



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

MAGNO DANILO FREITAS E SILVA

**BENEFICIAMENTO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COM CINZAS DE
CARVÃO VEGETAL, VISANDO A SUSTENTABILIDADE, ATRAVÉS DE
ANÁLISES FÍSICA E MECÂNICA**

PALMAS

2022

MAGNO DANILO FREITAS E SILVA

**BENEFICIAMENTO DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO COM CINZAS DE
CARVÃO VEGETAL, VISANDO A SUSTENTABILIDADE, ATRAVÉS DE
ANÁLISES FÍSICA E MECÂNICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil
do Instituto Federal do Tocantins, Campus
Palmas.

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

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

**PALMAS
2022**

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

- S586b Silva, Magno Danilo Freitas
Beneficiamento de argamassas de assentamento com cinzas de carvão vegetal, visando a sustentabilidade, através de análises física e mecânica / Magno Danilo Freitas Silva. – Palmas, TO, 2022.
35 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, 2022.
- Orientadora: Dra. Claudia da Silva Aguiar Rezende
Coorientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza
1. Cinzas. 2. Argamassa. 3. Sustentabilidade. I. Rezende, Claudia da Silva Aguiar. 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).

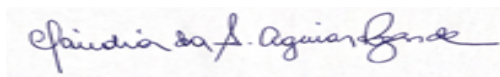
FOLHA DE APROVAÇÃO

BENEFICIAMENTO DE ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO COM CINZAS DE CARVÃO VEGETAL, VISANDO A SUSTENTABILIDADE, ATRAVÉS DE ANÁLISES FÍSICA E MECÂNICA

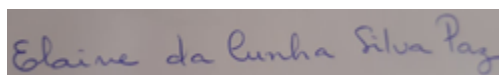
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: ____/____/____

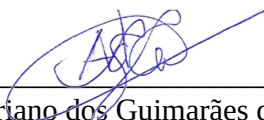
BANCA AVALIADORA



Prof.ª. Dra. Cláudia, da Silva A. Rezende
(IFTO)



Prof.ª. Dra. Elaine Paz da Cunha
(IFTO)



Prof. Dr. Adriano dos Guimarães de Carvalho
(IFTO)

RESUMO

SILVA, Magno Danilo Freitas. **Beneficiamento de argamassas de assentamento com cinzas de carvão vegetal, visando a sustentabilidade, através de análises física e mecânica.** 2022. 26 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

A construção civil tem buscado, cada vez mais, meios de contribuir para o aumento da sustentabilidade e de igual forma para o desenvolvimento de novos métodos e materiais para as construções. De um outro lado estão as indústrias que produzem um número significativo de poluentes diariamente, sendo um deles a biomassa, que atualmente não possuem grandes destinações a não ser o descarte em aterros sanitários. Tendo isto em mente, uma boa forma de sanar as necessidades de ambas as áreas é através de estudos que visem aproveitar os resíduos de uma na outra. Com isto veio a necessidade de se estudar as cinzas provenientes da queima de biomassa utilizadas como fonte de energia. O presente trabalho possui como objetivo o estudo das características, físicas e mecânicas, das argamassas de assentamento enriquecidas com cinzas de biomassa provenientes da queima de madeira nas fornalhas de fabricas produtoras de cerâmica em substituição ao cimento Portland. Para o planejamento experimental foi utilizado como base o software Protimiza Experimental Design seguindo o modelo de Delineamento Composto Central (DCC) para a análise de três variáveis, considerando dois fatores, sendo o Fator 1 a porcentagem de cinzas em substituição ao cimento e o Fator 2 o tempo de cura úmida por imersão, medida em dias. Todos os materiais aqui utilizados foram devidamente caracterizados, química e fisicamente, de acordo com as normas pertinentes para cada um. O modelo experimental que foi adotado foi quem determinou a quantidade de corpos de prova de argamassa, prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm, levando em conta a proporção de cimento substituída por cinzas, que aqui foram de 4%, 9% e 14%, e os dias de cura úmida por imersão, sendo de 7, 14 ou 28 dias. Através dos ensaios de resistência a tração na flexão, compressão, absorção de água e a análise estatística dos resultados obtidos é esperado que os resultados nos apontem se é viável ou não realizar a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de biomassa. Tendo um resultado positivo para a substituição, será feito uma estimativa de quanto uma obra, real, poderia ter economizado financeiramente caso tivesse feito a substituição.

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

ABSTRACT

SILVA, Magno. **Physical and mechanical analysis for the improvement of bedding mortars with charcoal ashes, aiming at sustainability.** 2022. 26 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2022.

The civil construction industry has increasingly sought ways to contribute to the increase of sustainability and also to the development of new methods and materials for construction. On the other side are the industries that produce a significant number of pollutants daily, one of them being biomass, which currently has no great destinations other than disposal. With this in mind, a good way to meet the needs of both areas is through studies that aim to use the residues of one in the other. With this came the need to study the ash from the burning of biomass used as an energy source. The present work aims to study the physical and mechanical characteristics of mortars enriched with biomass ash from burning wood in the kilns of ceramic factories as a substitute for Portland cement. For the experimental planning the Protimiza Experimental Design software was used, following the Central Composite Design (CCD) model for the analysis of three variables, considering two factors, Factor 1 being the percentage of ash replacing cement and Factor 2 the wet curing time by immersion, measured in days. All materials used here were duly characterized, chemically and physically, according to the relevant standards for each one. The experimental model that was adopted determined the quantity of prismatic mortar specimens with dimensions of 4x4x16 cm, taking into account the proportion of cement replaced by ash, which here were 4%, 9% and 14%, and the days of wet curing by immersion, being 7, 14 or 28 days. Through the tests of flexural tensile strength, compression, water absorption and statistical analysis of the results obtained, it is expected that the results will indicate whether it is feasible or not to perform the partial replacement of Portland cement by biomass ash. Having a positive result for the replacement, an estimate will be made of how much a real construction site could have saved financially if it had made the replacement.

