

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CELSO GARCIA DE FIGUEIREDO NETO

**ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS ENRIQUECIDAS COM CINZA
DE CARVÃO VEGETAL, EM BENEFÍCIO À SUSTENTABILIDADE**

PALMAS - TO

2021

CELSO GARCIA DE FIGUEIREDO NETO

**ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS ENRIQUECIDAS COM CINZA
DE CARVÃO VEGETAL, EM BENEFÍCIO À SUSTENTABILIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, como exigência parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Cláudia da Silva A. Rezende

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS - TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

N469a Neto, Celso Garcia de Figueiredo
 Análise física e mecânica de argamassas enriquecidas com cinza
 de carvão vegetal, em benefício à sustentabilidade / Celso Garcia de
 Figueiredo Neto. – Palmas, TO, 2021.
 56 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientadora: Dra. Cláudia da Silva A. Rezende
Coorientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Argamassa. 2. Cinza. 3. Sustentabilidade. I. Rezende, Cláudia
da Silva A.. II. Pedroza, Marcelo Mendes. III. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

CELSO GARCIA DE FIGUEIREDO NETO

**ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS ENRIQUECIDAS COM CINZAS
DE CARVÃO VEGETAL, EM BENEFÍCIO À SUSTENTABILIDADE**

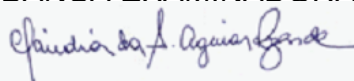
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas, como exigência parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Cláudia da Silva A. Rezende

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Aprovado em: 16/04/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Dra. Cláudia da Silva A. Rezende

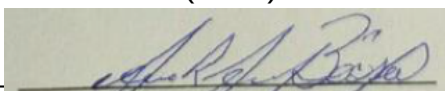
Orientadora

(IFTO)



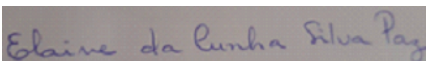
Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

(IFTO)



Prof. Dr. Antonio Rafael de Souza A. Bôso

(IFTO)



Prof^a. Me. Elaine da Cunha Silva Paz

(IFTO)

RESUMO

Com a busca de novos materiais para construção civil juntamente com a sustentabilidade, a biomassa empregada como fonte geradora de energia gera resíduos, que são as cinzas. Estas, no âmbito da construção civil, podem desenvolver uma grande oportunidade de novas substâncias, através da reutilização dos próprios resíduos gerados pela biomassa, para fabricação ou formulação de componentes construtivos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo o estudo físico e mecânico das argamassas de assentamento com adição de cinzas de alto forno como matéria prima provenientes da queima de podas de árvores para produção de carvão vegetal em substituição parcial do cimento *Portland*. Para a realização do trabalho, seguiu o *software Protimiza Experimental Design* seguindo o modelo de Delineamento de Faces Centradas (DFC) para análise de duas variáveis, considerando dois fatores: Fator 1: porcentagem de cinzas em substituição do cimento; Fator 2: tempo em dias necessários de cura úmida por imersão. Os materiais que compõem a argamassa passaram por caracterização física e química. O modelo experimental determina a quantidade de corpos-de-prova de argamassa prismático de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm a partir das proporções de cinzas substituídas pelo cimento, sendo 4%, 8% e 12% e o tempo em dias de cura úmida por imersão. Os resultados mostraram que as argamassas enriquecidas com cinzas apresentaram bom desempenho mecânico, sendo a resistência mecânica de tração na flexão de maior destaque, ao serem comparados com valores de referência. Tratando estatisticamente nos ensaios à compressão e absorção de água, não houve diferença significativa dos fatores, ou seja, os modelos estatísticos mostraram que tanto faz usar 4%, 8% ou 12% de cinzas e 7, 14 ou 21 dias. Desse modo, a utilização de cinzas em substituição parcial do cimento para a produção de argamassa mostrou-se vantajosa para a sustentabilidade, sendo uma nova alternativa de uso das cinzas ao invés de seu descarte inadequado.

Palavras-chave: Resíduos; Cinzas; Argamassa; Resistência; Sustentabilidade.

ABSTRACT

With the search for new materials for civil construction along with sustainability, the biomass used as an energy generating source generates waste, which are the ashes. These, in the field of civil construction, can develop a great opportunity for new substances, through the reuse of the waste generated by biomass, for the manufacture or formulation of construction components. In this context, the present work sees as objective the physical and mechanical study of laying mortars with the addition of high-oven ash as raw material from the burning of tree pruning for the production of charcoal in partial replacement of Portland cement. To perform the work, the *Software Proptimizes Experimental Design* followed the centered face design (CFD) model for analysis of two variables, considering two factors: Factor 1: percentage of ash in replacement of cement; Factor 2: time in required days of wet curing by immersion. The materials that make up the mortar have undergone physical and chemical characterization. The experimental model determines the amount of prismatic mortar specimens of dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm from the proportions of ash replaced by cement, being 4%, 8% and 12% and the time in wet curing days by immersion. The results showed that the mortars enriched with ash presented good mechanical performance, and the mechanical tensile strength in the bending was more prominent when compared with reference values. Dealing statistically in the tests for compression and water absorption, there was no significant difference in the factors, that is, the statistical models showed that it is either using 4%, 8% or 12% of ash and 7, 14 or 21 days. Thus, the use of ash in partial replacement of cement for mortar production proved to be advantageous for sustainability, being a new alternative for the use of ashes instead of its inadequate disposal.

Keywords: Waste; Ashes; Grout; Resistance; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de biomassa	15
Figura 2 - Fluxograma das atividades que foram desenvolvidas.....	23
Figura 3 - Planejamento experimental por Delineamento de Faces Centradas (FCD) ..	24
Figura 4 - Separação dos materiais: Traço de 4%	26
Figura 5 - Separação dos materiais: Traço de 8%	27
Figura 6 - Separação dos materiais: Traço de 12%	27
Figura 7 - Confeção dos corpos-de-prova	28
Figura 8 - Moldagem dos corpos-de-prova.....	28
Figura 9 - Desmoldagem dos corpos-de-prova	29
Figura 10 - Cura úmida por imersão	29
Figura 11 - Ensaio de pH no laboratório de análises de águas	32
Figura 12 - Ensaio de pH.....	32
Figura 13 – Ensaio de densidade aparente	33
Figura 14 – Ensaio de densidade aparente	34
Figura 15 - Cadinhos de porcelana.....	35
Figura 16 - Estufa.....	35
Figura 17 - Dessecador	36
Figura 18 - Ensaio de resistência mecânica de tração na flexão.....	37
Figura 19 - Ensaio de resistência mecânica de compressão.....	38
Figura 20 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de tração na flexão	41
Figura 21 - Valores observados versus previstos, para o ensaio de tração na flexão ..	43
Figura 22 - Superfície de resposta para o ensaio de tração na flexão, com os fatores 1 e 2	44
Figura 23 - Superfície plana de resposta para o ensaio de tração na flexão, com os fatores 1 e 2	44
Figura 24 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de compressão	46
Figura 25 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de absorção de água por imersão	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do cimento Portland CII - F.....	21
Tabela 2 - Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental.....	25
Tabela 3 - Ordem dos experimentos.....	25
Tabela 4 - Quantidade de corpos-de-prova de acordo com os fatores	25
Tabela 5 - Quantidade de materiais em gramas que foram separados	26
Tabela 6 - Caracterização dos materiais	31
Tabela 7 - Valores densidade aparente	34
Tabela 8 - Ensaio de teor de umidade	36
Tabela 9 - Resultados dos valores obtidos através dos ensaios de tração na flexão ...	40
Tabela 10 - Tabela 3 da ABNT NBR 12281/2005	40
Tabela 11 - Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de tração na flexão	41
Tabela 12 – ANOVA, para o ensaio de tração na flexão	42
Tabela 13 - Resultados dos valores obtidos através do ensaio de compressão.....	45
Tabela 14 - Tabela 1 da ABNT NBR 12281/2005	46
Tabela 15 - Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de compressão	47
Tabela 16 - Resultados dos valores obtidos através do ensaio de absorção de água por imersão	47
Tabela 17 - Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de absorção de água por imersão	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Problema de pesquisa	10
1.2. Justificativa	10
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo geral	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Resíduos	12
2.2. Classificação dos resíduos	12
2.3. Divisão dos resíduos	13
2.4. Resíduos agroindustriais ou industriais	14
2.5. Biomassa	14
2.6. Aditivos minerais	15
2.7. Reação pozolânica	16
2.8. Resíduos sólidos na produção de artefatos cimentícios	17
2.9. Argamassa	19
2.10. Aglomerante: cimento	20
2.11. <i>Protimiza Experimental Design</i> com duas variáveis	21
3. METODOLOGIA	23
3.1. Tipo de pesquisa	23
3.2. Planejamento experimental	24
3.3. Materiais e métodos	29
3.3.1. Caracterização física e química dos materiais	30
3.4. Ensaio mecânico de resistência	37
3.5. Ensaio de absorção de água	38
3.6. Análise dos dados	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1. Ensaio de resistência mecânica: tração na flexão	39
4.2. Ensaio de resistência mecânica: compressão	45
4.3. Ensaio de absorção de água por imersão	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Um dos componentes construtivos na construção civil é a argamassa, na qual é constituída por cimento, areia, água, aditivos e adições que pode ser moldável apresentando boa durabilidade, além de poder ser de diversas formas, como também de resistir mecanicamente aos esforços de cisalhamento e compressão. De acordo com Matos e Guimarães (2017), a argamassa é um material largamente utilizado na construção civil, em diferentes tipos e fases de obra. Sendo aplicada, principalmente, no levante de alvenaria, assentamento cerâmico, revestimento de paredes e tetos, contrapisos assentamento e reparos.

As adições podem ser oriundas de biomassas que geralmente são descartados no meio ambiente, como são os casos do bagaço da cana, capim elefante e a casca de arroz, dentre outros, que ao submeterem a alto forno, geram cinzas. Balaton, Gonçalves e Ferrer (2002) estudaram a incorporação de resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha e Menezes, Neves e Ferreira (2002) avaliaram a incorporação de resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos.

Essas cinzas podem ser utilizadas como pozolânicas na argamassa com a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio ($CA(OH)_2$) que é liberado durante o processo de hidratação do cimento, formando compostos estáveis de poder aglomerante (ABNT NBR 12653, 2012). A NBR 12653/2012 diz respeito aos materiais pozolânicos – requisitos, e com o potencial pozolânico, as cinzas vêm sendo estudadas na inserção nos sistemas construtivos que envolvem o cimento *Portland*, em substituição parcial deste (AGUIAR, 2006).

Existem várias formas de diminuir os lançamentos de gases na atmosfera, e uma dessas formas envolve diretamente a construção civil, que ajuda na redução da emissão de dióxido de carbono (CO_2). A razão das pesquisas em substituição parcial do cimento é devido à redução da produção e no consumo do próprio cimento, que geram agentes poluidores a qual impactam diretamente o meio ambiente, no momento de fabricação da matéria prima (clínquer). Segundo Sales (2012), a maneira mais simples da construção civil contribuir para a redução da emissão de CO_2 seria por meio da diminuição da quantidade de cimento utilizada.

A argamassa de revestimento ou assentamento tem como principal característica absorver pequenas deformações. Quando aplicadas como revestimento, as arga-

massas estão sujeitas a variações dimensionais, ocasionando o surgimento de fissuração, que pode ser decorrente da elasticidade, da retração térmica e das ações externas ao revestimento ou assentamento (CANOVA; BERGAMASCO; ANGELIS NETO, 2007). Neste contexto, o assunto se mostra importante, pois o uso desses resíduos como componentes da argamassa pode-se apresentar como um material alternativo na construção civil, contribuindo para a diminuição do consumo de recursos naturais e reduzindo os impactos ambientais.

1.1. Problema de pesquisa

Levando em consideração a oportunidade de aproveitamento das cinzas de alto forno provenientes da queima de podas de árvore do Cerrado na produção de carvão vegetal que hoje são descartados, questiona-se de que maneira esses resíduos provenientes de biomassas, em substituição parcial do cimento *Portland*, irão influenciar as propriedades física e mecânica em benefício a sustentabilidade, no caso a argamassa de assentamento?

