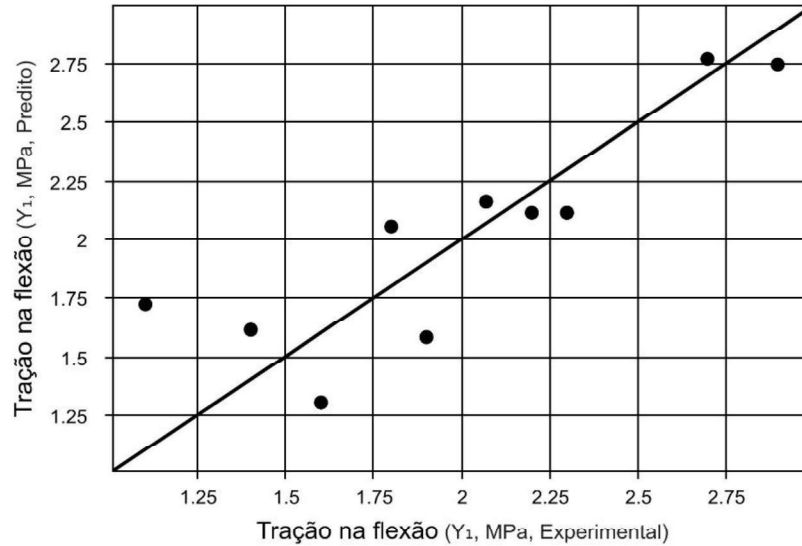
Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado	p-valor
Regressão	2,1	5	0,4	2,6	0,15712
Resíduos	0,8	5	0,2		
Falta de ajuste	0,8	3	0,3	79,4	0,01246
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	2,9	10			

$R^2 = 33,29\%$

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 10, pôde-se verificar a comparação entre os valores que foram medidos experimentalmente e aqueles que o modelo ajustado previu.

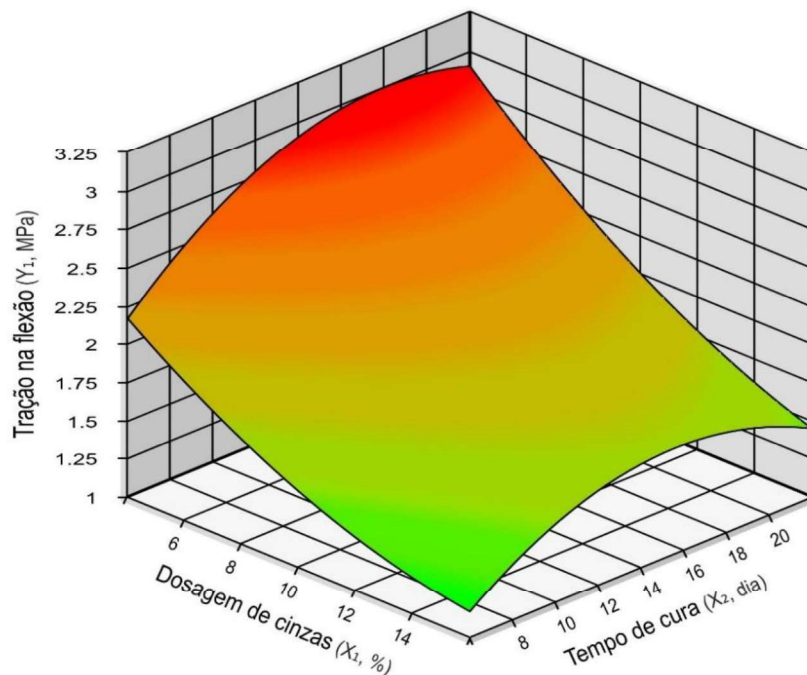
Figura 10 – Valores observados versus previstos, para o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

A Figura 10 mostrou como os valores previstos pelo modelo se compararam aos valores experimentais observados nos experimentos realizados. Esse resultado levou à criação do modelo de superfície ilustrados na Figura 11.

Figura 11 – Superfície de resposta para o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

5.3.2 Ensaio de resistência mecânica: compressão

Os resultados do planejamento do Delineamento de Faces Centradas (DFC) para a resistência mecânica à compressão na flexão estão na Tabela 19. Esses resultados oferecem uma visão de como diferentes combinações de variáveis impactam o desempenho das argamassas.

Tabela 19 – Resultados dos valores médios obtidos através dos ensaios de compressão

Ordem dos experimentos	Fatores		Resposta	Média da resistência à compressão, em MPa
	% de cinzas substituídas pela mistura (x ₁)	Tempo de cura úmida, em dia (x ₂)	Resistência à compressão, em MPa (y ₁)	
1	5	7	7,70	5,12*
2	15	7	4,80	
3	5	21	10,14	
4	15	21	4,90	
5	5	14	7,70	
6	15	14	4,21	
7	10	7	5,51	
8	10	21	4,45	
9	10	14	8,00	
10	10	14	7,85	
11	10	14	7,70	

* Média da resistência à compressão, em MPa, do traço testemunha (sem cinzas), aos 14 dias

Fonte: Autor (2024).