Keywords: Ash; Mortar; Cement; Waste; Sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental.....	19
Tabela 2 – Ordem dos experimentos.....	20
Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova de acordo com os fatores.....	20
Tabela 4 – Quantidade de material por traço.....	25
Tabela 5 - Caracterização dos materiais.....	26
Tabela 6 – Resultado do teste de resistência a compressão.....	27
Tabela 7 – Quantitativo de material utilizado em cada argamassa.....	27
Tabela 8 – Resultado do teste de resistência a compressão.....	28
Tabela 9 – Requisitos físicos.....	28
Tabela 10 - Resultados obtidos através dos ensaios de tração na flexão (MPa).....	29
Tabela 11 - Tabela 3 da ABNT NBR 13281/2005.....	30
Tabela 12 – ANOVA, ensaio de tração a flexão.....	30
Tabela 13 - Resultados obtidos através dos ensaios de resistência a compressão (MPa).....	30
Tabela 14 - Tabela 1 da ABNT NBR 13281/2005.....	31
Tabela 15 - ANOVA, ensaio de resistência a compressão.....	31
Tabela 16 – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 4% de cimento.....	31
Tabela 17 – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 9% de cimento.....	32
Tabela 18 – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 9% de cimento.....	32
Tabela 19 – ANOVA, ensaio de absorção de água por imersão.....	32

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma de como as atividades serão desenvolvidas.....	18
Figura 2 – Planejamento por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).....	19
Figura 3 – Torrões de carvão.....	25
Figura 4 – Cinza após moagem.....	25
Figura 5 – Cinza após o peneiramento manual na peneira de 75 μ m.....	25

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3.	OBJETIVOS	16
1.3.1.	Objetivo Geral	16
1.3.2.	Objetivos Específicos	16
2.	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1.	POLUIÇÃO NO MUNDO.....	17
2.2.	POLUIÇÃO NO BRASIL.....	17
2.3.	RESIDUOS SOLIDOS	18
2.4.	RESIDUOS AGROINDUSTRIAIS	18
2.5.	ARGAMASSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	19
2.6.	REAÇÃO POZOLÂNICA.....	20
2.7.	AGLOMERANTE: CIMENTO	21
3.	METODOLOGIA	22
3.1.	TIPO DE PESQUISA.....	22
3.2.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	22
3.3.	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.3.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS MATERIAIS	25
3.3.2.	PREPARAÇÃO DO MATERIAL	25
3.3.3.	TRAÇO PADRÃO.....	26
3.4.	ENSAIO MECÂNICO DE RESISTÊNCIA	27
3.5.	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS MATERIAIS	27
4.2.	DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL AOS SETE DIAS (ABNT NBR 5751)	28
4.3.	MATERIAIS POZOLÂNICOS — DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS (ABNT NBR 5752)	28
4.4.	ATENDIMENTO A NORMA ABNT NBR 12653/2014 – MATERIAL POZOLÂNCOS – REQUISITOS	29
4.5.	ENSAIO DE TRAÇÃO A FLEXÃO.....	30
4.6.	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	31
4.7.	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	32
4.8.	POSSÍVEL ECONOMIA GERADA E REDUÇÃO DE CO ₂ NA LINHA DE PRODUÇÃO DO CIMENTO.....	Erro! Indicador não definido.

5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	Erro! Indicador não definido.
6.	REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais peças que proporcionou enormes avanços na construção civil foi a argamassa, sendo constituída principalmente por um ou mais aglomerante, agregado miúdo e água, podendo também ser acrescentado aditivos e adições, tem ao seu favor a capacidade de ser moldável, apresentar boa durabilidade, poder ser aplicado em diversos tipos de situações e além de resistir a esforços mecânicos de compressão e flexão, e o cimento foi o principal contribuinte neste avanço significativo da sociedade moderna. Por possuir tais características, de acordo com Matos e Guimarães (2017), a argamassa, atualmente, é um dos principais componentes utilizado na construção civil, sendo empregada em diferentes tipos e fases de obra, tendo como principais finalidades o levante de alvenaria, revestimento de paredes e tetos, contrapisos, assentamento cerâmicos e reparos.

As adições para as argamassas podem ter diversas origens, mas são amplamente utilizados resíduos da construção ou agroindustriais em substituição a outros materiais mais nobre ou caros. Essas adições podem também serem oriundas de biomassas que normalmente seriam descartadas no meio ambiente, como por exemplo do bagaço da cana, capim elefante, casca de arroz, podas de árvores entre outros, que são utilizados como fonte de energia na indústria e ao serem queimados em fornos geram cinzas. Neste sentido, Balaton, Gonçalves e Ferrer (2002), estudaram a possibilidade de incorporar resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha e Menezes, Neves e Ferreira (2002) avaliaram a incorporação de resíduos do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos.

As cinzas oriundas da queima de biomassas possuem características que as tornam pozolânicas ao serem misturadas nas argamassas, tendo 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 estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pastas (AGUIAR, 2006).

O efeito estufa tem se agravado cada vez mais, principalmente pelo fato de que os países não estarem conseguindo atingir as metas de redução dos gases poluente, que está principalmente atrelado ao dióxido de carbono (CO_2) e a construção civil pode contribuir diretamente para que essas metas possam ser atingidas, já que em diversas etapas dos processos de aquisição de materiais e do próprio processo construtivo há a emissão do CO_2 . Tendo isto em vista, cada vez mais tem surgido pesquisas que visam a diminuição de um componente utilizado na construção por um outro que produza menos poluentes em seu processo de criação e aplicação, podendo substituí-lo completamente ou parcialmente, desta forma os estudos que visam a substituição

parcial ou total do cimento têm ganhado força. De acordo com Sales (2012), o principal poluente na construção civil, levando em conta os seus processos de criação, é o cimento, por tanto a redução do seu consumo acarreta diretamente na diminuição da emissão de CO₂.

Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) em 2010 era estimado que a indústria responsável pela produção de cimento era responsável pela emissão de cerca de 5% de todo o CO₂ produzido no mundo. Já no Brasil este seguimento da indústria foi a responsável pela emissão de 29,7% do CO₂ durante o ano de 2013 sendo que para a produção de uma tonelada de cimento estimava-se a emissão em aproximadamente 610kg de CO₂ (BRASIL, 2014).