1.2. Justificativa

O processo de descarte de cinzas gerado nas grandes empresas de produtos cerâmicos e agroindustriais faz com que tenha a necessidade de melhoria no que diz respeito à disposição final, que na maior parte não é controlada, o que pode ser um desperdício para a produção de novas tecnologias. Paralelo a isso, a indústria da construção civil vive um grande desafio que é possibilitar um desenvolvimento tecnológico de forma mais sustentável, principalmente por conta dos danos ambientais associados à produção do cimento *Portland* (MATOS, 2016).

A utilização desse resíduo da biomassa na construção civil como adição mineral em substituição parcial do cimento em 18% resultaria numa redução de 18% das emissões de CO₂ e que, se apenas 30% do cimento utilizado globalmente fosse substituído por materiais cimentantes suplementares, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) da produção de cimento poderiam ser revertidas (ALBERNAZ *et al.*, 2019; DEMIS; TAPALIS; PAPADAKIS, 2014). As adições minerais são geralmente compostas por minerais silicosos ou alumino-silicosos que promovem melhorias das propriedades físicas e mecânicas de concretos de cimento *Portland* (SALES, 2012).

Com as novas possibilidades de resíduos oriundas de biomassas, eles vêm ganhando mais espaço em pesquisas científicas e aplicações em escalas diferentes, como o caso das cinzas da casca de arroz, bagaço de cana, resíduos urbanos e outros (ALBERNAZ *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 1996; ROJAS e FRÍAS, 1999; PAYÁ *et al.*, 2002; COIMBRA *et al.*, 2002; SATA *et al.*, 2012).

A maioria de cinzas provenientes de biomassa podem ter em suas composições a ação pozolânica, que ao ser inserida como matéria-prima, são denominados de adições minerais. No caso do presente trabalho, pela substituição parcial de materiais de menores impactos ambientais, como o incremento das cinzas, em argamassa para assentamento, provenientes de podas de árvore na produção de carvão vegetal em alto forno, em benefício a sustentabilidade. Corroborando a essa tendência, a demanda por cimento é grande e crescente no Brasil e em alguns países, como China e Índia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo analisar as propriedades física e mecânica das argamassas de assentamento a partir de um planejamento experimental ao incorporar as cinzas de alto forno como matéria prima provenientes da queima de podas de árvores para produção de carvão vegetal em substituição parcial do cimento *Portland*, em benefício a sustentabilidade.

1.3.2. Objetivos específicos

- Retratar as propriedades físico-químicas das cinzas de biomassa;
- Estudo do efeito de duas variáveis sendo a porcentagem de cinzas em substituição parcial do cimento e o tempo em dias necessários de cura úmida por imersão para a produção de argamassa;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa no estado endurecido;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Resíduos

O ramo das atividades industriais vem crescendo rapidamente no mundo todo. Esse crescimento faz com que a poluição ambiental se alastre, causando verdadeiros impactos na qualidade de vida das pessoas e principalmente no ambiente. Neste contexto, pode-se definir como poluição qualquer alteração física, química ou biológica que produza modificação no ciclo biológico normal, interferindo na composição da fauna e da flora do meio (LUCAS; BENATTI *et al.*, 2008; AGUIAR; NOVAES; GUARINO, 2002).

Entre as diversas formas de poluição ambiental está a poluição por resíduos industriais, em que se apresentam graves problemas socioeconômicos e ambientais. Envolvem-se nesse problema a geração, o acondicionamento, o manuseio, a coleta, o transporte, o tratamento e a disposição final (LUCAS; BENATTI *et al.*, 2008; JACOMINO *et al.*, 2002).

A produção de resíduos sólidos pode indicar a ineficiência do processo produtivo, representando, quase sempre, perdas de matérias-primas e insumos (LUCAS; BENATTI *et al.*, 2008; JACOMINO *et al.*, 2002). No entanto, a geração de resíduos sólidos na atividade industrial não se restringe às etapas do processo produtivo, nas quais ocorrem descartes de subprodutos que não possuem valor econômico. Nessas atividades, os sistemas de tratamento de águas residuárias e emissões atmosféricas são importantes geradores de resíduos sólidos (LUCAS; BENATTI *et al.*, 2008; OLIVEIRA; LANGE, 2005).

2.2. Classificação dos resíduos

Os resíduos são gerados em todos os momentos das atividades humanas, de todos os efeitos causados por eles, podemos destacar um deles, sendo uma grande qualidade de emissão de gases do efeito estufa (ALBERNAZ *et al.*, 2019; MASILAMANI *et al.*, 2017).

Em relação à NBR 10.004 (ABNT, 2004):

“resíduos sólidos: resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de

serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Nos últimos anos, o resíduo vem deixando de ser uma sobra indiferenciada para se tornar matéria-prima, demonstrando uma mudança no modo de ver e tratar os resíduos. O que antes era simplesmente chamado de “lixo” e descartado, passa a ser diferenciado e, portanto classificado e tratado de acordo com suas especificações: os resíduos podem ser reinseridos na cadeia produtiva (MELO *et al.*, 2012; SUDAN *et al.*, p.29; GRIMBERG, 2004).

2.3. Divisão dos resíduos

Seguindo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos, mais especificamente os sólidos, são divididos a partir dos riscos com potencial ao meio ambiente e também à saúde pública conhecidos.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004):

“A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido”.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem (ABNT, 2004). Continuando com os efeitos dessa Norma citada, os resíduos são classificados em resíduos classe I (perigosos); resíduos classe II (não perigosos) que são subdivididos em classe IIA (não inertes) e classe IIB (inertes).

2.4. Resíduos agroindustriais ou industriais

Os resíduos agroindustriais (RAI) são provenientes de atividades como agricultura, indústrias têxteis, de papel, automobilísticas e de beneficiamento de metais e, devido à geração concentrada sua reutilização torna-se mais fácil (PEREIRA *et al.*, 2012; JOHN, 2000).

As atividades industriais, ao mesmo tempo que oferecem benefícios à população, através de seus inúmeros produtos produzidos, são também responsáveis pela exploração de recursos naturais e pela consequente geração de resíduos e rejeitos industriais que sobram da produção dos bens de consumo (BALDAN, 2015).

Vários problemas poderiam ser diminuídos com a reciclagem dos resíduos agroindustriais, como o impacto ambiental e os custos agregados das indústrias (CALDAS, 2016). O reaproveitamento de resíduos aparece nos dias atuais como questão fundamental na melhoria do ambiente, tanto na redução do desperdício de recursos naturais, quanto na minimização dos impactos ambientais gerados pela disposição final desses resíduos (CALDAS, *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2000).

O progressivo desenvolvimento industrial, a inquietação ambiental com a gestão dos resíduos gerados, a fiscalização por parte das agências ambientais e a concorrência cada vez maior no mercado através das certificações, fazem com que os estudos para utilização dos resíduos industriais sejam mais intensificados (ANDRADE, 2016).

2.5. Biomassa

Define-se como biomassa toda e qualquer matéria orgânica que é empregada para produção e geração de energia. Alguns pontos positivos podem ser citados em relação ao uso da biomassa na produção de energia que são o pequeno custo, o fato de ser renovável, permitir o reaproveitamento de resíduos e ser bem menos poluente que outras fontes de energia como o petróleo ou o carvão (BIOMASSABR, 2017).

O processo de renovação da biomassa ocorre a partir de um sistema chamado ciclo do carbono, que começa com a combustão da biomassa ou de seus derivados, provocando a liberação de dióxido de carbono na atmosfera (BIOMASSABR, 2017).

Figura 1 - Exemplos de biomassa

Fonte: Brasil Escola (2021).

A utilização da biomassa, desde que não seja de forma predatória, não altera a composição da atmosfera. A biomassa se destaca pela grande densidade energética e pela facilidade de armazenamento, conversão e transporte (ALBERNAZ *et al.* BIOMASSABR, 2017). Pode-se citar o bagaço da cana-de-açúcar, lenha (representou 40% da produção energética primária no Brasil), folhas e galhos de árvores, papelão, como as biomassas mais utilizadas ultimamente. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 1.

2.6. Aditivos minerais

Segundo a NBR 11172 (ABNT, 1990) o termo “adição” deve ser empregado para designar “produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características”. Pode-se dizer também, que as adições minerais quando empregadas conjuntamente com o cimento *Portland*, modificam as propriedades dos materiais cimentícios proporcionando um melhor desempenho tecnológico (CALDAS *et al.*, 2016; CORDEIRO, 2006).

Em alguns casos, pode haver redução dos custos de produção por conta da substituição de uma parcela de clínquer por materiais energeticamente menos nobres, uma vez que as adições minerais são obtidas, geralmente, a partir de resíduos industriais ou agroindustriais (CALDAS, 2016).

Além de benefícios tecnológicos e econômicos, do ponto de vista ambiental, a utilização de adições minerais é benéfica, pois pode reduzir os índices de poluição causados pelo descarte dos resíduos. Aliado a isso, o uso de adições minerais pode promover a preservação das jazidas de calcário e argila e a redução da emissão de CO₂ e outros gases intensificadores do efeito estufa (CO, CH₄, NO_x, NO₂ e SO₂), gerados durante a fabricação do cimento *Portland* (CALDAS et al., 2016; CORDEIRO, 2006).

Segundo a NBR 11.172 (ABNT, 1990), as adições minerais podem ser classificadas quanto a sua ação físico-química em três tipos: inertes, cimentantes e pozolânicas. As adições minerais do tipo inertes/fíler são materiais essencialmente finos e uniformes, cujas ações são puramente físicas e não possuem nenhuma atividade química, no sentido da produção de C-S-H. Essas adições promovem o efeito do empacotamento granulométrico e funcionam como ponto de nucleação para hidratação dos grãos de cimento. Quando presentes em pequena quantidade (normalmente menos que 15% da massa do cimento) proporcionam melhorias sobre as propriedades da massa como trabalhabilidade, massa específica, porosidade e exsudação e a tendência a fissuração (CALDAS et al., 2016; DAL MOLIN, 2005; NEVILLE, 1997; OLIVEIRA, 2000).

A NBR 11578 (ABNT, 1991) que trata do cimento *Portland* composto, estabelece que o teor de fíler incorporado deve variar de 6 a 10% da massa do cimento e que um material carbonático ou fíler deve ter no mínimo 85% de CaCO₃.

2.7. Reação pozolânica

Entende-se como pozolana, de acordo com (ACI, 2002) como material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finalmente moído e em presença de água e hidróxido de cálcio (CA(OH)₂).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define que pozolanas são materiais que contém consideráveis teores de sílica ou alumina em sua forma reativa. O termo pozolana faz referência à cinza vulcânica originária da ilha italiana de *Pozzuoli* (MASSAZZA, 1998). A crescente utilização de pozolanas em matrizes cimentícias motiva o desenvolvimento de inúmeros métodos para avaliação da atividade pozolânica (ALBERNAZ et al., 2019; SALES, 2012).

A incorporação de finos em argamassas, geralmente melhora a coesão das partículas e, conseqüentemente, diminui consideravelmente a segregação e a exsudação da argamassa fresca. No entanto, a presença de finos na argamassa dificulta a subida da água até a superfície, o que traz risco de fissuração, principalmente quando a taxa de evaporação é elevada. Para evitar tal problema, deve-se proteger a superfície da argamassa fresca da perda de água mediante a utilização de um método eficaz de cura (PEREIRA *et al.*, 2012; SENSALÉ, 2000).

2.8. Resíduos sólidos na produção de artefatos cimentícios

A indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção, o que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos. Esse volume de consumo, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz da indústria cerâmica uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos (PEREIRA *et al.*, 2012; MENEZES; NEVES; FERREIRA, 2002).

É de grande importância e necessidade de aplicação e incorporação de resíduos industriais principalmente no setor da construção civil, que consome um volume exagerado de matéria-prima na confecção de seus produtos. Além disso, a incorporação de resíduos na matriz cerâmica traz diversas vantagens para a indústria, como economia de matéria-prima não-renovável, obtenção de produtos com forte apelo ambiental, redução do consumo de energia e outros (PEREIRA, 2012).