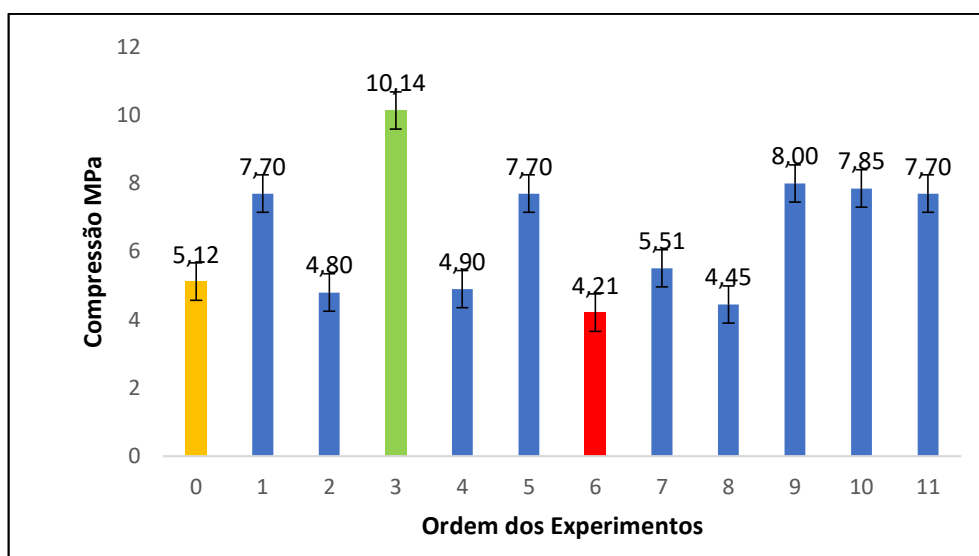
Ao verificar a Tabela 19, pôde-se ver como a quantidade de cinzas substituindo o cimento e o tempo de cura úmida afetaram a resistência das amostras de argamassa. O ensaio 03 foi o que mais se destacou, alcançando uma resistência mecânica à compressão de 10,14 MPa com 5% de substituição de cinzas pela mistura da argamassa tradicional após 21 dias de cura úmida, sendo em verde no Gráfico 3 a seguir.

Em contrapartida, o ensaio 6 teve a menor resistência, com 4,21 MPa, quando 15% da mistura tradicional de argamassa foi substituída por cinzas no mesmo período de cura, em vermelho no Gráfico 3 a seguir.

Para fins de comparação, incluiu-se na Tabela 19 o valor médio da resistência mecânica à compressão de argamassa de referência, destacando uma resistência, em amarelo, de 5,12 MPa, conforme o estudo de Neto *et al.* (2020) assim como no Gráfico 3 a seguir.

Esse traço de referência não utiliza nenhuma substituição de cinzas pela mistura tradicional de argamassa, servindo como base para avaliar o impacto das diferentes porcentagens de substituição nas outras amostras.

Gráfico 3 – Valores médios de resistência mecânica de compressão com o valor referência



Fonte: Autor (2024).

Os resultados mostraram que as substituições estudadas se saíram bem em comparação com o traço de referência, totalizando 7 ensaios acima. Eles confirmaram que os valores de resistência à compressão estão dentro dos padrões aceitáveis, conforme mostra na Tabela 20, seguindo as diretrizes da norma NBR 13281/2005 Tabela 1 em que cada “P” vai depender das exigências de projeto.

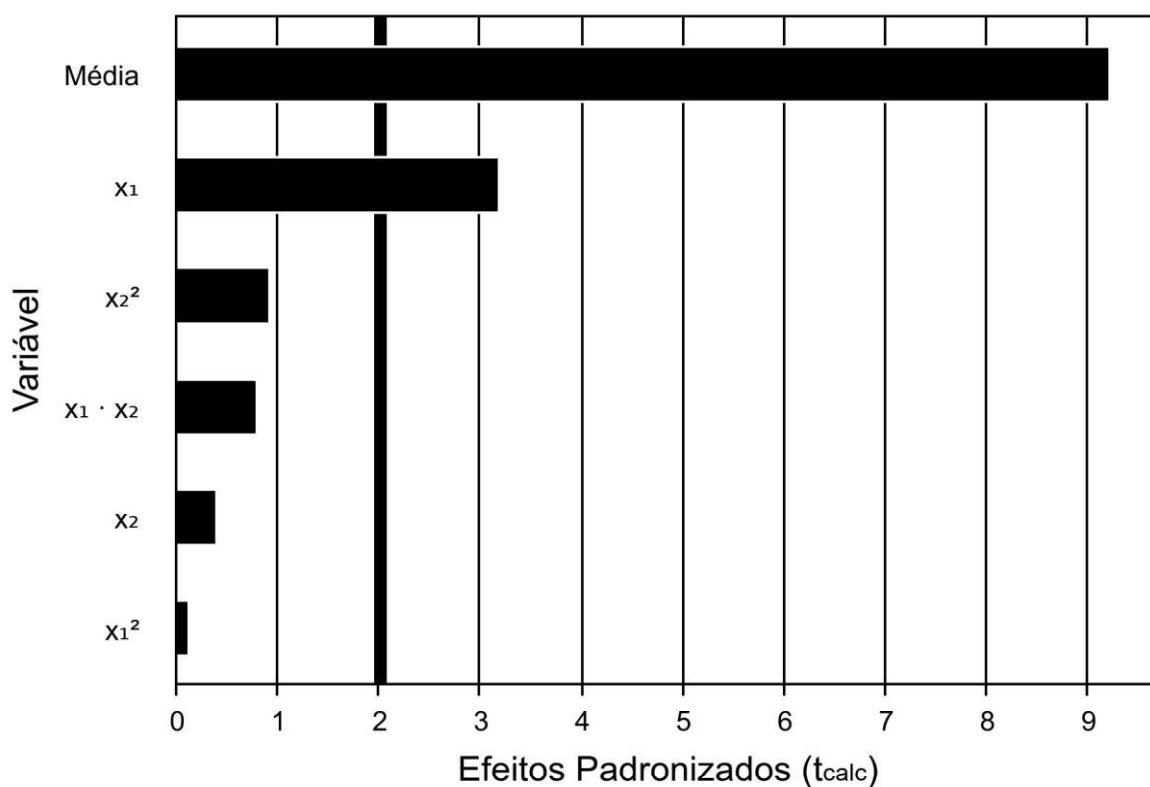
Tabela 20 - Tabela 1 da ABNT NBR 12281/2005