Uma das principais características das argamassas de assentamento ou revestimento é a sua capacidade de absorver apenas deformações provenientes dos esforços aos quais são expostas. Quando utilizadas com a finalidade de revestir superfícies, as argamassas estão sujeitas e diversos esforços e variações dimensionais, que pode ocasionar o surgimento de fissuras, podendo ter como origem a elasticidade, retração térmica e as ações externas ao revestimento ou assentamento (CANOVA; BERGAMASCO; ANGELIS NETO, 2007). Este assunto se torna de extrema importância pois, ao reduzir o consumo de cimento introduzindo resíduos de outros setores da indústria no seu local, proporciona uma diminuição no consumo de matéria prima, produção de gases poluentes, impactos ambientais e pode vir também a gerar uma redução nos gastos de um empreendimento.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Com o crescente aumento de demandas relativas à diminuição de produção de gases do efeito estufa, a redução dos impactos ambientais gerados pelas diversas formas de indústria e a redução do consumo de matéria prima, o incremento de cinzas, provenientes de biomassas utilizadas como fonte de energia, em substituição parcial ao cimento Portland em argamassas de assentamento pode ajudar na redução do consumo de cimento sem prejudicar o desempenho e as características físicas e mecânicas do mesmo?

1.2. JUSTIFICATIVA

A grande quantidade de indústrias, dos mais diversos setores, que utilizam biomassa como fonte de produção de energia em diversas etapas do processo de produção, fazem com que haja uma preocupação crescente sobre como as cinzas provenientes da queima deste material são descartadas, haja visto que hoje em dia não se tem um controle adequado sobre a sua disposição final. Todo e qualquer material remanescente da linha de produção representa um desperdício de matéria prima, tendo em vista que através de estudos pode-se chegar a novas tecnologias que

aproveitem corretamente este material. Paralelamente a isto, a construção civil está em buscas de novos métodos construtivos que visem a diminuição dos impactos ambientais gerados pelo setor, principalmente em relação a produção de cimento Portland (MATOS, 2016)

O cimento Portland é o principal emissor de CO₂, dentro da construção civil, devido a forma como que ele é produzido, por tanto uma redução no seu consumo diminuiria, de forma significativa, a geração deste poluente (ALBERNAZ et al., 2019). Uma das opções estudadas para fazer a substituição parcial do cimento são as adições minerais, que geralmente são compostas por minerais silicosos ou alumino-silicosos que costumam proporcionar melhorias ao desempenho e as propriedades físicas e mecânicas do cimento Portland (SALES, 2012).

Visando as novas possibilidades de utilização para os resíduos provenientes da queima de biomassa, vem ganhando espaço no meio científico os estudos relacionados as cinzas da casca de arroz, bagaço de cana, resíduos urbanos, entre outros, em substituição parcial ao cimento em diferentes proporções (ALBERNAZ et al., 2019; ZHANG et al., 1996; ROJAS e FRÍAS, 1999; PAYÁ et al., 2002; COIMBRA et al., 2002; SATA et al., 2012).

Por obter em sua composição as características que o tornam pozolânicos, as cinzas provenientes da queima de biomassas são denominadas de adições minerais. No presente trabalho, buscou-se entender de forma mais precisa sobre como as argamassas reagem ao terem um percentual de cimentos substituído por cinzas de biomassas, com o intuito de buscar diminuir a emissão de poluentes e de resíduos que poderiam vir a serem descartados incorretamente e também podendo proporcionar uma diminuição nos custos de uma obra.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem 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 biomassas para a produção de energia nas indústrias em substituição parcial do cimento *Portland*, em benefício a sustentabilidade e se essa substituição também pode vir a produzir alguma economia para a obra.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Aferir as características físico-químico das cinzas de biomassas;
- Estudo da substituição parcial do cimento por cinzas de biomassas, levando em consideração os diferentes percentuais de cimentos substituído e o tempo de cura úmida por imersão;
- Analisar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa no estado endurecido;

- Estimativa econômica da substituição de argamassa comum por argamassa enriquecida com cinzas;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. POLUIÇÃO NO MUNDO

Por definição, pode-se chamar de poluição tudo aquilo que causa mudanças químicas ou físicas no meio ambiente. Alterações estas que podem desencadear prejuízo a todos os seres vivos no planeta, ao bem-estar e a economia mundial. Um dos principais responsáveis pela emissão de poluentes no mundo são as indústrias, que vem crescendo no mundo todo, e trazendo consigo a necessidade de estarmos mais atentos para a emissão de poluentes.

Dados divulgados em 2021 pela Organizações Mundiais da Saúde (OMS), afirmam que, a cada ano, 7 milhões de mortes sejam provocadas pela exposição à poluição do ar, causando mortes prematuras e resultando na perda de milhões de anos de vida saudáveis. Em crianças, pode provocar redução do crescimento e da função pulmonar, infecções respiratórias e agravamento da asma. Enquanto em adultos pode desenvolver cardiopatia isquêmica e acidente vascular cerebral, mas também há estudos que sugerem outros efeitos, como a diabetes e a doenças neurodegenerativas. (Genebra, 22 de setembro de 2021 (OMS))

2.2. POLUIÇÃO NO BRASIL

A qualidade do ar é uma medida do nível de poluentes atmosféricos à qual a população está exposta. No Brasil cerca de 51 mil pessoas morrem todos os anos em decorrência da poluição do ar e isto é agravado devido ao fato de que historicamente a poluição do ar está ligada diretamente a uma questão ambiental, mas não é isto que é visto com os avanços dos conhecimentos científicos e que deve ser tratado de forma mais ampla. Para se ter um desenvolvimento mais sustentável se faz necessário que temas como economia, saúde e clima sejam levados em consideração para um melhor entendimento e gestão da poluição do ar. (Simoni, W. et al. 2021.)

Já no tocante a qualidade de água no Brasil, estudos apontam que o tratamento de esgoto insuficiente e a poluição oriunda da indústria e da agricultura são as maiores problemáticas neste meio (Souza MM, 2014). Em um estudo realizado pela ONG SOS Mata Atlântica em 7 estados brasileiros, apenas 11% dos rios monitorados foram classificados como bons, sendo todos localizados em áreas de proteção ambiental e com matas ciliares preservadas.