Keller (1997) estudou a adição de resíduos sólidos de curtumes a massas cerâmicas para a fabricação de corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 50mm de altura. Os aspectos analisados foram: resistência à compressão, absorção de água, lixiviação e solubilização. Com 6% de aditivo, a resistência mecânica à compressão manteve-se dentro das exigências das normas vigentes (PEREIRA, 2012).

Balaton, Gonçalves e Ferrer (2002) estudaram a incorporação de resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha. Foram avaliados os riscos ambientais da incorporação desta lama mediante testes de lixiviação e solubilização nos produtos cerâmicos. Observou-se que, com a adição de até 2% da lama galvânica na composição da massa, não houve alteração significativa nas propriedades da massa referencial, mas com a adição de proporções superiores a esta, os corpos de prova

apresentaram durante o processo de secagem a formação de eflorescência em suas superfícies, sendo tal formação tanto maior quanto mais elevada a proporção de resíduo.

Não obstante, uma lavagem do resíduo excluiu o problema da eflorescência e não interferiu nas propriedades cerâmicas. Testes de lixiviação e solubilização realizados em corpos de prova com incorporação de 2% de resíduo lavado apresentaram características e propriedades próximas à massa referencial, mostrando que houve inertização dos metais.

Os resultados mostraram que a incorporação do resíduo galvânico em massa de cerâmica vermelha estrutural é uma boa alternativa para a inertização do resíduo (PEREIRA, 2012).

Giffone e Lange (2005) estudaram a borra de fosfato, um resíduo gerado em indústrias que possuem em seu processo produtivo a etapa de pintura em superfícies metálicas, como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. Percentuais de 0%, 5%, 10% e 20% do resíduo foram misturados à argila para avaliação da melhor composição para a fabricação de tijolos. Com base nos resultados obtidos, chegou-se a uma formulação de 90% da matéria-prima convencional (argila) e de 10% da matéria-prima alternativa (borra de fosfato) para a confecção de tijolo em escala industrial. O tijolo fabricado com 10% do resíduo borra de fosfato atende ao requisito de absorção de água estabelecido para blocos cerâmicos pela norma NBR 7171/92, não inferior a 8% nem superior a 25%, (PEREIRA, 2012).

Menezes, Neves e Ferreira (2002) avaliaram a incorporação de resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que a incorporação é uma excelente alternativa para a reciclagem do resíduo de caulim, sendo possível a incorporação de até 50% de resíduo em formulações cerâmicas para a produção de tijolos e telhas. A incorporação do resíduo do beneficiamento do caulim em matriz cerâmica, portanto, representa uma significativa economia de matéria-prima para os produtores cerâmicos, mostrando-se uma alternativa economicamente viável, devido ao seu grande volume de produção, tanto para os mineradores quanto para os beneficiadores de caulim (PEREIRA, 2012).

O cimento, atualmente, é um dos materiais mais usados no Brasil, com um consumo aparente registrado no ano de 2000 de 39.179.754 t e um consumo aparente projetado de 53.899.670 t para 2010. O consumo está distribuído entre revendedores

(76,5%), concreteiras (11%), fibrocimento, pré-moldados e artefatos (7,8%), construtores (4,5%) e outros (0,1%) (COSTA, 2001). Portanto, a argamassa pode ser considerada como uma matriz promissora para agregar determinados resíduos industriais (PEREIRA, 2012).

Para melhorar a eficiência das cinzas de biomassa vários tratamentos vêm sendo aplicados visando aumentar a reatividade desses materiais. A queima das cinzas a altas temperaturas, com o objetivo de promover alteração da estrutura cristalina e aumentar o grau de amorfização dos materiais, e a moagem dos grãos, para aumento de sua finura, têm sido os mais aplicados (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, *et al.*, SILVA, 2015).

2.9. Argamassa

A utilização da argamassa é de extrema necessidade na construção civil, sendo constituída por cimento, areia, água, aditivos e adições, sendo moldável apresentando boa durabilidade, podendo ser de diversas formas, além de resistir mecanicamente aos esforços de cisalhamento e compressão. A construção civil pode desenvolver uma grande oportunidade de novos materiais através da reutilização dos próprios descartes na composição de elementos construtivos, na qual pode ocorrer mudanças em suas características mecânicas, a exemplo do incremento das cinzas provenientes da queima da madeira em alto forno (NETO, 2020).

A argamassa é um material largamente utilizado na construção civil, em diferentes tipos e fases de obra. Sendo aplicada, principalmente, no levante de alvenaria, assentamento cerâmico, revestimento de paredes e tetos, contrapisos assentamento e reparos estruturais. Nelas, o cimento *Portland* é o principal aglomerante. Como parâmetros para a avaliação de uma argamassa faz-se necessário avaliar algumas propriedades tanto no estado fresco quanto endurecido (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

Dentre as propriedades fundamentais, destaca-se a trabalhabilidade, a densidade e a absorção. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) que trata das especificações das argamassas, elas são qualificadas a partir das seguintes propriedades: 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 compressão - NBR 7215 (ABNT, 1996),

resistência à tração na flexão NBR 13279 (ABNT, 2005) e coeficiente de capilaridade NBR 15259 (ABNT, 2005).

A trabalhabilidade é a propriedade da argamassa no estado fresco que determina o quão fácil é misturar, transportar e aplicar este material. Ela não é simples de se determinar, pois vai depender do tipo de substrato onde será aplicada e de um conjunto de outras propriedades, como plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa, adesão inicial e consistência (MATOS, GUIMARÃES *et al.*, 2017; CARASEK, 2007).

Com relação ao comportamento mecânico, principalmente a resistência à compressão, sabe-se que a argamassa deve adquirir rapidamente alguma resistência, permitindo o assentamento de várias fiadas no mesmo dia, bem como desenvolver resistência adequada ao longo do tempo. Apesar disso, não são necessárias resistências altas das argamassas de assentamento para garantir o bom desempenho das paredes; pelo contrário, a resistência da argamassa não deve nunca ser superior à do bloco (CARASEK, 2007). Para avaliar as propriedades mecânicas das argamassas pode ser feito o ensaio de resistência à tração na flexão e a compressão, previsto na NBR 13279 (ABNT, 2005) (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

2.10. Aglomerante: cimento

O cimento *Portland* é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento *Portland* não se decompõe mais. O cimento, misturado com água e outros materiais de construção, tais como a areia, a pedra britada, pó-de-pedra, a cal e outros, resulta nos concretos e nas argamassas usadas na construção de casas, edifícios, pontes, barragens etc. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

As características e propriedades desses concretos e argamassas vão depender da qualidade e proporções dos materiais com que são compostos. Dentre eles, entretanto, o cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico. Pode-se dizer que o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado como uma laje, uma viga ou um revestimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Quando se trata do CP II-F, ele é utilizado para várias aplicações como no preparo de argamassas de assentamento, argamassas de revestimento, estruturas de concreto armado, solo-cimento, pisos e pavimentos de concreto, etc. Este tipo de cimento é um composto constituído de 90% à 94% de clínquer e gesso e de 6% a 10% de material carbonático ou filer, com classe de resistência de 25, 32 e 40 Mpa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991).

A caracterização química típica de um cimento composto com filer calcário encontrado no mercado é mostrada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - 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

2.11. *Protimiza Experimental Design* com duas variáveis

A análise estatística dos experimentos 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 por imersão (x_2). Um desenho fatorial 2^2 com repetições no ponto central

foi utilizado. De acordo com o delineamento experimental utilizado, o número total de combinações experimentais no ensaio foram 11.

As variáveis dependentes, ou seja, as respostas preditas foram ajustadas por um modelo de segunda ordem, sendo o comportamento mecânico de resistência e absorção de água por imersão. 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, 4% e 7 dias, (0) para 8% e 14 dias e (+1) para 12% e 21 dias.

As respostas do delineamento são de grande importância para as argamassas. Segundo Carasek (2010), o revestimento ou assentamento de argamassa deve apresentar capacidade de absorver pequenas deformações de modo a não comprometer a sua aderência, estanqueidade e durabilidade. Esta propriedade da argamassa está associada ao módulo de elasticidade e à resistência mecânica das argamassas, podendo influenciar na fissuração e na aderência dos revestimentos e assentamento. A resistência mecânica e a capacidade de absorver deformações são inversamente proporcionais, pois a deformabilidade do material para um mesmo carregamento é tanto menor quanto maior for a sua capacidade de resistência (JÚNIOR, 2011).

É de suma importância avaliar a capacidade de deformação da argamassa destinada ao revestimento ou assentamento de componentes de alvenaria. Em todos os casos, a argamassa não se deforma livremente, pois está sujeita às restrições devido às tensões decorrentes da aderência à base em que se encontra aplicada. Caso sua capacidade de deformação não seja compatível ao nível de tensões gerado, a argamassa na forma de revestimento ou junta de assentamento será rompida, podendo ocorrer prejuízos à sua funcionalidade (JÚNIOR *et. al.* MEHTA; MONTEIRO, 2008).

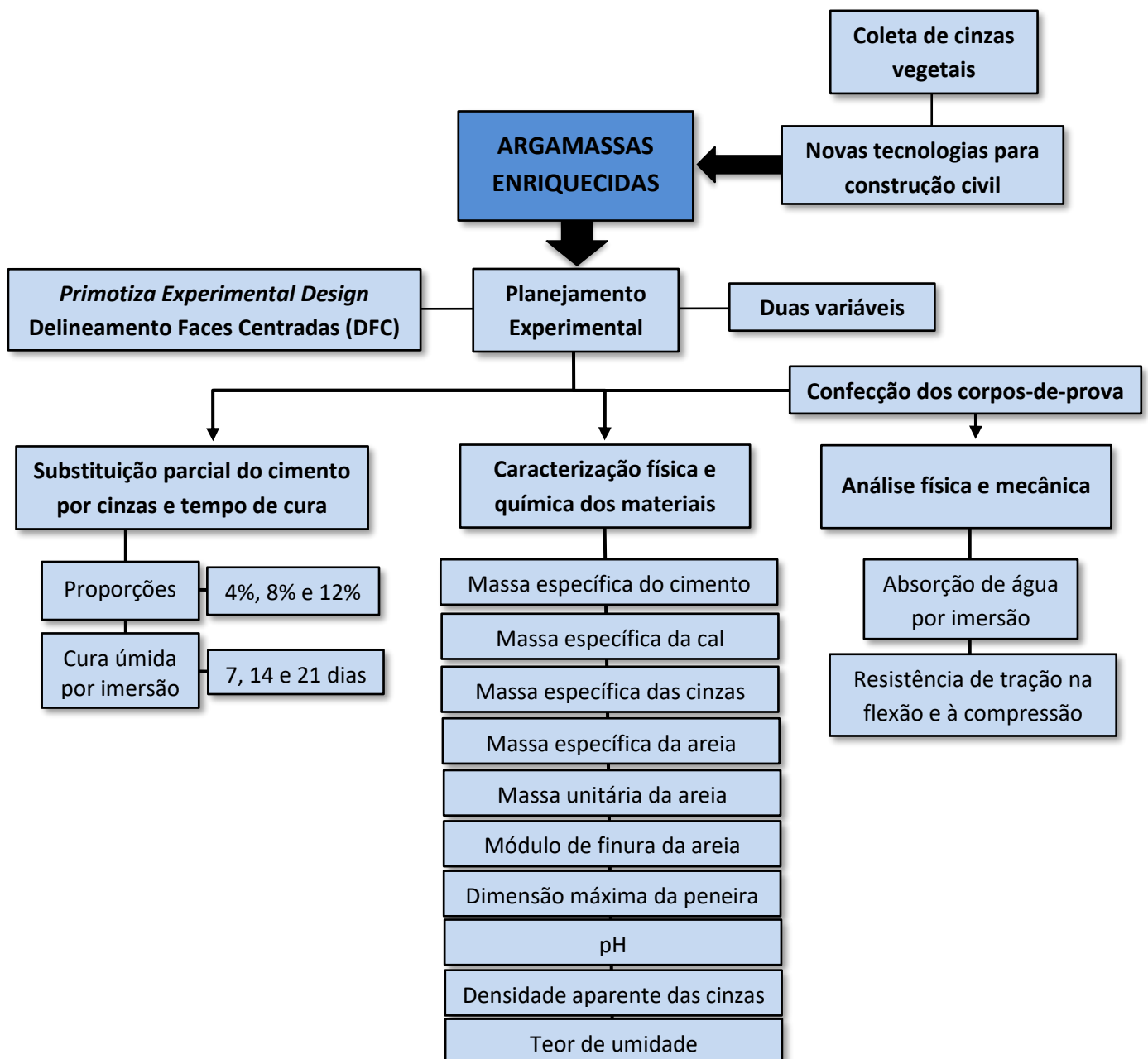
Quando se trata de absorção de água, segundo Bauer (2008), a absorção de água está relacionada com a presença de poros existentes nos grãos e é expressa pelo teor de água absorvida no estado saturado de superfície seca em porcentagem do peso da amostra seca, conforme a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001). A presença de poros em argamassas interfere diretamente no desempenho mecânico de resistência, além de mostrar o comportamento do empacotamento dos grãos.