Classe	Resistência à compressão MPa	Método de ensaio
P1	$\leq 2,0$	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	$> 8,0$	

Fonte: ABNT NBR 12281/2005

Com os resultados obtidos e ao considerar as variáveis estudadas, conseguiu-se realizar uma análise estatística. Um dos destaques dessa análise foi o Diagrama de Pareto, que está representado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para o ensaio de compressão



Fonte: Autor (2024).

Esse diagrama revelou que as variáveis x_1 teve valor significativo e x_2 e x_2^2 não tiveram impacto significativo, conforme mostrado e gerado a partir do experimento fatorial.

Na Tabela 21 apresenta os coeficientes de regressão das variáveis estudadas, incluindo suas interações. Foi levado em consideração os efeitos que mostraram ser estatisticamente significativos, garantindo que apenas os resultados mais confiáveis fossem destacados.

Tabela 21 – Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC) para compressão

Fatores	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	7,05	0,76	9,23	0,0003
X₁	-1,94	0,61	-3,19	0,0243
X₁²	0,11	0,94	0,11	0,9150
X₂	0,25	0,61	0,41	0,7017
X₂²	-0,87	0,94	-0,93	0,3951
X₁.X₂	-0,58	0,74	-0,79	0,4676

Fonte: Autor (2024).

Com os coeficientes calculados a partir da matriz codificada, conseguiu-se criar um modelo ajustado que explica como a resistência mecânica à compressão varia. Esse modelo considerou a quantidade de cinzas substituídas da mistura de argamassa tradicional e o tempo de cura úmida em dias, como mostrado na Equação 2.

$$Y^1 = 7,05 - 1,94 x_1 + 0,11 x_1^2 + 0,25 x_2 - 0,87 x_2^2 - 0,58 x_1 x_2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

x_1 = % de cinzas substituídas pela mistura tradicional de argamassa;

x_2 = tempo de cura úmida, em dias.

A Tabela 22 apresenta a Análise de Variância (ANOVA) para a resistência mecânica à compressão.

Tabela 22 – ANOVA, para o ensaio de compressão

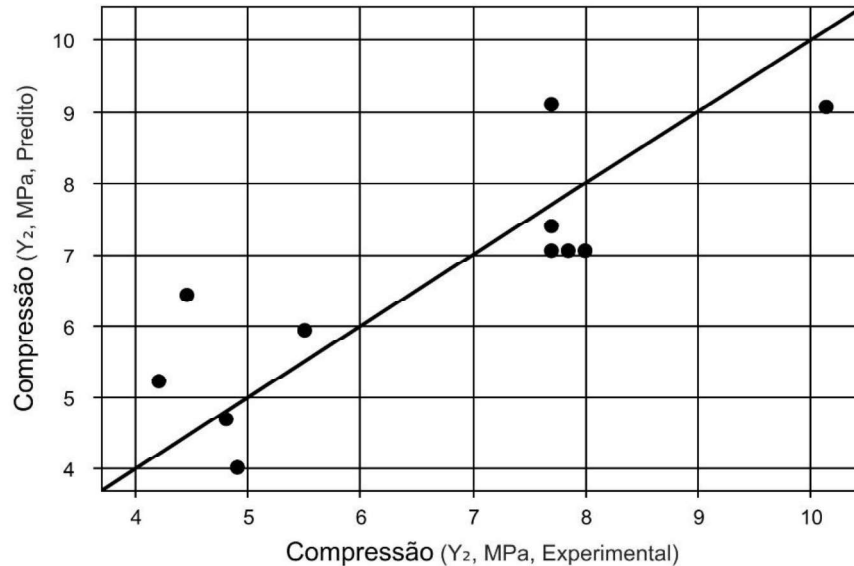
Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado	p-valor
Regressão	26,2	5	5,2	2,4	0,18311
Resíduos	11,1	5	2,2		
Falta de ajuste	11,0	3	3,7	163,6	0,00608
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	37,3	10			

$R^2 = 48,03\%$

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 12 a seguir, pôde-se ver a comparação entre os valores que foram medidos experimentalmente e aqueles previstos pelo modelo que foi ajustado.