Segundo dados da Agência Nacional de Águas (ANA), que alerta que das 27 unidades federativas apenas 17 fazem o monitoramento da água, 76% dos corpos d'água apresentam qualidade boa, 6% foram classificados com ruim e 1% como péssimo, já em área urbanas a

quantidade de corpos considerados bons cai drasticamente para 24%, enquanto os ruins ou péssimos sobem para 32% e 12%, respectivamente. Este mesmo estudo também revelou que apenas 658 pontos de análise, em todo o território brasileiro, possui uma série histórica longa o suficiente para se realizar um estudo no qual diz se o corpo hídrico apresenta melhora ou piora na sua qualidade, e teve como resultado que 8% apresentam tendência de melhora e 5% de piora. (BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2014)

2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS

É possível observar ao redor do mundo um grande aumento nas atividades ligadas a Indústria. Este crescimento tem provocado um aumento significativo na poluição e afetado diretamente os seres humanos e principalmente o meio ambiente, causando mudanças significativas no modo como as pessoas vivem e lidam com as coisas ao seu redor (LUCAS; BENATTI et al., 2008)

Uma das principais formas com que as Indústrias têm contribuído para a poluição é através dos resíduos sólidos, que geram problemas ambientais e socioeconômicos graves. O resíduo sólido é um problema que estão envolvidos desde 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).

Em uma linha de produção eficaz a quantidade de resíduos sólidos gerados deve ser a menor possível, pois quanto mais resíduos são gerados maior é a perda de matéria prima e insumos, o que quase sempre representa perdas (LUCAS; BENATTI et al., 2008; JACOMINO et al., 2002). Contudo, os resíduos sólidos não são gerados apenas na etapa de produção, se apresentando como um subproduto, nas atividades industriais os sistemas de tratamento de água e de emissões atmosféricas são grandes geradores de resíduos sólidos também (LUCAS; BENATTI et al., 2008; OLIVEIRA; LANGE, 2005).

2.4. RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Os resíduos provenientes da agricultura, indústria têxtil, de papel, automobilística e de beneficiamento de metais, são denominados como sendo Resíduos Agroindustriais, e por ter uma geração concentrada, devido à alta demanda do mercado nestes seguimentos, a sua reutilização se torna mais fácil (PEREIRA et al., 2012; JOHN, 2000)

Os benefícios promovidos aos seres humanos, provenientes da atividade agroindustrial, são inúmeros e vitais para a existência de civilizações como hoje as conhecemos, embora tenha tamanha importância a mesma é responsável pela exploração de recursos naturais e,

consequentemente, geração de resíduos e rejeitos agroindustriais provenientes das diversas etapas de produção dos produtos finais. (BALDAN, 2015).

A reutilização dos resíduos oriundos das etapas de produção poderia diminuir, significativamente, os impactos ambientais e, de forma conjunta, o custo agregado da indústria (CALDAS, 2016). A reutilização dos resíduos agroindustriais é uma questão fundamental para a melhoria do ambiente, tanto pelo aspecto de que haverá uma redução no consumo de recursos naturais como na diminuição dos impactos socioambientais gerados pela disposição final dos resíduos (CALDAS, et al., 2016; MARTINS et al., 2000).

O mercado vem sendo cada vez mais pressionado a proporcionar uma destinação ou utilização adequada aos resíduos, tanto por parte dos órgãos de fiscalização, das agências ambientais e da concorrência que, está cada vez maior no mercado, tanto para baratear mais o produto quanto por conseguir mais certificações ambientais, e com isto vem sendo cada vez mais frequente a produção de estudos que visem a utilização dos resíduos agroindustriais (ANDRADE, 2016).

2.5. ARGAMASSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As argamassas são amplamente utilizadas e difundidas na construção civil, sendo constituída principalmente por cimento, agregado miúdo e água, e podendo ser acrescentado aditivos e adições, possui ótima trabalhabilidade, elevada durabilidade, podendo ser “dosado” de diversas formas para atender as especificidades de diferentes projetos, e possui resistência mecânica aos esforços de cisalhamento e compressão. Os próprios descartes da construção civil podem proporcionar a descoberta de novos materiais e de novas composições nas quais podem acarretar mudanças em suas características mecânicas, como por exemplo, o incremento das cinzas provenientes da queima da madeira em alto forno (NETO, 2020).

O cimento *Portland*, hoje, é utilizado como o principal aglomerante para a argamassa na construção civil. As argamassas possuem diferentes características e podem ser utilizadas em diversas etapas da obra, sendo utilizada principalmente para o assentamento dos blocos de alvenaria, assentamento cerâmico, revestimento de paredes e tetos, contrapisos e reparos estruturais. Para poder determinar os parâmetros de uma argamassa é necessário a realização de diversas propriedades, tanto em seu estado fresco quando no endurecido. (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

Pode-se a densidade, a absorção e a trabalhabilidade como as propriedades fundamentais da argamassa. De acordo com a NBR 13281 (ABNT, 2005) que trata das especificações das argamassas, elas são qualificadas de acordo com as 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 propriedade que determina o quão fácil é misturar, transportar e aplicar a argamassa, em seu estado fresco, é conhecida como trabalhabilidade. Esta propriedade depende de outras propriedades para poder ser determinada, podendo variar de acordo com a finalidade para a qual será destinada, sendo necessário que primeiro se determine a plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa, adesão inicial e consistência, para só depois conseguirmos chegar a um valor para a trabalhabilidade (MATOS, GUIMARÃES et al., 2017; CARASEK, 2007).

Uma das propriedades conhecidas da argamassa é a sua rápida aquisição de resistência a compressão, proporcionando o assentamento de vários blocos de uma única vez, de igual forma, ao decorrer do tempo a sua resistência vai aumentando cada vez mais até atingir a resistência exigida em projeto. Mesmo com isso, não se faz necessário que sejam projetadas argamassas com resistências muito elevadas para o assentamento de paredes para garantir a sua integridade, todavia a resistência da argamassa nunca deve ser superior à do bloco empregado no levante da alvenaria (CARASEK, 2007). As propriedades mecânicas das argamassas devem ser conferidas através de ensaios de resistência à tração e a compressão, de acordo com a (ABNT, 2005) (MATOS, GUIMARÃES, 2017).

2.6. REAÇÃO POZOLÂNICA

Entende-se como pozolana o 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) (ACI, 2002).

A NBR 12653 define que pozolanas são materiais que contém consideráveis teores de sílica ou alumina em sua forma reativa (ABNT, 2014). 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).