3. METODOLOGIA

3.1. Tipo de pesquisa

O material colocado em estudo foi as cinzas de alto forno provenientes da queima de podas de árvore típicas do Cerrado, coletadas em uma indústria de produção de carvão vegetal, no estado do Tocantins. A evolução metodológica dos procedimentos realizados está representada na Figura 2.

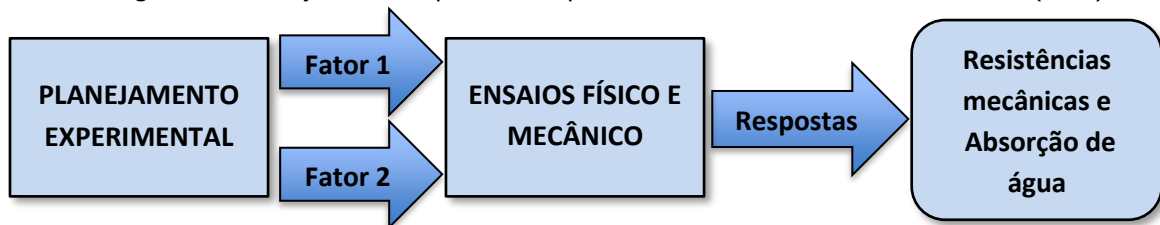
Figura 2 - Fluxograma das atividades que foram desenvolvidas



3.2. Planejamento experimental

O presente trabalho teve como base o software *Protimiza Experimental Design* referente ao planejamento multivariável do Delineamento de Faces Centradas (DFC), sendo considerado o Fator 1 a porcentagem de cinzas em substituição do cimento e Fator 2 o tempo em dias necessários de cura úmida por imersão. Teve por finalidade observar os comportamentos físico e mecânico dos corpos-de-prova, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Planejamento experimental por Delineamento de Faces Centradas (FCD)



Fonte: Autor (2021).

Aplicou-se um planejamento experimental fracionário de Delineamento de Faces Centradas (DFC), sem repetições, com 11 tipos de combinações entre os fatores sem perder a qualidade, pois no modelo quadrático adotado, necessita de pelo menos 6 parâmetros diferentes, ou seja, ter um grau de liberdade relevante para obter os 6 parâmetros. A repetição genuína foi de 1, devido ensaio de bancada ter sido realizado somente uma vez e os pontos centrais geraram automaticamente, quando se colocou os níveis de -1 a +1.

Primeiro, foi feito o levantamento de normativas, respeitando o recomendado de 7 a 21 dias, depois o percentual de cinzas foi determinado por literatura. 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 dados centrais os 3 últimos na ordem de ensaio, e o motivo de serem 3 ensaios iguais é devido serem o ponto central, no qual é uma repetição para ver o erro de um experimento.

Os domínios das faixas dos parâmetros estudados estão de acordo com PAULINO *et al*, 2015. Sendo assim, os ensaios foram realizados de acordo com os fatores e níveis, conforme expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental

Fatores	Níveis		
	(-1)	(0)	(+1)
% de cinzas substituídas pelo cimento	4	8	12
Tempo de cura úmida por imersão, em dias	7	14	21

Fonte: Autor (2021).

Depois foi feita a ordem dos experimentos empregados no planejamento experimental, como mostra na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Ordem dos experimentos

Ordem dos experimentos	Fatores	
	% de cinzas substituídas pelo cimento (x_1)	Tempo de cura úmida por imersão, em dias (x_2)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0

Fonte: Autor (2021).

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 seguindo a Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de corpos-de-prova de acordo com os fatores

% de cinzas substituídas pelo cimento	Quantidade de corpo-de-prova (un)	Tempo de cura (dias)
4%	1	7
	1	14
	1	21
	1	7
8%	3	14
	1	21
	1	7
	1	14
12%	1	21
	1	21

Fonte: Autor (2021).

A quantidade de materiais separados feita para cada traço, foi calculada a partir da substituição parcial da massa do cimento como também dos valores obtidos da caracterização dos próprios materiais, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade de materiais em gramas que foram separados

Traço	Cimento (g)	Cal (g)	Areia (g)	Cinzas (g)	Água (g)
4%	480,00	790,41	1327,33	20,00	655,00
8%	460,00	757,48	1272,03	40,00	655,00
12%	440,00	724,54	1216,72	60,00	655,00

Fonte: Autor (2021).

A preparação dos materiais ocorreu no dia 18/02/2021, conforme Figuras 4, 5 e 6, e a confecção e moldagem desses corpos-de-prova no mesmo dia, de acordo com as Figuras 7 e 8. Vale lembrar que eles devem ser separados por proporções de cinzas e enumerados, para melhor controle de dados.

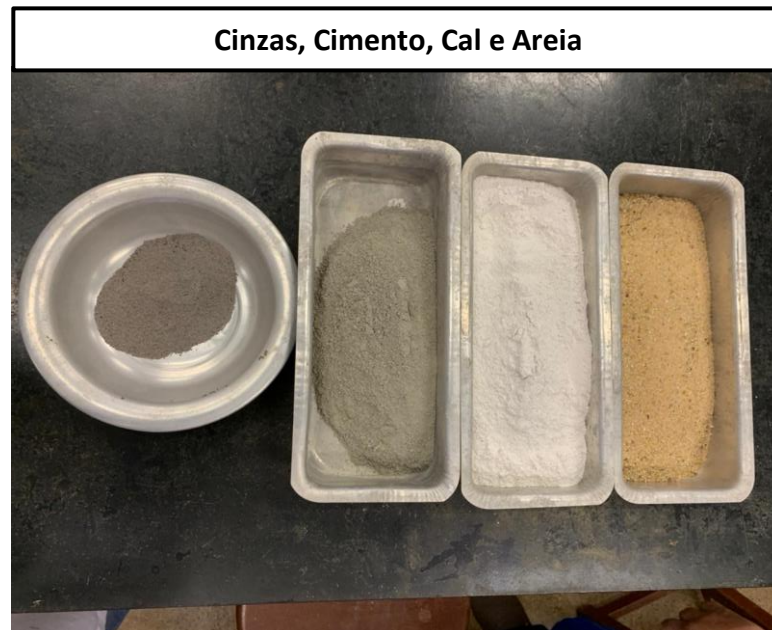
A confecção foi seguida de acordo com a NBR 13279/2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. O desmolde ocorreu no dia seguinte, 19/02/2021, conforme Figura 9.

Figura 4 - Separação dos materiais: Traço de 4%



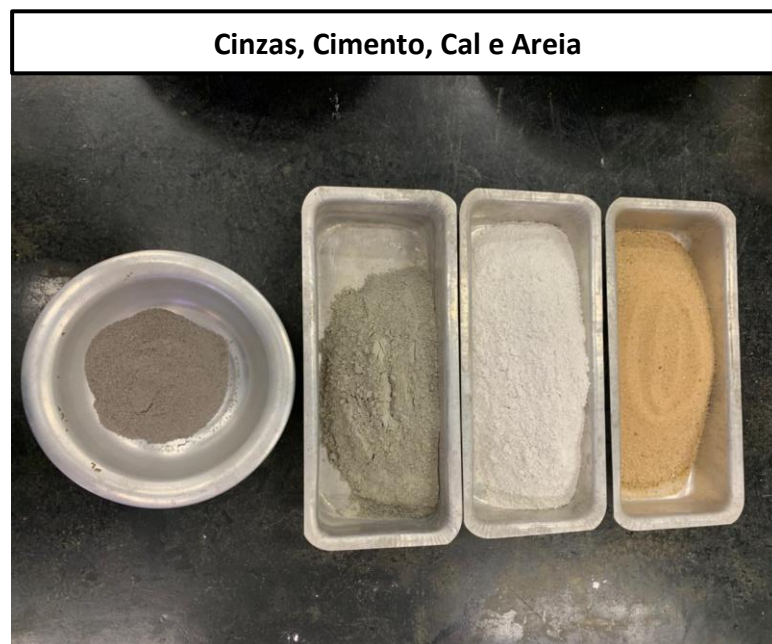
Fonte: Autor (2021).

Figura 5 - Separação dos materiais: Traço de 8%



Fonte: Autor (2021).

Figura 6 - Separação dos materiais: Traço de 12%



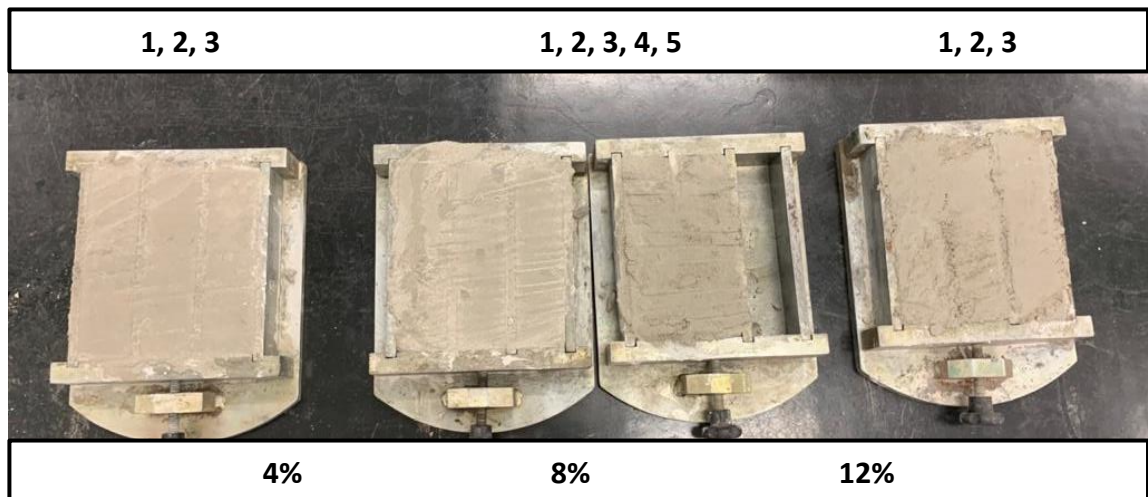
Fonte: Autor (2021).

Figura 7 - Confeção dos corpos-de-prova

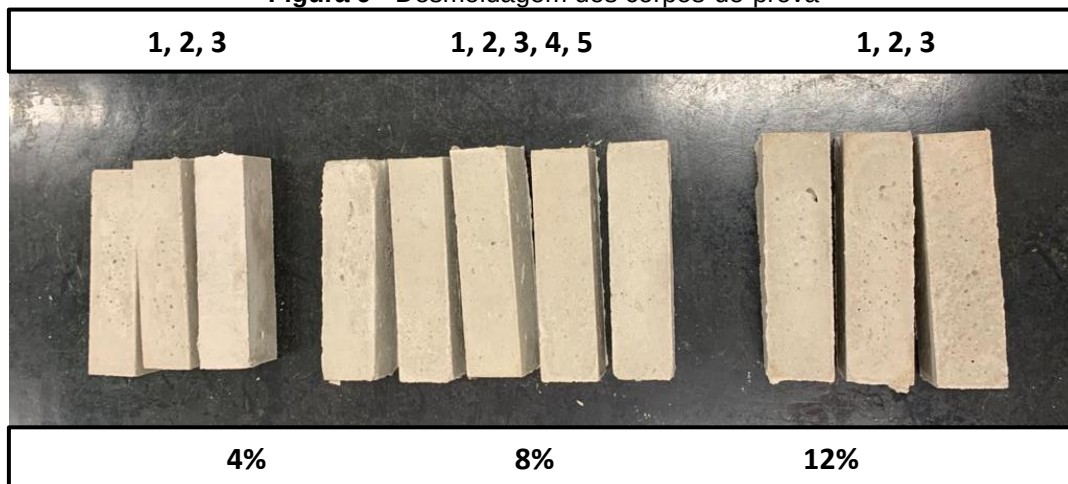


Fonte: Autor (2021).