Figura 12 – Valores observados versus previstos, para o ensaio de compressão

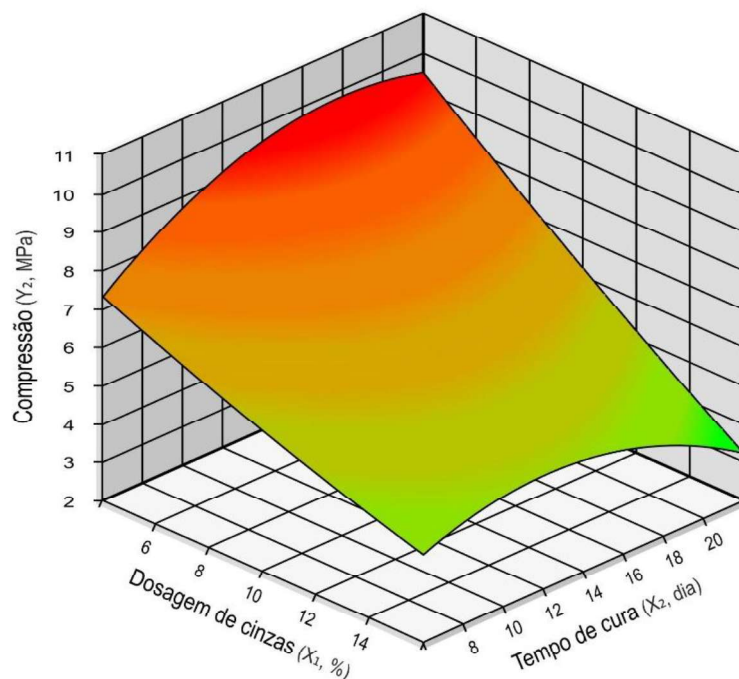


Fonte: Autor (2024).

A Figura 12 mostrou como os valores previstos pelo modelo se compararam aos valores experimentais observados nos experimentos realizados.

Esse resultado levou à criação do modelo de superfície ilustrados na Figura 13.

Figura 13 – Superfície de resposta para o ensaio de compressão



Fonte: Autor (2024).

5.3.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade e coeficiente de absorção

No ensaio de absorção de água por capilaridade realizado aos 28 dias, os resultados proporcionaram uma análise da capacidade da argamassa em absorver umidade através de seus poros. A Tabela 23 a seguir mostra os resultados obtidos desse ensaio de absorção de água por capilaridade e o coeficiente de absorção, aos 28 dias.

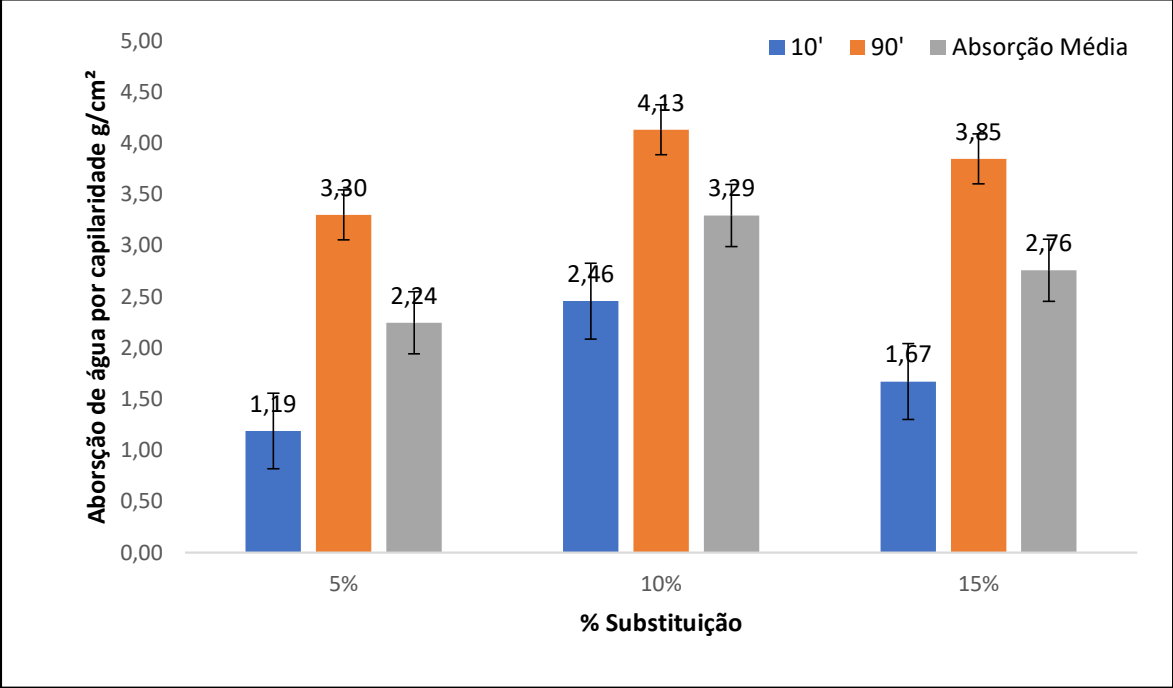
Tabela 23 – Valores médios da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade aos 28 dias.

Substituição	Absorção aos 10'	Absorção aos 90'	Coef. Absorção
	g/cm ²	g/cm ²	
5%	1,19	3,30	33,80
10%	2,46	4,13	26,80
15%	1,67	3,85	34,80

Fonte: Autor (2024).

Para tornar os resultados mais claros e de melhor visualização, foi criado dois gráficos de colunas que mostra a absorção de água por capilaridade, representado pelo Gráfico 5, e o coeficiente de absorção das argamassas analisadas, pelo Gráfico 6, a seguir.