2.7. AGLOMERANTE: CIMENTO

O cimento *Portland* pode ser definido como sendo um pó fino, tendo uma espessura média de 25 μm , e possui propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que quando na presença de água ou umidade tende a endurecer. Esta característica de endurecimento do cimento *Portland* de endurecer é irreversível, ou seja, após endurecido mesmo que exposto a água ele não retorna ao seu estado fresco. O cimento pode ter diversas destinações a depender de como ele é misturado com outros materiais, como por exemplo a agregado miúdo, a brita, seixo, pó-de-pedra, cal, aditivos e adições, resultando em diversos tipos de concretos e argamassas, com características e aplicabilidades diferentes, podem ser utilizados em casas, pisos, edifícios, pontos e obras de arte (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Contudo, é importante salientar que as características e propriedades destes concretos e argamassas, oriundo de misturas, irá depender diretamente da qualidade dos materiais aplicados. Apesar disso, o cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico, e exerce um papel fundamental na transformação das misturas que compõem o concreto e argamassas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Atualmente, no mercado brasileiro, existem 11 tipos de cimento, sendo eles: I - CP I – Cimento *Portland* Comum; II - CP I-S – Cimento *Portland* Comum com Adição; III - CP II-E – Cimento *Portland* Composto com Escória; IV - CP II-Z – Cimento *Portland* Composto com Pozolana; V - CP II-F – Cimento *Portland* Composto com Fíler; VI - Cimento *Portland* de Alto-Forno (CP III); VII - Cimento *Portland* Pozolânico (CP IV); VIII - Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI); IX - Cimento *Portland* Resistente a Sulfatos (RS); X - Cimento *Portland* de Baixo Calor de Hidratação (BC); e XI - Cimento *Portland* Branco (CPB), sendo que o mais utilizado é o CP II-F (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

O cimento *Portland* do tipo CP-II F pode ser empregado de diversas formas, como em argamassas de assentamentos, de revestimento, em estruturas de concreto armado, solo-cimento, pisos e pavimentos de concreto. Este cimento é composto de 6% a 10% de material carbonático ou Fíler, e respectivo restante, a depender da quantidade de Fíler, pode variar entre 90% e 94%, tendo classe de resistência entre 25, 32 e 40 MPa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

3. METODOLOGIA

3.1. TIPO DE PESQUISA

O material utilizado nesta pesquisa será as cinzas de alto forno provenientes da queima de eucalipto utilizado na linha de produção de carvoarias em Palmas, Tocantins. A evolução metodológica dos procedimentos realizados estão presentes da Figura 1.

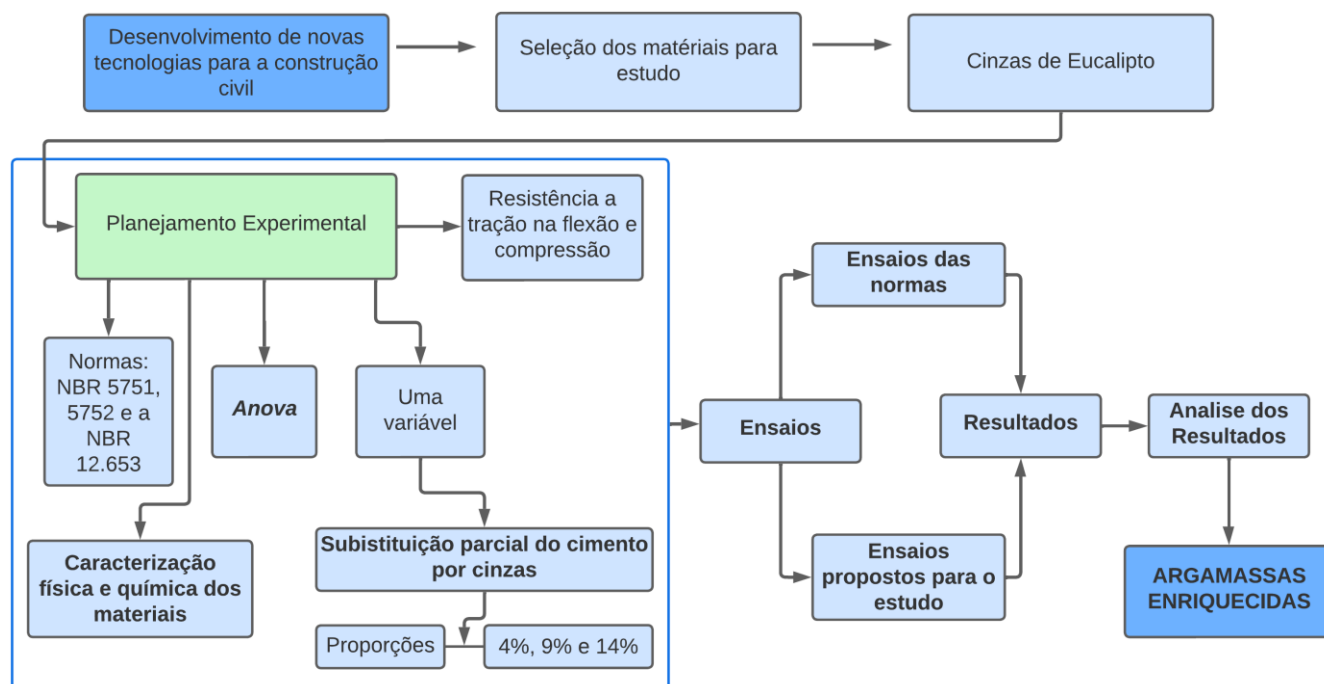


Figura 1 - Fluxograma de como as atividades serão desenvolvidas

Fonte: Autor (2022)

3.2. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental do presente trabalho utilizou como base o software *Protimiza Experimental Design*, referente ao planejamento multivariável do Delineamento Composto Central (DCC), sendo considerado como Fator 1 a porcentagem de cinzas que irão substituir o cimento e o Fator 2 o tempo, em dias, em que os corpos de prova irão passar em cura úmida por imersão. Tendo por finalidade observar o comportamento dos corpos de prova ao serem expostos aos ensaios físicos e mecânicos, de acordo com a Figura 2.