Figura 8 - Moldagem dos corpos-de-prova

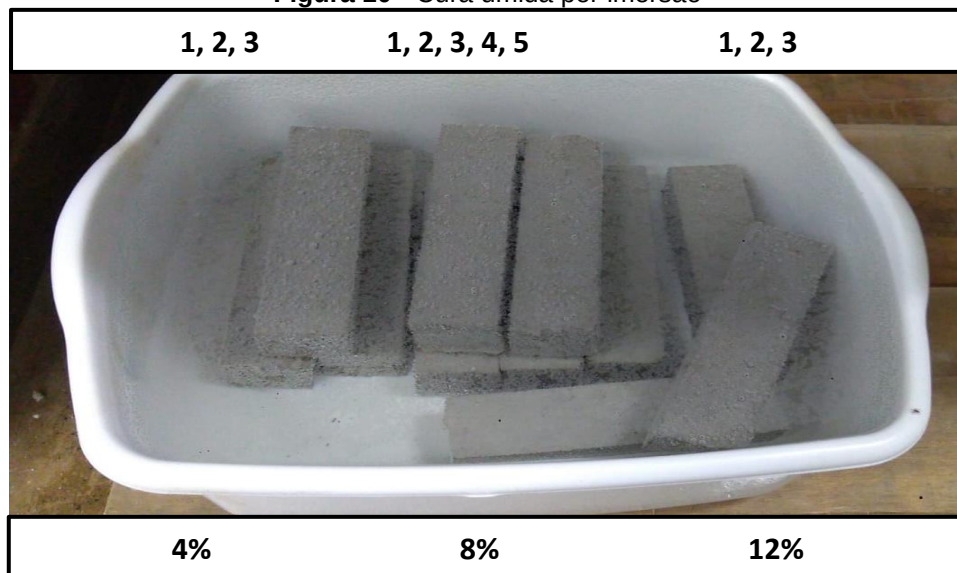


Fonte: Autor (2021).

Figura 9 - Desmoldagem dos corpos-de-prova

Fonte: Autor (2021).

Os corpos de prova foram submetidos a cura úmida através do método de imersão, após o desmolde, ocorrido em 19/02/2021, respeitando o período de 24h. Sendo o tempo em dias, de acordo com o Delineamento de Faces Centradas (DFC), mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Cura úmida por imersão

Fonte: Autor (2021).

3.3. Materiais e métodos

Os materiais necessários que foram utilizados no presente trabalho constituem-se de cimento, areia, cinzas e cal. O primeiro (o cimento) é do tipo *Portland* CP-II F 32, doado pelo Instituto Federal do Tocantins (IFTO), o segundo (a areia), é do tipo

média, também doado pelo Instituto, o terceiro (as cinzas) foi recolhido em uma indústria de produção de carvão vegetal, no estado do Tocantins, e o quarto (a cal) é do tipo hidratada, o qual também foi doado pelo Instituto.

Assim como, os equipamentos e utensílios, também foram recursos disponibilizados pela instituição, 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; prensa hidráulica; elermeyer; água deionizada; chapa de aquecimento por indução; pH-metro modelo A201; proveta; cadinho de porcelana; estufa; dessecador; recipientes de armazenagem; espátula; e outros seguindo as normas citadas.

Os procedimentos metodológicos que envolveram o experimento foram realizados também no próprio Instituto Federal do Tocantins (IFTO), no laboratório de materiais e no laboratório de análises de águas. No laboratório de materiais, os experimentos feitos, seguindo suas respectivas normas citadas a seguir, foram: NBR NM 248:2003 - determinação da composição granulométrica de agregados; NBR NM 23:2001 - 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 52:2003 - agregado miúdo: determinação de massa específica e massa aparente; ABNT NBR 9778:2005 - argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica.

Já no laboratório de águas, os ensaios feitos, seguindo suas respectivas normas citadas a seguir, foram: teste de pH; determinação da densidade aparente das cinzas; determinação do teor de umidade das cinzas. Esses foram realizados em 12,18,19, 25 e 26/02/2021, 04 e 11/03/2021.

3.3.1. Caracterização física e química dos materiais

Os materiais foram passados por ensaios técnicos laboratoriais conforme estabelecem as NBRs abaixo:

- NBR NM 248:2003 – Determinação da composição granulométrica de agregados;
- NBR NM 23:2001 – 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 52:2003 – Agregado miúdo: determinação de massa específica e massa aparente.

A Tabela 6 mostra os dados obtidos na caracterização dos materiais.

Tabela 6 - Caracterização dos materiais

Características	Dados
Massa específica do cimento (g/cm ³)	3,17
Massa específica da cal (g/cm ³)	2,61
Massa específica das cinzas (g/cm ³)	2,63
Massa específica da areia (g/cm ³)	2,62
Massa unitária da areia (g/cm ³)	1,46
Módulo de finura da areia (g/cm ³)	1,97
Dimensão máxima (mm)	2,38

Fonte: Autor (2021).

Como também, foi realizado o experimento de pH das cinzas, determinado de acordo com a norma JIS K 1474. O procedimento consistiu em adicionar a um eler-meyer de 200 mL, 1 g de cinza e 100 mL de água deionizadas.

Levou a mistura aquecimento e deixou em ebulição por 5 minutos, resfriando a temperatura ambiente. Na mistura já esfriada adicionou-se 100 mL de água deionizada e em seguida mediu-se o pH da suspensão com um pH-metro de marca Orion Star, modelo A201, conforme as Figuras 11 e 12, e como resultado de 9,62.

O pH, nada mais é que o potencial de hidrogênio que indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa, ou seja, com o resultado obtido, pode-se observar que as cinzas possuíam um pH alcalino, saindo de 7,0 para 9,62, isso faz com que evite que a pasta de cimento se deteriore.

Figura 11 - Ensaio de pH no laboratório de análises de águas



Fonte: Autor (2021).

Figura 12 - Ensaio de pH



Fonte: Autor (2021).

O mesmo ocorreu no estudo de Cinzas da Casca de Coco Verde (CCCV) que, de acordo com MATOS (2017), a CCCV produzida possui uma massa específica de $2,22 \text{ g/cm}^3$ e por meio da utilização do pH-metro de mesa foi possível observar que ao inserir a cinza CCCV em meio aquoso, houve uma alteração no pH da água tornando-a básica ou alcalina. A inserção de CCCV altera o pH da água destilada, de 7,0, para 12.

Assim como, foi feito no presente trabalho, o cálculo da densidade aparente das cinzas, na qual acoplou-se uma proveta de 100 mL em uma balança analítica. Zerou-se a balança e adicionou-se a cinza e obteve-se as massas (g) nas sucessivas adições nos respectivos volumes de 10 mL, 20 mL, 30 mL, 40 mL e 50 mL, de acordo com as Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Ensaio de densidade aparente



Fonte: Autor (2021).

Figura 14 – Ensaio de densidade aparente

Fonte: Autor (2021).

Então, determinou-se a densidade aparente, incluindo os poros permeáveis, pela relação da massa (g) pelo volume (ml), tendo como resultado, da média das densidades aparente encontradas, de $0,679 \text{ g/cm}^3$, conforme apresentado a seguir na Tabela 7.

Como a densidade aparente está diretamente ligada a porosidade, é importante realizar este ensaio pois pode quantificar a influência nas propriedades da argamassa no estado endurecido.

Tabela 7 - Valores densidade aparente

Volume (ml)	Massa (g)	Densidade (g/cm^3)
10	6,714	0,671
20	13,777	0,689
30	20,317	0,677
40	27,156	0,679
50	33,891	0,678
Densidade aparente média (g/cm^3)		0,679
Desvio padrão		0,01
Coeficiente de variação (%)		0,96

Fonte: Autor (2021).

Por fim, o teor de umidade (%) das cinzas, na qual foi determinado em conformidade com a norma ASTM D 3173-85. A massa de aproximadamente 1 g de cinza foi adicionada a cadinho de porcelana com peso constante pré-determinado.

O procedimento foi realizado em triplicada, como exposto na Figura 15. A amostra foi aquecida em uma estufa à temperatura de 110°C, conforme Figura 16, por um período de 1 hora.

Na sequência, o cadinho foi colocado em um dessecador, de acordo com a Figura 17, por 10 minutos e pesado novamente.

O teor de umidade foi determinado segundo a Equação 1.

$$\% \text{ Umidade} = \frac{(P1+P0)-P2}{(P0)} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

P1 = peso do cadinho

P2 = peso do cadinho + amostra após o aquecimento na estufa

P0 = peso da amostra

Figura 15 - Cadinhos de porcelana

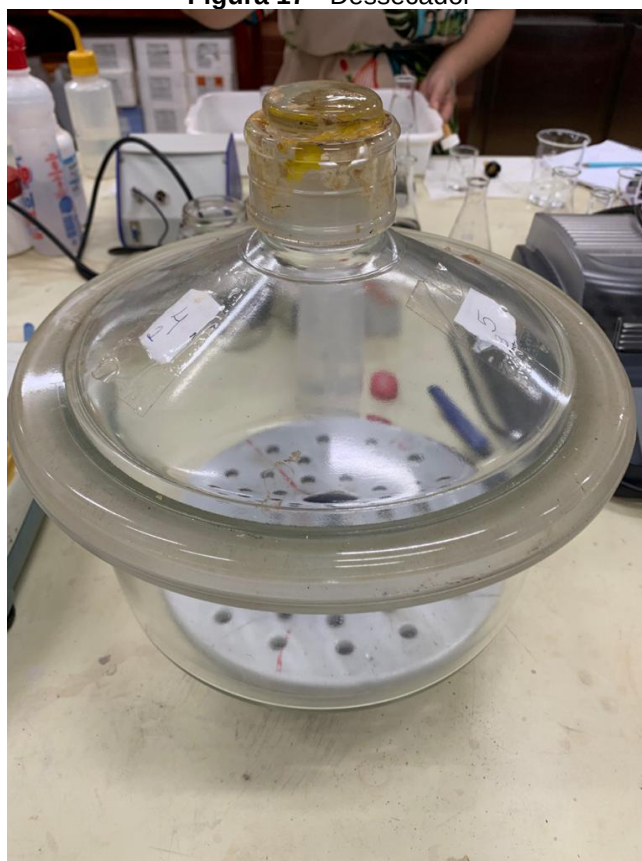


Fonte: Autor (2021).

Figura 16 - Estufa



Fonte: Autor (2021).

Figura 17 - Dessecador

Fonte: Autor (2021).

O ensaio de teor de umidade teve a finalidade de determinar a quantidade de água absorvida do ambiente para correção do próprio traço. O ensaio de teor de umidade teve como resultado a média dos três valores obtidos, sendo de 50,40%, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Ensaio de teor de umidade

Dados	Cadinho 01	Cadinho 02	Cadinho 03
P1 (g)	33,926	33,895	33,910
P2 (g)	34,412	34,292	34,516
P0 (g)	1,000	1,000	1,000
Teor de umidade (%)	51,40	60,30	39,40
Teor de umidade médio (%)	50,40		
Desvio Padrão	10,49		
Coefficiente de Variação (%)	20,82		

Fonte: Autor (2021).