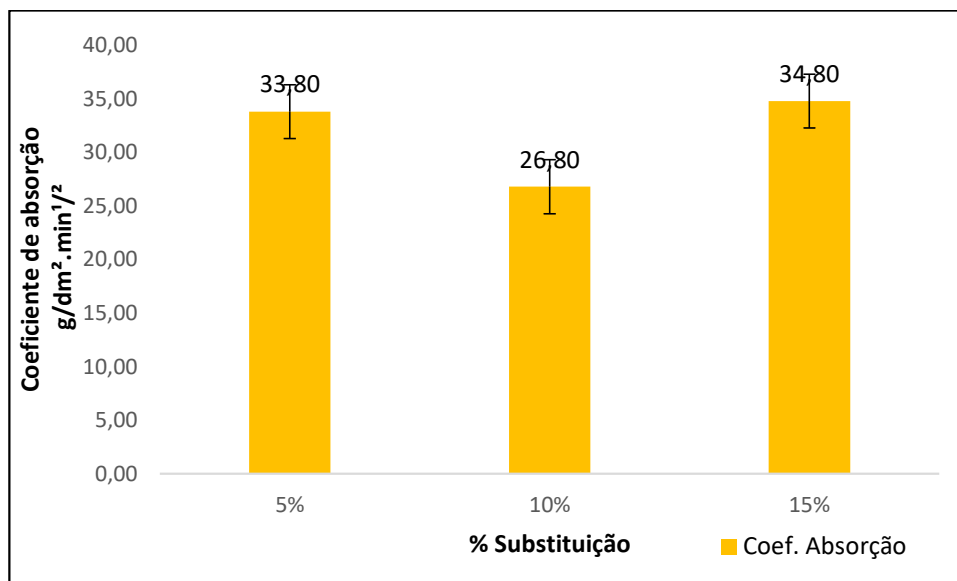
Gráfico 5 – Valores médios de absorção de água por capilaridade



Fonte: Autor (2024).

Notou-se que a maior absorção de água foi identificada no ensaio com 10% de substituição de cinzas pela mistura tradicional de argamassa aos 28 dias de cura úmida, tendo como resultado de 3,29 g/cm², e a menor porcentagem de absorção de água no ensaio de 5% de substituição de cinzas pela mistura aos 28 dias de cura úmida, tendo de resultado 2,24%.

Gráfico 6 – Valores médios de coeficiente de absorção de água



Fonte: Autor (2024).

No coeficiente de absorção de água, conforme Gráfico 6, observou-se que o maior valor foi identificado no ensaio com 15% de substituição de cinzas na mistura tradicional de argamassa após 28 dias de cura úmida, alcançando 34,80 g/dm².min¹/². Isso sugeriu que uma maior proporção de cinzas aumentava a capacidade da argamassa de absorver água rapidamente.

Por outro lado, o menor coeficiente de absorção foi encontrado no ensaio com 10% de substituição de cinzas, também após 28 dias de cura úmida, com um resultado de 26,80 g/dm².min¹/². Esses resultados foram relevantes para a construção civil, pois ajudaram a compreender como diferentes proporções de cinzas afetavam a durabilidade e a resistência das argamassas.

5.3.4 Discussão dos resultados

Para dar fidelidade aos resultados deste presente trabalho, foi feita uma comparação com outros estudos que exploraram alternativas semelhantes, como o uso de cinza da casca de arroz, resíduos de construção e demolição, e cinza da casca de coco verde, mostrando que há um caminho promissor para unir sustentabilidade e eficiência na construção civil.

O estudo do Mourão *et al.* (2024) teve como objetivo entender como as argamassas reagiram fisicamente e mecanicamente ao substituir parte do cimento pela sílica da cinza da casca de arroz. Foram testadas argamassas com 0%, 5%, 10% e 15% de substituição e, ao longo de 28 dias, realizou-se ensaios de compressão e absorção para verificar o desempenho dos materiais.

O trabalho do Matos *et al.* (2017) teve como principal foco avaliar o impacto da cinza da casca de coco verde nas argamassas, tanto enquanto elas ainda estavam frescas quanto depois de endurecidas. Para isso, substituímos parcialmente o cimento Portland pela cinza nos teores de 5% (5%CCCV), 10% (10%CCCV) e 15% (15% CCCV) e observou-se como essa troca influenciou as propriedades das argamassas.

A pesquisa da Schiller (2021) buscou analisar o potencial de dois tipos de resíduos da construção civil como substitutos parciais do cimento em argamassas de revestimento, considerando o desempenho físico e mecânico dessas misturas. Esses resíduos foram coletados em diferentes partes da cidade de Pelotas/RS, um vindo da demolição de um prédio industrial e outro de uma fábrica de artefatos cimentícios. Para os testes, utilizamos uma proporção base de cimento, cal e areia (1:2:8), substituindo parte do cimento por resíduos nas proporções de 5%, 10% e 15%.

O trabalho do Santos *et al.* (2019) investigou o efeito de substituir parte do cimento por rejeitos de cinza de silício nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Em laboratório, testamos misturas em que 5%, 10% e 15% do cimento foram substituídos por rejeitos de silício para produzir argamassa colante, avaliando como essa alteração influenciou o desempenho do material.

Comparando os resultados obtidos desta pesquisa com os resultados dos ensaios de outros trabalhos, pode-se fazer algumas considerações importantes sobre o comportamento das argamassas que contêm cinzas e como elas se comparam às argamassas tradicionais, conforme Tabelas 24, 25 e 26 a seguir.

Tabela 24 – Resistência à Compressão – outros trabalhos

SANTOS <i>et al</i> (2019)	28 dias	SCHILLER (2021)	7 dias	28 dias	SCHILLER (2021)	7 dias	28 dias
Dosagem	Média (MPa)	Dosagem	Média (MPa)	Média (MPa)	Dosagem	Média (MPa)	Média (MPa)
AR	13,6	REF	1,92	6,16	REF	1,92	6,16
AR5	13,33	RIPM 5%	1,76	5,61	RCD 5%	1,62	6,25
AR10	18,74	RIPM 10%	1,81	5,35	RCD 10%	1,52	5,09
AR15	16,69	RIPM 15%	1,67	5,18	RCD 15%	1,52	5,09

Fonte: Autor (2024).