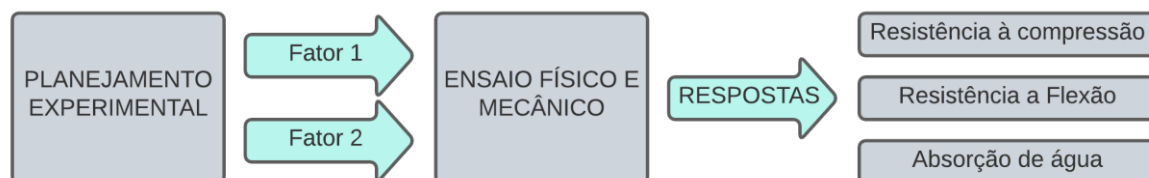


Figura 2 - Planejamento por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Fonte: Autor (2022)

Neste estudo iremos realizar o estudo dos dados através de análises estatísticas com a ANOVA e o Teste-t. A repetição genuína que aqui será aplicada e de 3, devido ao fato de que o ensaio de bancada será repetido 3 vezes.

A quantidade de dias em cura úmida por imersões que os corpos de prova irão passar foi determinado pela norma NBR 13276 (ABNT) e o percentual de cinzas foi determinado através de literatura. Na sequência foi realizado o planejamento, número de ensaios, ensaios de bancada e análise de resultado dos ensaios.

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

Tabela 1 – Fatores e níveis utilizados no planejamento experimental

Fatores	Níveis		
	(-1)	0	(+1)
% de cinzas substituindo o cimento	4	9	14
Tempo de cura úmida por imersão, em dias	7	14	28

Fonte: Autor (2022)

Posteriormente foi determinado a ordem dos experimentos empregados no planejamento experimental, como mostra a Tabela 3.

Tabela 2 – Ordem dos experimentos

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

Fonte: Autor (2022)

A quantidade de corpos de prova fora determinada de acordo com o Delineamento Composto Central (DCC), com total de 21 corpos de prova prismáticos de argamassa com dimensões de 4x4x16cm, nas quantidades descritas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Quantidade de corpos de prova de acordo com os fatores

% de cinzas substituídas pelo cimento	Quantidade de corpos de prova (Un)	Tempo de cura (dias)
4%	1	7
	1	28
8%	3	14
12%	1	7
	1	28

Fonte: Autor (2022)

A quantidade de materiais que será utilizado para a confecção de cada traço, será calculada a partir da substituição parcial da massa do cimento como também dos valores obtidos da caracterização dos próprios materiais.

3.3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material que será utilizado neste trabalho são o cimento, agregado miúdo, cinzas, cal e aditivo plastificante. Sendo o cimento do tipo *Portland* CP-II F 32, o agregado miúdo é do tipo média, as cinzas serão recolhidas em um instruída de produção de carvão vegetal, no Estado do Tocantins, e a Cal é do tipo hidratada, sendo que, com exceção da cinza, todos estão disponíveis no IFTO.

Assim como, os equipamentos e utensílios, também serão 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; Erlenmeyer; 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 envolveram o experimento serão 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; NBR NM 12653:2014 - Materiais pozolânicos; ABNT NBR 5752:2014 - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e; ABNT NBR 5751:2014 - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.

Já no laboratório de águas, os ensaios feitos, seguindo suas respectivas normas citadas a seguir, serão: teste de pH; determinação da densidade aparente das cinzas; determinação do teor de umidade das cinzas.

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 parente.

O procedimento de aferição do pH das cinzas, será determinado de acordo com a norma JIS K 1474. O procedimento consistiu em adicionar a um Erlenmeyer de 200 ml, 1 g de cinza e 100 ml de água deionizadas.

Por fim, o teor de umidade (%) das cinzas, será determinado em conformidade com a norma ASTM D 3173-85 e de acordo com a Equação 1.

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

3.3.2. PREPARAÇÃO DO MATERIAL

As cinzas foram coletadas em uma cerâmica no Taquaralto, na cidade de Palmas-TO, de onde foram transportadas e guardadas no IFTO-Campus Palmas. Para que pudessem ser utilizadas foram realizados diversos peneiramentos, para ir retirando o carvão que não foi queimando por completo. Retirado estes torrões o material passou por uma moagem em um moinho mecânico por 10 minutos, após o material era retirado e passava por um peneiramento manual nas peneiras de 300µm, 150µm, 75µm e 45µm, sendo que o material utilizado em todos os ensaios era somente o passante na última peneira. Na figura 3, 4 e 5 é possível visualizar o material após ter passado por cada etapa acima mencionada. Na Figura 3 são os torrões de carvão que não queimaram completamente, na Figura 4 o material obtido após a moagem, na Figura 5 o material obtido após o peneiramento manual na peneira de 75µm.



Figura 3 – Torrões de carvão
Fonte: Autor (2022)



Figura 4 – Cinza após moagem
Fonte: Autor (2022)

Figura 5 – Cinza após o peneiramento manual na peneira de 75 μ m



Fonte: Autor (2022)

3.3.3. TRAÇO PADRÃO

Na realização dos ensaios foi adotado um traço como padrão e a partir dele determinou-se a quantidade de material em cada ensaio, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidade de material por traço

	Padrão	4%	9%	14%
Cimento (g)	1000,00	960,00	910,00	860,00
Areia média (g)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Areia Fina (g)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Aditivo (g)	2,06	2,06	2,06	2,06
Água (g)	675,00	675,00	675,00	675,00
Cal (g)	500,00	675,00	675,00	675,00
Cinza (g)	0,00	40,00	90,00	140,00

Fonte: (Autor 2022)

3.4. ENSAIO MECÂNICO DE RESISTÊNCIA

Os corpos de prova serão submetidos primeiramente ao ensaio de tração na flexão, onde cada um será 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.

Posteriormente, serão submetidos ao ensaio de compressão, aplicando uma força axial em ambas as metades dos corpos de prova do ensaio de flexão. Ambos os ensaios serão 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.

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.

$$\frac{M_{sat}-M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

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

M_s = massa do corpo-de-prova seco;

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho serão apresentados de acordo com a ordem em que cada ensaio foi executado, de forma a proporcionar um melhor entendimento.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS MATERIAIS

A Tabela 5 mostra os dados obtidos na caracterização dos materiais.

Tabela 5 - Caracterização dos materiais

Características	Dados
Massa específica do cimento (g/cm ³)	3,07
Massa específica da cal (g/cm ³)	3,08
Massa específica das cinzas (g/cm ³)	3,23
Massa específica da areia (g/cm ³)	2,66
Massa unitária da areia (g/cm ³)	1,46
Módulo de finura da areia (g/cm ³)	1,95
Dimensão máxima (mm)	2,38

Fonte: Autor (2022).