3.4. Ensaio mecânico de resistência

Os corpos-de-prova foram submetidos primeiramente ao ensaio de tração na flexão, onde cada um foi posto na horizontal com os lados de superfície lisa voltados para a prensa hidráulica, aplicando uma carga até a ruptura para que seja dividido em duas partes iguais, como mostra a Figura 18.

Figura 18 - Ensaio de resistência mecânica de tração na flexão



Fonte: Autor (2021).

Posteriormente, foram submetidos ao ensaio de compressão, aplicando uma força axial em ambas metades dos corpos de prova do ensaio de flexão. Ambos ensaios foram de acordo com a NBR 13279/2005 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, conforme Figura 19.

Figura 19 - Ensaio de resistência mecânica de compressão



Fonte: Autor (2021).

3.5. Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi embasado de acordo com a NBR 9778/1987 argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica, em que o valor é definido segundo a Equação 2.

$$\frac{M_{sat}-M_s}{M_s} \times 100$$

Equação 2

Onde:

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado

M_s = massa do corpo-de-prova seco

3.6. Análise dos dados

Com o procedimento experimental teve como planejamento e referência o software *Protimiza Experimental Design* no qual utilizou-se o Delineamento de Faces Centradas (DFC), em que mostrou dados estatísticos importantes juntamente com seu nível de significância, além de resultar em gráficos e superfícies de resposta. Neste caso, foi necessário o uso do método ANOVA (*Analysis of Variance*) para verificar se existe diferença entre as médias a serem obtidas mediante ao tipo de traço de argamassa adotado através de duas hipóteses.

A partir disso, foi feito a regressão do planejamento com os valores resultantes obtidos nos ensaios experimentais. Além também, resultaram-se a representação do diagrama de Pareto e superfícies de resposta. Vale ressaltar que os resultados obtidos dos corpos-de-prova de argamassa enriquecidas foram comparados com um valor referência de argamassa convencional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Então, foram verificados por meio de planejamento multivariável o efeito dos fatores sendo o Fator 1 a porcentagem de cinzas em substituição do cimento e Fator 2 o tempo em dias necessários de cura úmida por imersão. O planejamento teve como finalidade observar o comportamento físico e mecânico de argamassas, observando as melhores combinações a serem aplicadas durante o processo.

As respostas do planejamento experimental foram as resistências a tração na flexão e a compressão, sendo comparadas com os requisitos mínimos que a NBR 13281/2005 – argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos exige, e absorção de água, mostrando o quanto as cinzas interferem no comportamento mecânico e físico das argamassas.

4.1. Ensaio de resistência mecânica: tração na flexão

Os resultados experimentais obtidos no planejamento de Delineamento de Faces Centradas (DFC), no que diz a resistência mecânica de tração na flexão, estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos valores 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 pelo cimento (x ₁)	Tempo de cura úmida por imersão, em dias (x ₂)	Resistência à tração na flexão, em MPa (y ₁)	
1	4	7	3,00	2,20*
2	12	7	2,80	
3	4	21	2,90	
4	12	21	2,20	
5	4	14	3,00	
6	12	14	2,80	
7	8	7	2,60	
8	8	21	2,30	
9	8	14	2,90	
10	8	14	3,00	
11	8	14	3,10	

* Média da resistência à tração na flexão, em MPa, do traço testemunha (sem cinzas), aos 14 dias
 Fonte: Autor (2021).

Pôde-se observar na Tabela 9 que a maior resistência mecânica de tração na flexão, tratando estatisticamente, foram identificadas nos ensaios 09,10 e 11 (8% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado médio de 3,00 MPa, e a menor resistência atingida foi no ensaio 4 (12% de substituição de cinzas por cimento aos 21 dias de cura úmida por imersão), tendo de resultado 2,2 MPa.

Na Tabela 9 foi adicionado um valor médio dessa mesma resistência mecânica de um traço testemunha, valor este retirando em NETO *et al.* (2020) de 2,20 MPa, na qual não possui nenhum tipo de adição, e deixa evidente que os resultados, quando comparados com o traço testemunha, foram bem satisfatórios. Os valores satisfatórios de resistência de tração na flexão são confirmados conforme Tabela 3 da NBR 12281/2005, Tabela 10 a seguir.

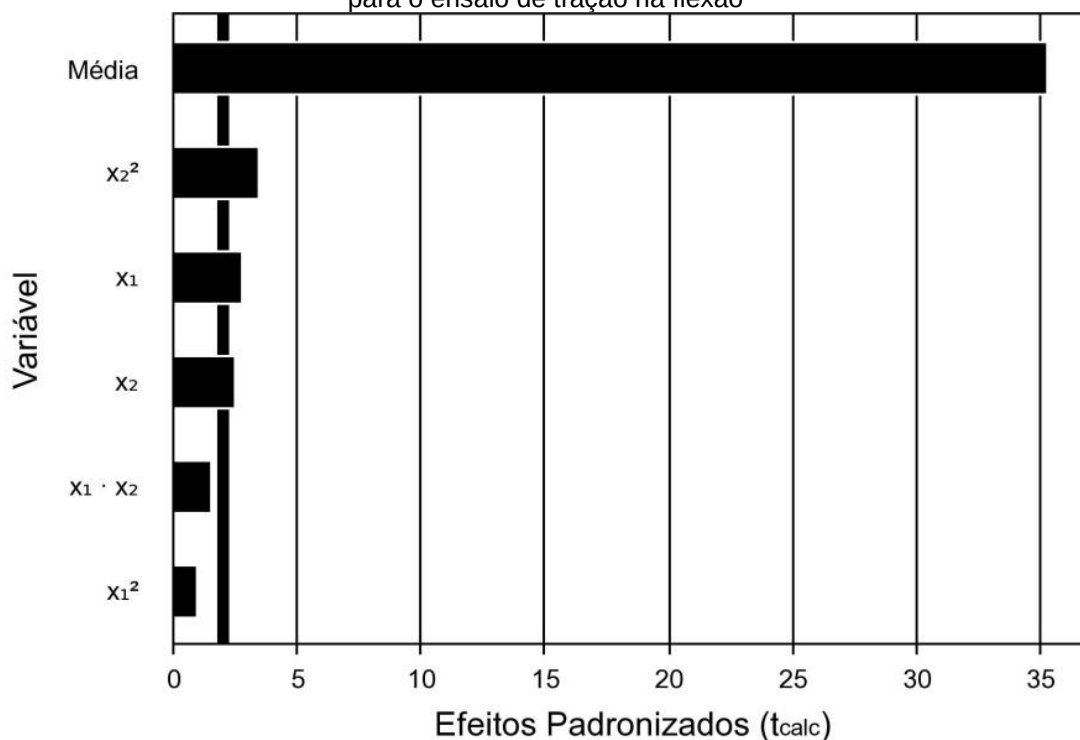
Tabela 10 - Tabela 3 da ABNT NBR 12281/2005

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Fonte: ABNT NBR 12281/2005

De acordo com os resultados obtidos e considerando as variáveis, foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, como o Diagrama de Pareto, na Figura 20, gerado a partir dos dados do planejamento fatorial indicando que x_1 , x_2 e x_2^2 teve valores resultantes significativos, valores estes acima da linha de significância.

Figura 20 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2021).

A Tabela 11 mostra os coeficientes de regressão das variáveis analisadas. Foi considerado também o efeito de interação entre as variáveis. Os efeitos significativos foram destacados a um nível de 90% de confiança.

Tabela 11 - 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	2,92	0,08	35,25	0,0000
x_1	-0,18	0,07	-2,78	0,0389
x_1^2	0,10	0,10	0,96	0,3814
x_2	-0,17	0,07	-2,53	0,0527
x_2^2	-0,35	0,10	-3,47	0,0178
$x_1 \cdot x_2$	-0,12	0,08	-1,55	0,1824

Fonte: Autor (2021).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, foi possível escrever o modelo ajustado que descreve a resistência mecânica de tração na

flexão juntamente com a quantidade de substituição de cinzas pelo cimento e o tempo em dias de cura úmida por imersão, conforme Equação 3.

$$Y_1 = 2,92 - 0,18 x_1 + 0,10 x_1^2 - 0,17 x_2 - 0,35 x_2^2 - 0,12 x_1 x_2 \quad \text{Equação 3}$$

Onde

x_1 = % de cinzas substituídas pelo cimento;

x_2 = tempo de cura úmida por imersão, em dias

A Tabela 12 apresenta a ANOVA (*Analysis of Variance*) para a resistência mecânica de tração na flexão.

Tabela 12 – ANOVA, para o ensaio de tração na flexão

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado	p-valor
Regressão	0,7	5	0,1	5,7	0,03928
Resíduos	0,1	5	0,0		
Falta de ajuste	0,1	3	0,0	3,7	0,22087
Erro puro	0,0	2	0,0		
Total	0,9	10			

$R^2 = 85,11\%$

Fonte: Autor (2021).

Verifica-se na Tabela 12 que o coeficiente de terminação R^2 obtido pela regressão é 0,8511 ou 85,11%. Para confirmação da significância dos parâmetros do modelo pela análise da ANOVA (*Analysis of Variance*), foi realizado o teste F. No teste F para ser significativo estatisticamente, o valor de F obtido da regressão deve ser maior que o valor de Ftabelado (Neto *et al.*, 2007; Rodrigues e Lemma, 2009). O valor de Fcalculado foi determinado pela expressão, $F_{\text{calculado}} = \text{Quadrado médio regressão} / \text{Quadrado médio erro}$.

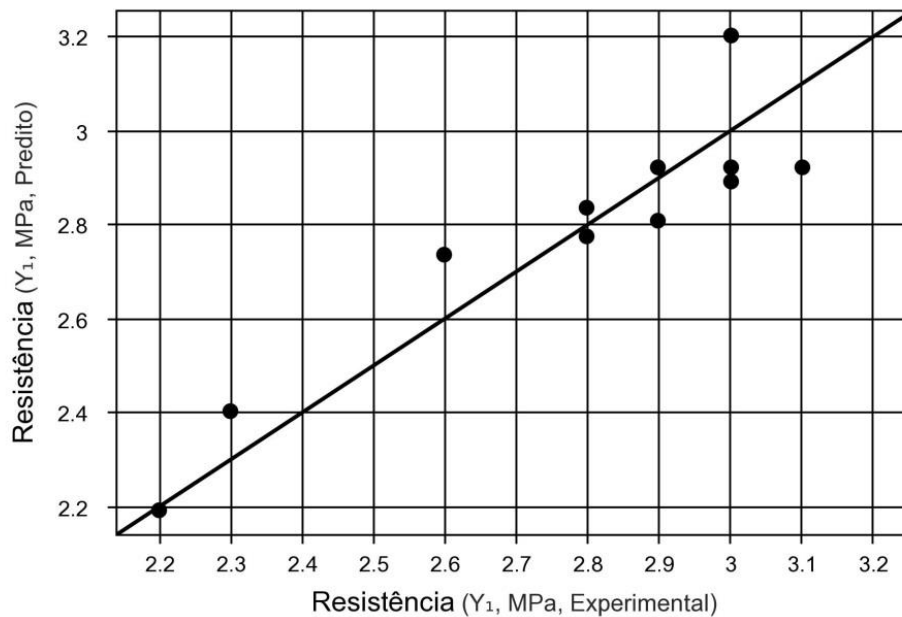
Para confirmação, o Fcalculado para 90% deu 5,7, sendo significativo pelo p-valor. Olhando no quadro de regressão, tendo valor de (5, 5) = 3,45, ou seja, o Fcalculado é maior que o Ftabelado, tendo resposta positiva. Para resíduos, olhando em (3, 2) = 5,46, ou seja, o Fcalculado é menor que o Ftabelado.

Portando, o modelo estatístico ANOVA (*Analysis of Variance*) teve como resultado significativo, visto que o R^2 foi suficiente, e $F_{\text{regressão/resíduos}} \geq F_{\text{tabelado}}$ e $F_{\text{falta de ajuste/erro puro}} \leq F_{\text{tabelado}}$. Gerando, então, a superfície de resposta. Logo,

comparando o valor de $F_{\text{calculado}}$ para a regressão com o valor de F_{tabelado} , verifica-se uma regressão significativa.