Nos dados obtidos neste trabalho, o ensaio com 5% de cinzas após 21 dias de cura obteve 10,78 MPa, o que é considerado promissor. Conforme Tabela 24, comparando com os resultados de outros trabalhos semelhantes como Santos *et al* (2019), o mesmo percentual de cinzas alcançou 13,33 MPa após 28 dias.

Quando observa-se para o ensaio com 15% de cinzas, o presente trabalho apontou uma resistência de 3,68 MPa após 14 dias de cura, sendo o valor mais baixo observado. No entanto, com os resultados de outros trabalhos semelhantes como Schiller (2021), esse mesmo teor de cinzas atingiu 5,09 MPa após 28 dias.

Tabela 25 – Resistência à Tração na Flexão – outros trabalhos

28 dias	MATOS <i>et al.</i> (2017)	28 dias	SANTOS <i>et al</i> (2019)	28 dias	SCHILLER (2021)	28 dias	SCHILLER (2021)
Dosagem	Média (MPa)	Dosagem	Média (MPa)	Dosagem	Média (MPa)	Dosagem	Média (MPa)
0%SP 0%	7,3	AR	2,11	REF	2,23	REF	2,23
10%SP 0,30%	6	AR10	1,18	RIPM 10%	3,95	RCD 10%	3,61
15%SP 0,45%	4	AR15	0,75	RIPM 15%	3,95	RCD 15%	2,58

Fonte: Autor (2024).

No presente trabalho, o ensaio com 10% de cinzas apresentou uma resistência de 2,87 MPa após 14 dias de cura. Conforme Tabela 25, nos dados de outros trabalhos semelhantes como Schiller (2021), o valor para o mesmo teor de cinzas foi superior, chegando a 3,95 MPa após 28 dias.

Por outro lado, o ensaio com 15% de cinzas, que mostrou o menor valor neste trabalho com 0,93 MPa, alcançou 0,75 MPa nos resultados do Santos *et al* (2019) após um período de cura mais longo.

Tabela 26 – Absorção de Água por Capilaridade – outros trabalhos

28 dias	MOURÃO <i>et al</i> (2024)	28 dias	MATOS <i>et al.</i> (2017)	72 horas	SCHILLER (2021)	72 horas	SCHILLER (2021)
Dosagem	(%)	Dosagem	(%)	Dosagem	Média (g/cm ²)	Dosagem	Média (g/cm ²)
REF	9,41	0%SP 0%	100	REF	2,55	REF	2,55
SCA 5%	10,04	5%SP 0,15%	109,56	RIPM 5%	2,6	RCD 5%	2,66
SCA 10%	10,17	10%SP 0,30%	117,57	RIPM 10%	2,6	RCD 10%	2,62
SCA 15%	10,05	15%SP 0,45%	127,31	RIPM 15%	2,6	RCD 15%	2,65

Fonte: Autor (2024).

Em relação à absorção de água, neste trabalho a maior absorção foi observada no ensaio com 10% de cinzas, resultando em 3,29 g/cm² após 28 dias. De acordo com a Tabela 26, os dados de outros trabalhos como Mourão *et al.* (2024), a absorção com o mesmo teor de cinzas foi de 10,17%.

Os resultados indicam que um maior teor de cinzas aumenta a absorção de água, possivelmente devido à maior porosidade da mistura. Já no ensaio com 5% de cinzas, o presente trabalho mostra a menor absorção, com 2,24%, enquanto em outros trabalhos como Mourão *et al.* (2024) esse valor foi de 10,04%.

Embora haja uma diferença nos números, os dois resultados sugerem que o uso de menos cinzas reduz a absorção de água, o que pode ser um ponto positivo para melhorar a durabilidade da argamassa.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa teve como finalidade analisar como a argamassa se comporta quando se substitui parte da mistura tradicional por cinzas provenientes da queima de biomassa da indústria cerâmica. Em termos práticos, entendeu-se que tanto a absorção de água por capilaridade quanto a resistência mecânica, como a tração na flexão e a compressão, podem influenciar no desempenho dessas novas argamassas.

Nos testes de caracterização dos materiais, incluindo as cinzas, os resultados foram promissores. A massa específica das cinzas mostrou ser compatível com outros agregados, como também o pH alcalino de 11,41 que ajuda a evitar a deterioração do composto cimentício. A densidade aparente de 0,612 g/cm³ indicou uma relação direta com a porosidade da argamassa quando endurecida. O teor de umidade de 2,33% revelou a quantidade de água absorvida do ambiente, indicando ajustes necessários na formulação da argamassa.

Assim como, a análise de difração de raios X (DRX) e espectrometria ICP-OES da amostra revelou a presença de várias fases cristalinas, como quartzo ou silicatos de cálcio, sugerindo boa capacidade de cimentação e potencial reativo, especialmente com aluminatos e fases relacionadas às cinzas. A composição química indicou concentrações significativas de alumínio (6157,61 ppm), cálcio (31,63%), silício (2,40%) e ferro (5678,72 ppm), elementos essenciais para o aumento da resistência e durabilidade da argamassa, com destaque para o cálcio e o silício no processo de endurecimento e formação de silicato de cálcio hidratado.