O ensaio para a determinação do pH das cinzas, foi realizado de acordo com a norma JIS K 1474. O procedimento consistiu em adicionar a um elermeyer de 200 mL, 1 g de cinza e 100 mL de água deionizadas.

A mistura foi aquecida e permaneceu 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 pHmetro de marca Orion Star, modelo A201, e obteve como resultado de um pH de 13,37. Com o resultado obtido pode ser aferido que as cinzas possuem um pH alcalino.

4.2. DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL AOS SETE DIAS (ABNT NBR 5751)

Este ensaio reproduzido de acordo com a ABNT NBR 5751 tem como objetivo determinar a atividade pozolânica das cinzas que aqui foram utilizadas. Tendo sido moldado três corpos de prova, os quais foram rompidos após 7 dias em cura úmida. A Tabela 06 expressa os resultados após terem sido testadas em relação a carga suportada no ensaio de resistência a compressão.

Tabela 6 – Resultado do teste de resistência a compressão

Corpo de Prova	Força de Ruptura (Kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)	Def. Especif. Ruptura (%)
1	271,5	1,36	1,08
2	264,2	1,32	0,75
3	236,3	1,23	0,89
Resistência Média (MPa)	1,30		
Desvio Relativo Máximo (%)	5,11		

Fonte: Autor (2022).

A ABNT NBR 5751 exige que o resultado seja apresentado com a resistência individual de cada corpo de prova, a resistência média e que o desvio relativo máximo não tenha sido superior a 6%. Por tanto o resultado aqui obtido satisfaz todos estes requisitos. Por tanto a resistência média foi de 1,3 MPa.

4.3. MATERIAIS POZOLÂNICOS — DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS (ABNT NBR 5752)

A outra forma de determinar a pozolanicidade de um material é através da ABNT NBR 5752 que determina o índice de desempenho por meio de ensaios feitos com o cimento *Portland* CP II-F-32. A própria norma determina a quantidade de material em cada traço, sendo que são dois, uma tração padrão, sem adição do material estudado, e um outro com adição do material pozolânico, conforme Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Quantitativo de material utilizado em cada argamassa

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material pozolânico	-	156 ± 0,2
Areia normal	1872	1872
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo superplastificante	-	

Fonte: ABNT NBR 5752:2014

Ainda de acordo com a norma especifica os corpos de prova foram moldados, curados e rompidos, obtendo os seguintes resultados expressos na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado do teste de resistência a compressão

	Corpo de Prova	Tensão de Ruptura (MPa)
Grupo A (Padrão)	1	13,05
	2	10,31
	3	11,91
	4	12,78
Grupo B (Acréscimo de cinza)	1	9,2
	2	11,44
	4	8,79
Grupo B (Acréscimo de cinza)	5	10,39
	6	9,48
	7	11,33
f_{cB} (MPa)	10,105	
f_{cA} (MPa)	12,0125	
$I_{cimento}$ (%)	84,1207076	

Fonte: **Autor (2022)**

Onde $I_{cimento}$ é o índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias e é obtido através da seguinte equação:

$$I_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

O f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados somente com cimento *Portland* e f_{cB} são os corpos de prova moldados com o acréscimo de cinzas. Por tanto o $I_{cimento}$ é de 84,12 %.

4.4. ATENDIMENTO A NORMA ABNT NBR 12653/2014 – MATERIAL POZOLÂNCOS – REQUISITOS

A norma ABNT NBR 12653/2014 traz em sua tabela 2, Tabela 9 abaixo, os requisitos físicos mínimos para que um material possa ser considerado como pozolânico e utilizado em substituição ao cimento.

Tabela 9 – Requisitos físicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μ m	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751

Fonte: ABNT NBR 12653:2014

Ao aplicarmos os resultados dos ensaios mencionados acima na presente Tabela, podemos aferir que a cinza não possui características pozolânicas, pois no ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle, o resultado foi de 84,12% inferior a 90%, que é o mínimo exigido. Já a atividade pozolânica com cal aos sete dias obteve uma resistência média de 1,3 MPa também inferior aos 6 MPa exigidos em norma. A única característica aprovada pela norma é a sua finura da cinza, pois todo o material utilizado foi o passante na peneira de 45 μm .

4.5. ENSAIO DE TRAÇÃO A FLEXÃO

Os resultados experimentais obtidos no ensaio de resistência mecânica de tração na flexão, estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados obtidos através dos ensaios de tração na flexão (MPa)

	7 dias	14 dias	28 dias
4%	4,1	-	4,0
	4,4	-	4,1
	5,3	-	4,6
9%	-	4,3	-
	-	4,2	-
	-	4,2	-
	-	3,4	-
	-	4,3	-
	7 dias	14 dias	28 dias
9%	-	4,3	-
	-	5,5	-
	-	6,0	-
	-	6,1	-
14%	4,0	-	2,9
	3,3	-	2,4
	4,4	-	3,7

Fonte: Autor (2022).

Observando a Tabela 10 é possível aferir que a maior resistência mecânica de tração na flexão, tratando estatisticamente, foram nos ensaios em que ocorreu a substituição do cimento em 9%, em relação a quantidade de cinzas na mistura, e tempo de cura de 14 dias tendo como resultado médio de 4,7 MPa, e a menor resistência atingida no traço em que se teve uma substituição de 14% e tempo de cura de 7 dias, tendo de resultado 3,0 MPa de resistência média neste grupo.

Os valores satisfatórios de resistência de tração na flexão são confirmados conforme Tabela 3 da NBR 13281/2005, Tabela11 a seguir.

Tabela 11 - Tabela 3 da ABNT NBR 13281/2005

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de ensaio
R1	$\leq 1,5$	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 13281/2005

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

Tabela 12 – ANOVA, ensaio de tração a flexão

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7,242857	4	1,810714	3,073348	0,046813	3,00617
Dentro dos grupos	9,426666	16	0,589166			
Total	16,66952381	20				

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 12 é possível observar que o valor-P está próximo a zero, o que nos indica que há diferença significativa entre os dados tratados.