A Figura 21 apresenta a comparação entre os valores observados experimentalmente e aqueles preditos pelo modelo ajustado.

Figura 21 - Valores observados versus previstos, para o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2021).

Observa-se pela análise da Figura 21 um bom ajuste do modelo, justificado pela apreciável aglomeração de pontos próximos da reta representativa.

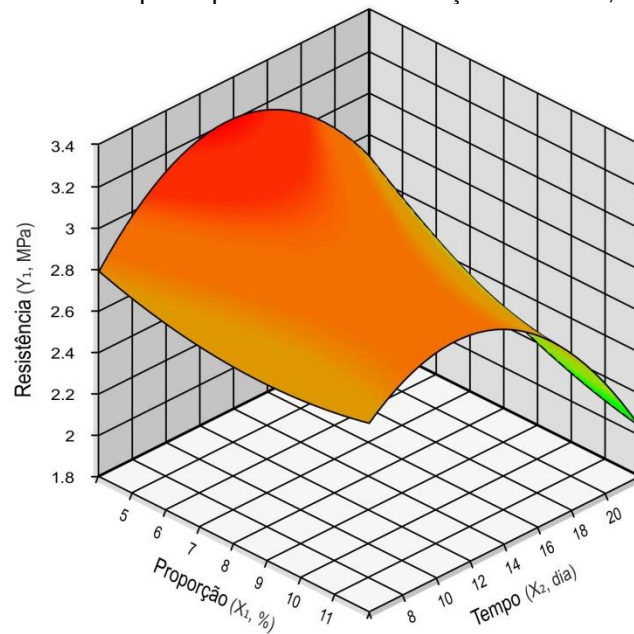
Os valores experimentais, ao se tratar de resistência, se encontram no eixo das abscissas, enquanto os preditos, sendo utilizado 2,92 (pelos pontos centrais 0,0) predito pelo modelo. Os valores reais de resistência à tração na flexão, na Tabela 9, obtidos são bem próximos uns dos outros, por isso não existiu tanta diferença no R^2 resultante

O gráfico Resistência Predito x Resistência Experimental mostrou para os 11 experimentos, os valores preditos pelo modelo.

Portanto, os dados experimentais são bem representados pelo modelo ajustado, ou seja, o modelo obtido para as variáveis significativas pode ser utilizado para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados.

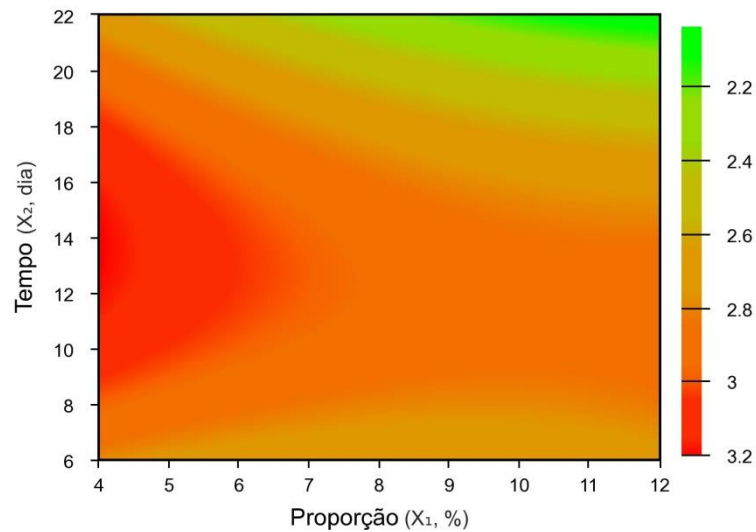
O que gerou como resposta os modelos de superfície nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 - Superfície de resposta para o ensaio de tração na flexão, com os fatores 1 e 2



Fonte: Autor (2021).

Figura 23- Superfície plana de resposta para o ensaio de tração na flexão, com os fatores 1 e 2



Fonte: Autor (2021).

Para fins práticos, pode-se supor o uso de 1 tonelada de cimento para uso de argamassa, sendo 12% deste substituído por cinzas, resultaria na utilização de 120 kg de cinzas, ou seja, uma economia de aproximadamente 2 sacos e meio de cimento. Sendo essa aplicação uma sustentação para o argumento de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

4.2. Ensaio de resistência mecânica: compressão

Os resultados experimentais obtidos no planejamento de Delineamento de Fases Centradas (DFC), no que diz a resistência mecânica a compressão, estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos valores obtidos através do ensaio de compressão

Ordem dos experimentos	Fatores	Resposta		Média da resistência à compressão, em MPa
	% de cinzas substituídas pelo cimento (x_1)	Tempo de cura úmida por imersão, em dias (x_2)	Resistência à compressão, em MPa (y_1)	
1	4	7	3,87	5,12*
2	12	7	5,02	
3	4	21	3,46	
4	12	21	6,15	
5	4	14	7,04	
6	12	14	4,96	
7	8	7	5,45	
8	8	21	4,61	
9	8	14	2,77	
10	8	14	4,31	
11	8	14	4,10	

* Média da resistência à compressão, em MPa, do traço testemunha (sem cinzas), aos 14 dias
Fonte: Autor (2021).

Pôde-se observar na Tabela 13 que a maior resistência mecânica a compressão foi identificada no ensaio 5 (4% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado de 7,04 MPa, e a menor resistência atingida foi no ensaio 9 (8% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo de resultado 2,77 MPa.

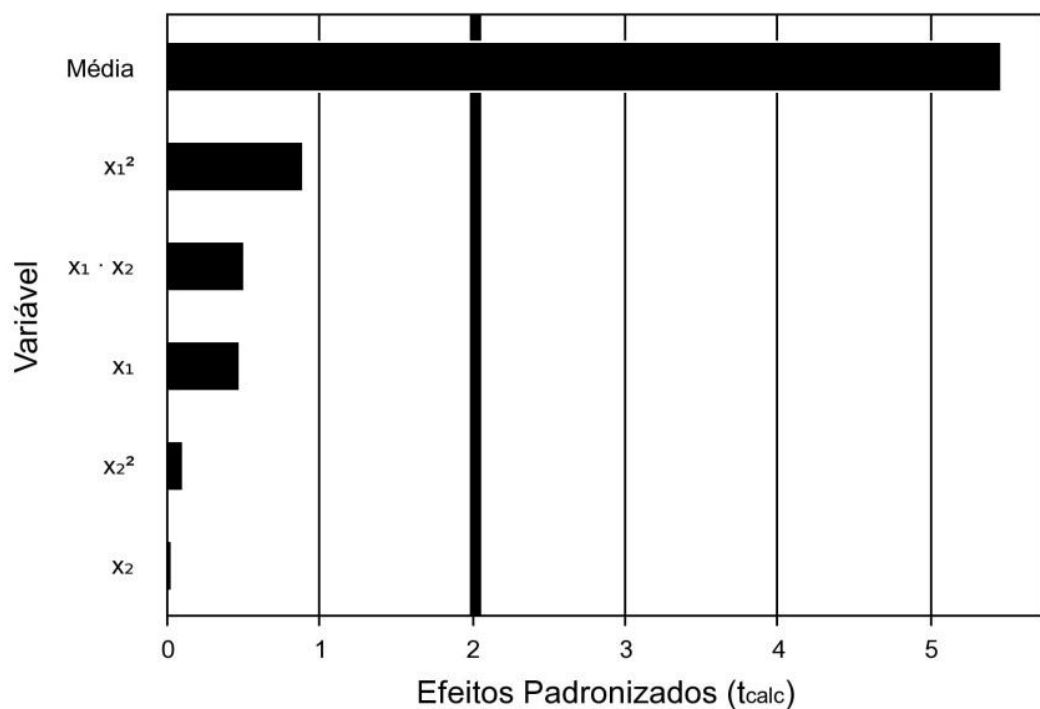
Na Tabela 13 foi adicionado um valor médio referência dessa mesma resistência mecânica de um traço testemunha, de acordo com NETO *et al.* (2020) de 5,12 MPa, na qual não possui nenhum tipo de adição, e mostra que os resultados, quando comparados com o traço testemunha, não foram bem satisfatórios. Mas quando comparadas com os requisitos mínimos necessários de resistência perante Tabela 1 da NBR 13281, Tabela 14 a seguir, atendem positivamente.

Tabela 14 - 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

De acordo com os resultados obtidos e considerando as variáveis, foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, como o Diagrama de Pareto, na Figura 24, gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado indicando que nenhuma variável teve valores resultantes significativos, valores estes abaixo da linha de significância.

Figura 24 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de compressão

Fonte: Autor (2021).

Tratando dos valores resultantes de x_1 , por exemplo, conclui-se dizer, de acordo com o p-valor que não foi significativo, ou seja, ao invés de usar a porcentagem de 4% pode-se utilizar de 12% de cinzas, como mostra na Tabela 15. Portanto, os

ensaios de resistência mecânica usando 4%, 8% ou 12% de cinzas trabalhando na compressão, não tem alteração direta nos resultados, ou seja, sem significância.

Tabela 15 - Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de compressão

Fatores	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	4,29	0,79	5,46	0,0028
X ₁	0,29	0,63	0,47	0,6589
X ₁ ²	0,86	0,96	0,90	0,4107
X ₂	-0,02	0,63	-0,03	0,9757
X ₂ ²	-0,11	0,96	-0,11	0,9164
X ₁ .X ₂	0,39	0,77	0,50	0,6366

Fonte: Autor (2021).

4.3. Ensaio de absorção de água por imersão

Os resultados experimentais obtidos no planejamento de Delineamento de Faces Centradas (DFC), no que diz a absorção de água por imersão, estão na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos valores obtidos através do ensaio de absorção de água por imersão

Ordem dos experimentos	Fatores	Resposta		Média de absorção de água por imersão, em %
	% de cinzas substituídas pelo cimento (x ₁)	Tempo de cura úmida por imersão, em dias (x ₂)	Absorção de água, em % (y ₂)	
1	4	7	2,88	17,01*
2	12	7	2,57	
3	4	21	2,23	
4	12	21	2,54	
5	4	14	3,25	
6	12	14	2,60	
7	8	7	2,90	
8	8	21	2,68	
9	8	14	2,66	
10	8	14	2,57	
11	8	14	2,18	

* Média da absorção de água por imersão, em %, do traço testemunha (sem cinzas), aos 14 dias

Fonte: Autor (2021).

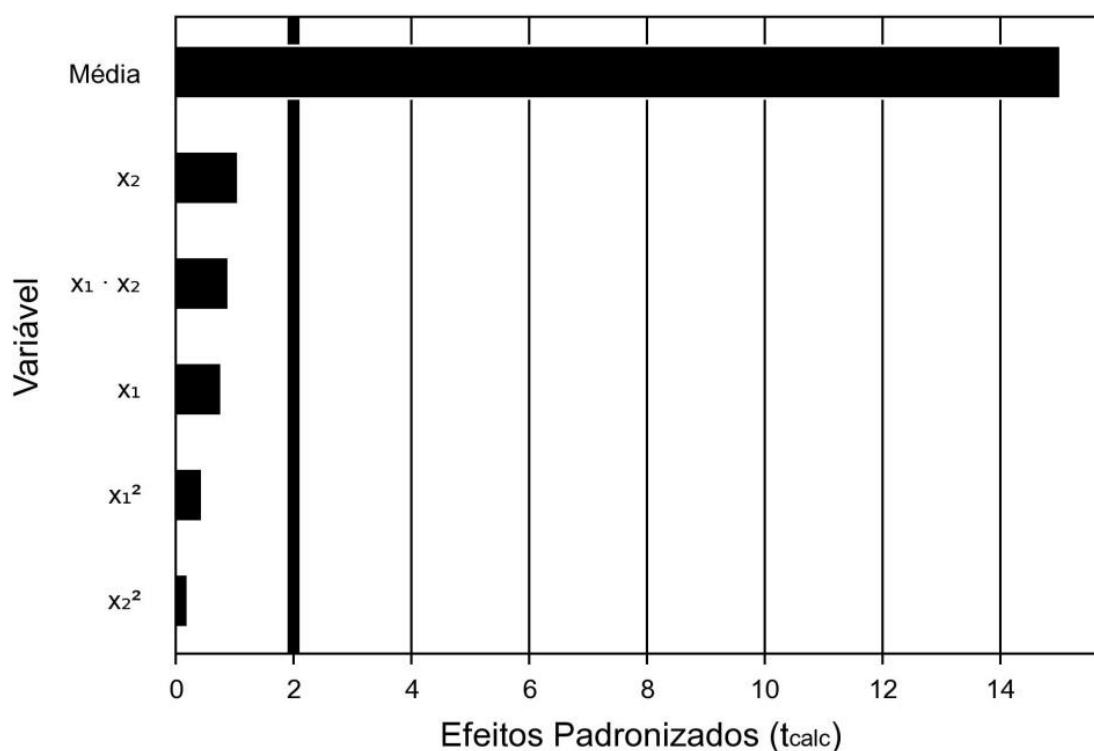
Pôde-se observar na Tabela 16 que a maior porcentagem de absorção de água por imersão foi identificada no ensaio 5 (4% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado de 3,25%, e a porcentagem

de menor absorção de água foi no ensaio 11 (8% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo de resultado 2,18%.