Os ensaios de resistência mostraram que as argamassas com cinzas apresentaram um comportamento semelhante às tradicionais. A resistência à tração na flexão foi bastante positiva no ensaio 5, com 5% de cinzas, que após 14 dias de cura úmida alcançou uma resistência média de 2,90 MPa. Em contraste, o ensaio 6, com 15% de cinzas, mostrou a menor resistência, com 1,10 MPa.

Na resistência à compressão, o ensaio 3, com 5% de cinzas após 21 dias de cura úmida, alcançou uma resistência de 10,14 MPa, o que é um resultado animador. Por outro lado, o menor valor foi encontrado no ensaio 6, com 15% de cinzas substituídas pela mistura tradicional aos 14 dias de cura úmida, de 4,21 MPa.

Quanto à absorção de água por capilaridade, a maior absorção foi observada no ensaio com 10% de cinzas após 28 dias de cura úmida, com 3,29 g/cm². A menor absorção foi no ensaio com 5% de cinzas, com 2,24%. No coeficiente de absorção, o maior valor foi identificado no ensaio com 15% de substituição de cinzas na argamassa, após 28 dias de cura úmida, alcançando 34,80 g/dm².min^{1/2}. Isso sugeriu que uma maior proporção de cinzas

aumentava a absorção de água devido a maior porosidade. Por outro lado, o menor coeficiente foi encontrado com 10% de substituição de cinzas, também após 28 dias de cura úmida, resultando em $26,80 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

O uso de cinzas de madeira, especialmente do eucalipto, como substituição parcial na mistura tradicional de argamassa mostrou resultados promissores. Além de atender aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas, os ensaios realizados confirmaram que a inclusão das cinzas não comprometeu a integridade estrutural da argamassa. Pelo contrário, essa abordagem se destacou reduzindo o consumo de não só do cimento, mas dos outros materiais constituintes da argamassa tradicional e aproveitando resíduos que, de outra forma, seriam descartados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16 – Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 22 – Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24 – Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 25 – Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30 – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 – Agregados: Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 – Agregados - Especificação.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7213 – Agregados leves.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578. Cimento Portland Composto – Requisitos.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653. Materiais pozolânicos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13277 – determinação da retenção de água em argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280 – determinação da densidade de massa aparente de argamassa para assentamento e revestimento de paredes.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281 – Prescreve o método para a determinação da resistência de aderência à tração de revestimento de argamassa aplicados em obra ou laboratório.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259 – determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade de argamassa para**

assentamento e revestimento de paredes e tetos, no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605 – Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Portland Cement.** C150/ C150M, ASTM, Pennsylvania, 2018. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

AMORIM, Vanessa da Silva Santos de et al. **Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura.** *Research, Society and Development*, v. 10, n. 11, e318101119604, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19604>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

ANICER. **Dados oficiais.** Disponível em: < <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/> >. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

ARAÚJO, Antonio Rodolfo; GALVÃO, Marcela Squires. Panorama da indústria cerâmica focado na sustentabilidade: um estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte, MG. Anais... Belo Horizonte: ABEPRO, 2011. p. 143-153. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STP_143_904_17735.pdf. Acesso em: 08 de novembro de 2023.

AYOBAMI, A. B. **Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview. Resources, Conservation and Recycling, Sacramento**, v. 166, n. December 2020, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105351>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

BERGER, F.; GAUVIN, F.; BROUWERS, H. J. H. The recycling potential of wood waste into woodwool/cement composite. *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 260, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119786>. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

BIOMASSABR. **O que é Biomassa - Saiba mais sobre Biomassa a energia do presente brasileiro e mundial.** Disponível em: < <http://www.biomassabr.com/bio/biomassabr.asp> >. Acesso em: 20 de novembro de 202.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). **European Commission**, (1996). Acesso em: 16 de novembro de 2023.

CARASEK, Helena et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 21, n. 3, p.714-732, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160003.0068>. Acesso em: 17 de novembro de 2023.

DEMIS, S.; TAPALI, J. G.; PAPADAKIS, V. G. An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 291–300, out. 2014.

ECYCLE. **Reflorestamento**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/reflorestamento/> . Acesso em: 12 de novembro de 2023.

EMBRAPA. Escolha do material genético: finalidade da produção de madeira. Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto/pre-producao/escolha-do-material-genetico/finalidade-da-producao/madeira> . Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: O caso dos pellets de madeira.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016. Acesso em: 9 de novembro de 2023.

FELLIPE, C. A. C. M. *Título da dissertação*. Ano. Dissertação (Mestrado em [área de concentração]) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [Cidade], [Ano]. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/14842/1/FellipeCACM_DISSERT.pdf. Acesso em: 7 de outubro de 2024.

FUNDACER. Fundação Nacional da Cerâmica. Sustentabilidade. Disponível em: < <http://fundacer.org.br/sustentabilidade-2/> >. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde07072003-160408/pt-br.php>. Acesso em: 02 de novembro de 2023.

HANSTED, A. L. S.; HANSTED, F. A. S.; TOMELERI, J. O. P.; CACURO, T. A.; SETTE JR., C. R.; YAMAJI, F. M.; COSTA, V. E. **Biomass in an industrial boiler: characterizing and reducing waste from the burning process.** *Research, Society and Development, Vargem Grande Paulista*. v. 11, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31948> . Acesso em: 12 de novembro de 2023.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual Industria Brasileira de árvores, Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 03 de novembro de 2023.

JAPAN INDUSTRIAL STANDARD. JIS K 1474: **Test methods for activated carbon.** *Minato-ku, Tokyo*. Japanese Standards Association, 2014.