Na Tabela 16 foi adicionado um valor médio também de referência dessa mesma porcentagem de absorção de água por imersão de um traço testemunha, de acordo com JÚNIOR (2011), de 17,01%, na qual não possui nenhum tipo de adição, e mostra que os resultados de absorção, quando comparados com o traço testemunha, foram bem satisfatórios. Isso é, mostra que o emprego de cinzas promove um melhor empacotamento granulométrico na argamassa, possibilitando a redução da absorção, corroborando com os resultados das resistências mecânicas anteriores.

Tendo como base os resultados obtidos e considerando as variáveis, foi possível realizar uma análise estatística, obtendo diversos dados, como o Diagrama de Pareto, gerado a partir dos dados do planejamento fatorial já mencionado no qual indicou que nenhuma das variáveis teve respostas significativas, valores estes abaixo da linha de significância, conforme Figura 25.

Figura 25 - Representação do Diagrama de Pareto pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de absorção de água por imersão



Fonte: Autor (2021).

Após analisar os resultados de x_1 e x_2 , conforme Tabela 17, pode-se dizer que tanto faz, em termos de absorção de água, usar o 4%, 8% ou 12% de cinzas e 7, 14

ou 21 dias, ou seja, os resultados são os mesmos. Esse resultado é de supra importância, devido não ter interferências das proporções perante à absorção.

Tabela 17 - Coeficientes de Regressão do planejamento pelo Delineamento de Faces Centradas (DFC), para o ensaio de absorção de água por imersão

Fatores	Coeficiente	Erro padrão	t calculado	p-valor
Média	2,62	0,17	15,01	0,0000
X₁	-0,11	0,14	-0,78	0,4699
X₁²	0,09	0,21	0,43	0,6848
X₂	-0,15	0,14	-1,08	0,3286
X₂²	-0,05	0,21	-0,20	0,8477
X₁.X₂	0,16	0,17	0,91	0,4032

Fonte: Autor (2021).

Sendo assim, pode-se utilizar a quantidade de 12% de cinzas, em termos de absorção de água, em campo, economizando o aglomerante cimento e corroborando diretamente com a sustentabilidade. Para demonstração, pode-se supor o uso de 1 tonelada de cimento para uso de argamassa, sendo 12% deste substituído por cinzas, resultaria na utilização de 120 kg de cinzas, ou seja, uma economia de aproximadamente 2 sacos e meio de cimento, além da redução no impacto ambiental.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de resistência física e mecânica obtidos neste presente trabalho mostraram que a substituição parcial do cimento em argamassas é um caminho que além de sustentável, quando se trata da matéria prima da produção de cimento, no caso o clínquer, na qual no processo de produção gera grandes poluidores que são expostos ao meio ambiente, é também uma possibilidade com viabilidade técnica bastante satisfatória.

Outro aspecto importante é a respeito da redução do fator clínquer do cimento, na qual os traços com mais substituição de cinza ajudam na redução de poluição, pois diminuem os gases maximizadores do efeito estufa, reduzem o consumo de materiais não renováveis, fazem a reinserção de materiais na cadeia produtiva e, é ambiental-mente correto, pois dá uma destinação a biomassa e tira gás carbônico da atmosfera (ALBERNAZ, 2019).

Esse tipo de argamassa, em específico a de assentamento, de acordo com CLÁUDIO (2013) teve proporções adequadas de cada componente, cada qual contribuindo com suas características, formando uma mistura mais completa. Sendo a cal com função plastificante, capacidade de reter água e ter trabalhabilidade, e o cimento na função de melhorar a resistência e aumentar a velocidade de endurecimento.

Os ensaios de caracterização dos materiais, apesar de serem ensaios de carácter primário, também obtiveram resultados satisfatórias e coerentes. O valor de massa específica resultante foi coerente com os outros agregados e aglomerante, tornando as cinzas viáveis na produção de argamassas. O pH teve como resultado alcalino, de 9,62, evitando que a pasta de cimento se deteriore. O ensaio de densidade aparente, como resposta de 0,679, mostrou que está diretamente ligado com a porosidade da argamassa, pois influencia nas propriedades desta no estado endurecido. Por fim, o teor de umidade, como resultado de 50,40%, mostrou a quantidade de água absorvida do ambiente, na qual mostra o quanto o traço de argamassa deve ser corrigido.

Tratando das duas respostas física e mecânica, elas tiveram comportamentos diferentes, sendo para a engenharia civil respostas de grande relevância. A resistência à tração na flexão das argamassas foi mais favorável para as que continham as cinzas. A utilização de cinzas em substituição parcial do cimento Portland resultou em um ganho considerável na resistência da argamassa, quando comparado com o traço

testemunha. Com destaque na maior resistência mecânica de tração na flexão nos ensaios 09, 10 e 11 (8% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado médio de 3,00 MPa, e a menor resistência atingida foi no ensaio 4 (12% de substituição de cinzas por cimento aos 21 dias de cura úmida por imersão), tendo de resultado 2,20 MPa. Ao ser comparado com o traço testemunha, com resultado de 2,20 MPa, observou que até a menor resistência obtida equipara com a referência, ou seja, bem satisfatório para tração na flexão.

Quanto aos resultados da resistência à compressão das argamassas, a substituição parcial do cimento pelas cinzas não foi favorável. Não houve um ganho significativo de resistência, quando comparado com o traço testemunha. Apesar de não terem sido favoráveis, observou-se que no ensaio 5 teve a maior resistência mecânica a compressão (4% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado de 7,04 MPa, ultrapassando até o traço testemunha, de 5,12 MPa.

No que diz respeito a absorção de água por imersão, o ensaio mostrou que as argamassas confeccionadas apresentaram boa relevância, apesar dos dados não terem sido significativos. A porcentagem de absorção de água quando comparada com uma referência, no caso de 17,01%, foi de caráter positivo, visto que os compostos da argamassa promoveram um empacotamento granulométrico melhor, ou seja, uma porcentagem de absorção bem inferior. Notou-se que a maior porcentagem foi identificada no ensaio 5 (4% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo como resultado de 3,25%, e a menor porcentagem de absorção de água no ensaio 11 (8% de substituição de cinzas por cimento aos 14 dias de cura úmida por imersão), tendo de resultado 2,18%.

A análise física e mecânica das argamassas enriquecidas com cinza de carvão vegetal, em benefício à sustentabilidade, foi um dos objetivos principais deste trabalho. E, neste aspecto, a utilização de cinzas de alto forno como matéria prima provenientes da queima de podas de árvores para produção de carvão vegetal em substituição parcial do cimento *Portland* revelou-se bastante proveitosa na aplicabilidade de assentamento, corroborando com a sustentabilidade, e como efeito, da viabilidade econômica. Posto que os resultados obtidos a partir de todos os ensaios realizados dos procedimentos experimentais foram positivos, como também, quando comparados com os requisitos mínimos da NBR 13281/2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERNAZ, Matheus. **Emprego de resíduos de biomassas oriundos de queima de cerâmica vermelha em substituição parcial do cimento *Portland* em concreto convencional**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, 2019.

ANDRADE, Clarice de et al. Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.321-329, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S151770762016000200321&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 17 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - **ABCP**. Manual de Revestimentos de Argamassa. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Concreto – Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Concreto – Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura de determinação do índice de Consistência. Rio de Janeiro, 2002.

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 13281** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

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 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. 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.

BALDAN, Victor José dos Santos. Desenvolvimento e caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretano termofixa. 2015. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-30062016-102309/>>. Acesso em: 26 set. 2020.

BIFF, Sergio; SILVA, Manoel Ribeiro da. Uso do resíduo sólido proveniente do processo de beneficiamento de areia na indústria de revestimentos cerâmicos e sua influência nas propriedades físicas dos produtos cerâmicos. **Matéria** (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 21, n. 4, p.853-865, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0103>.

BORLINI, M. C., SALES, H. F., VIEIRA, C. M. F., CONTE R. A., PINATTI, D. G. MONTEIRO, S. N.. **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha**. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000300004>.

CANÇADO, Cláudio. Disciplina de Introdução à Construção. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/augustozulu/argamassas-22579157#:~:text=Propriedades%20mec%C3%A2nicasA%20argamassa%20re-siste%20aos,cabe%20aos%20blocos%20de%20alvenaria.>>. Acesso em: 27/03/2021.

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>.

CORDEIRO, G. C., **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. **Tese de Doutorado**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

DEMIS, S.; TAPALI, J.g.; PAPADAKIS, V.g.. An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. **Construction And Buiding Materials**, [s.l.], v. 68, p.291-300, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.071>.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. "Biomassa"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>. Acesso em 22 de janeiro de 2021.

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

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.

KRAEMER, Maria Elisabeth Pereira. A questão ambiental e os resíduos industriais. In: ENEGEP. 2005, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: Amda, 2005. p. 1 - 7. Disponível em: <http://www.amda.org.br/imgs/up/Artigo_25.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

LUCAS, Denis; BENATTI, Cláudia Telles. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, v. 1, n. 3, p.405-418, set. 2008. Trimestral. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2008v1n3p405-418>

MASILAMANI, Dineshkumar et al. Sustainable packaging materials from tannery trimming solid waste: A new paradigm in wealth from waste approaches. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], p.1-27, jun. 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.200>.

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 Vol. 13 – Goiás. 2017. <https://doi.org/10.5216/reec.v13i1.41675>.

MELO, Thais Felipe de. Gestão de resíduos sólidos: um estudo sobre grupos de influência no município de Piracicaba - SP. 2012. **Dissertação** (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. doi:10.11606/D.91.2012.tde-14032012-101138. Acesso em: 15 nov. 2020.

PELIZER, Lúcia Helena; PONTIERI, Márcia Helena; MORAES, Iracema de Oliveira. Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. **Journal Of Technology Management & Innovation** © Jotmi Research Group, Santiago, v. 2, n. 1, p.118-127, mar. 2007. Disponível em: <<http://www.jotmi.org/index.php/GT/article/view/384>>. Acesso em: 08 out. 2020.

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).

RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358 p.

SALES, Caroline Pessoa. **Produção e caracterização de cinza de capim elefante com vistas à sua aplicação como pozolana**. 2012. 139 f. **Dissertação (Mestrado)** - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012. Disponível em: <http://uenf.br/posgraduacao/engenhariacivil/wpcontent/uploads/sites/3/2015/09/Caroline-Pess%C3%B4a-Sales_.compressed.pdf>. Acesso em: 10 set. 2020.

SATA, V. et al. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in *Portland* cement matrix. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 34, n. 1, p.94- 100, jan. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946511001600>>. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.003>.

UBRABIO – União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene. Mistura mínima de biodiesel no diesel comercializado sobe para 12% em março. Disponível em: <<https://ubrabio.com.br/2020/01/08/mistura-minima-de-biodiesel-no-diesel-comercializado-sobe-para-12-em-marco>>. Acesso em: 20/01/2020.