JÚNIOR, Paulo da Silva Miranda. **Avaliação da absorção de água por imersão e da permeabilidade em argamassa reciclada.** 2011. Defesa de trabalho, Universidade Federal de Feira de Santana, Brasil. Acesso em: 24 de novembro de 2023.

LOPES, G. DE A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. DE. **Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de são paulo.** *Ciência Florestal*, v. 26, n. 2, Acesso em: 18 de novembro de 2023.

MADANI HOSSEINI, M.; SHAO, Y.; WHALEN, J. K. **Biocement production from silicon-rich plant residues: Perspectives and future potential in Canada.** *Biosystems Engineering*, v. 110, n. 4, p. 351-362, 1 dez. 2011.

MADEIRA. **Madeira de Reflorestamento.** Disponível em: <https://chaledemadeira.com/madeiras/madeira-de-reflorestamento/> . Acesso em: 06 de novembro de 2023.

MASILAMANI, D. et al. Sustainable packaging materials from tannery trimming solid waste: A new paradigm in wealth from waste approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, out. 2017. Acesso em: 26 de novembro de 2023.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: HEWLETT, P. C. 4. ed. **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. New York: J. Wiley, 1998. Acesso em: 3 de novembro de 2023.

MATOS, Samile; GUIMARÃES, Cleidson. **Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas.** *Revista Eletrônica de Engenharia Civil, Goiás*, v. 13, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41675> >. Acesso em 9 de novembro de 2023.

MELO, Thais Felipe de. **Gestão de resíduos sólidos: um estudo sobre grupos de influência no município de Piracicaba - SP**. 2012. 186 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Acesso em: 28 de novembro de 2023.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. **Materials Today: Proceedings, Kidlington**, v. 48, p. 741–746, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785321012943>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

NETO, Celso; FERREIRA, Leonardo; CARNEIRO, Victor; BÔSSO, Antônio; CARVALHO, Adriano. INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Cap. 28 Argamassas**. São Paulo, 2017. ISBN 978-85-98576-27-5

NEVES, Idércio França Das. Materiais de construção: **Estudo de dosagem racional de concreto estrutural comum**. Pontifícia universidade católica do Paraná – CuritibaPR. 2009. Acesso em: 22 de novembro de 2023.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto – 5 a Edição**. [s.l.] Bookman Editora, 2015. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38). Acesso em: 1 de novembro de 2023.

RAJAMMA, R.; SENFF, L.; RIBEIRO, M. J.; LABRINCHA, J. A.; BALL, R. J.; ALLEN, G. C.; FERREIRA, V. M. **Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement based materials**. Composites Part B: Engineering, Kidlington, v. 77, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836815001389>. Acesso em: 2 de novembro de 2023.

SALES, Caroline Pessoa. **Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana**. 2012. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

SANTOS, Gisele Souza dos; CARDOSO, Flávia Lima; SOUZA, Waléria Costa de. **A utilização de resíduos sólidos na construção civil: um estudo sobre a viabilidade do reaproveitamento de resíduos de gesso**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 12, n. 1, p. 47-57, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/41675/pdf>>. Acesso em: 4 out. 2024.

SANTOS, A. L. dos; LIMA, R. de A.; MENDONÇA, A. L. M. de. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de argamassas contendo cinzas de casca de arroz.** *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 2, n. 2, p. 175-182, 2017. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rct/article/view/5400/2775>. Acesso em: 7 de out. 2024.

SATA, V. et al. **Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix.** *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 1, p. 94–100, jan. 2012.

SCHILLER, A. P. S. **Avaliação do desempenho de argamassas com diferentes teores de cinzas como substituição parcial ao cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: https://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/8111/DISSERTACAO_ANA_PAULA_S_TURBELLE_SCHILLER.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 2 out. 2024.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 114, n. March, p. 2–26, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>. Acesso em: 22 jan. 2022.

SILVA, T. F. da. **Argamassas com Adição de Cinzas: Estudo Comparativo de Resistência e Absorção de Água.** *Revista Multidisciplinar Unipacto*, v. 7, n. 15, 2022. Disponível em: <http://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/2140/2547>. Acesso em: 2 out. 2024.

SIMIONI, F. J.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; DEBONI, T. L.; DOS PASSOS, B. M. **Cadeia produtiva de energia de biomassa florestal: O caso da lenha de eucalipto no polo produtivo de itapeva - SP.** *Ciencia Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 310–323, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000400321&lng=pt&tlng=pt. Acesso em 1 de novembro de 2023.

SNIC. **Consumo Mensal de Cimento 2020.** Rio de Janeiro, [s. n.], 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

STAFFORD, F. N.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production, Amsterdam**, v. 137, p. 1293–1299, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616309386>. Acesso em: 19 de novembro de 2023.

TOSTI, L.; VAN ZOMEREN, A.; PELS, J. R.; DAMGAARD, A.; COMANS, R. N. J. Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. **Journal of Cleaner Production, Amsterdam**, v. 245, 2020. Acesso em: 22 de novembro de 2023.

VASKE, N. R.. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto.** 2012. 325 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012. Acesso em: 24 de novembro de 2023.

WWF BRASIL. **Desmatamento na Amazônia: Extração de Madeira na Amazônia.** Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/amazonia/ameacas_riscos_amazonia/desmatamento_na_amazonia/extracao_de_madeira_na_amazonia/ . Acesso em: 12 de novembro de 2023.

YIN, C.; ROSENDAHL, L. A.; KÆR, S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. **Progress in Energy and Combustion Science, Oxford**, v. 34, n. 6, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128508000245>. Acesso em: 3 de novembro de 2023.