4.6. ENSAIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Os resultados experimentais obtidos no ensaio de resistência mecânica a compressão, estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados obtidos através dos ensaios de resistência a compressão (MPa)

	7 dias	14 dias	28 dias
4%	16,88	-	15,75
	16,7	-	14,92
	16,36	-	16,02
	7 dias	14 dias	28 dias
9%	-	16,7	-
	-	16,79	-
	-	15,34	-
	-	17,74	-
	-	15,2	-
	-	15,94	-
	-	20,71	-
	-	21,22	-
	-	23,14	-
14%	11,08	-	8,42
	13,78	-	14,08
	14,04	-	8,17

Fonte: Autor (2022).

A partir da Tabela 13 é possível observarmos que a maior resistência a compressão se deu no grupo em que se teve uma substituição de 9% de cimento por cinzas e um tempo de cura de 14 dias, onde obteve uma resistência média de 18,08 MPa. Já o grupo que teve o pior desempenho foi aquele no qual a porcentagem de substituição foi de 14% e tempo de cura de 28 dias, onde se tem uma média de 10,22 MPa.

Quando comparadas com os requisitos mínimos necessários de resistência perante Tabela 1 da NBR 13281, Tabela 14 a seguir, estão dentro dos parâmetros

Tabela 14 - Tabela 1 da ABNT NBR 13281/2005

Classe	Resistência a Compressão	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 13281/2005

A Tabela 15 apresenta a ANOVA (Analysis of Variance) para a resistência mecânica a compressão.

Tabela 15 - ANOVA, ensaio de resistência a compressão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	166,38045	4	41,59511	7,00865	0,00185	3,00692
Dentro dos grupos	94,95727	16	5,93483			
Total	261,33771	20				

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 15 é possível observar que o valor-P está próximo a zero, o que nos indica que há diferença significativa entre os dados tratados.

4.7. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Os resultados obtidos através dos experimentos, para os ensaios de absorção de água, estão apresentados nas Tabelas 16, 17 e 18 abaixo.

Tabela 16 – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 4% de cimento

Corpo de prova	4%		
	Massa Seca	Massa úmida	Taxa de Absorção (%)
1	486,9	534,7	9,82%
2	500	548,6	9,72%
3	478,4	525,4	9,82%
	$\bar{x}$		9,79%

Fonte: Autor (2022).

Tabela 17 – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 9% de cimento

Corpo de prova	9%		
	Massa Seca	Massa úmida	Taxa de Absorção (%)
1	487,8	534,4	9,55%
2	489,7	537,7	9,80%
3	486,2	533,2	9,67%
	$\bar{x}$		9,67%

Fonte: Autor (2022).**Tabela 18** – Resultados ensaio de absorção de água, corpos de prova com substituição de 9% de cimento

Corpo de prova	14%		
	Massa Seca	Massa úmida	Taxa de Absorção (%)
1	452,5	504,6	11,51%
2	455,6	508,4	11,59%
3	466,1	515,8	10,66%
	$\bar{x}$		11,26%

Fonte: Autor (2022).

Foi possível observar que entre as três porcentagens de substituição de cimento a que apresentou o melhor resultado, ou seja, a que apresentou a menor taxa de absorção, ocorreu nos traços em que se realizou uma substituição parcial de 9% de cimento por cinzas. Já aqueles em que procederam com a substituição de 14% tiveram os piores resultado encontrados.

Quando comparados os resultados das Tabelas 16, 17 e 18 com um traço testemunho, que de acordo com JÚNIOR (2011), obteve uma taxa de absorção de 17,01%, é possível notarmos que há efeitos positivos na substituição parcial de cimento por cinzas, em especial no traço em que ocorreu a taxa de substituição de 9%. Para validar os resultados obtidos, os dados foram tratados com ANOVA e o resultado está apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – ANOVA, ensaio de absorção de água por imersão

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000466877	2	0,000233438	24,70355246	0,00127	5,143253
Dentro dos grupos	5,66975E-05	6	9,44959E-06			
Total	0,000523574	8				

Fonte: Autor (2022).

Segundo a análise estatística, através da ANOVA, é possível demonstrar que há diferença significativa entre os dados obtidos, por tanto, de fato, o melhor resultado é aquele em que há uma substituição de 9% de cinza em relação ao cimento.

4.8. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONOMICA E REDUÇÃO DE CO₂

Tomando como exemplo um estudo realizado por LIMA et al (2018), em que se concluiu que para a edificação de uma casa de 40 m², uma habitação popular, se utiliza em média 6 toneladas de cimento e para a produção de uma tonelada de cimento são emitidas 968,8 kg de

CO₂, por tanto para a produção de cimento necessário para a construção de uma habitação residencial seriam emitidos 5.812,8 kg de CO₂, os quais poderiam ser reduzidos a 5.231,52 kg caso houvesse uma substituição de 9% de cimento por cinzas.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional, só em 2021 foram entregues 384,1 mil moradias populares no Brasil, levando em consideração estes números, somente em 2021, a produção de cimento para a utilização na construção de residências populares, e entregues a população no Brasil, foi o responsável pela emissão de 2,232 milhões de toneladas de CO₂. De acordo com os dados divulgados Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG), a quantidade bruta de CO₂ em 2021 foi de 2,42 bilhões de toneladas, por tanto, levando em considerações os dados aqui analisados, somente a produção de cimento utilizado na construção de habitações populacionais no Brasil foi responsável pela emissão de 0,1% de todo o CO₂ produzido em 2021. Essa produção poderia ser reduzida a 0,091% caso houvesse a substituição de 9% do cimento por cinzas.

Tendo ainda como exemplo os dados acima mencionados, em 2021 foram utilizadas 2,304 milhões de toneladas de cimento para a construção de moradias populares, no mesmo período, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), um saco de 50 kg de cimento custava em média, no Brasil, R\$27,98, por tanto foram gastos R\$ 1.289.318,40 com cimento neste período. Caso houvesse nestas construções uma substituição parcial de 9% do cimento por cinzas, o valor gasta com cimento seria de R\$ 1.173.279,74, ou seja, uma economia de R\$ 116.038,65, que poderiam ter sido utilizados para a aquisição de mais 4.147 mil sacos de cimento. Quantidade essa que, se fosse economizada, seria o suficiente para a compra de cimento para a produção de pelo menos mais 34,5 mil casas populares, somente no ano de 2021.

5. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho é apontar se há vantagens na substituição de cimento por cinzas em benefício a sustentabilidade e se essa substituição também pode vir a produzir alguma economia para a obra. Para chegar ao resultado aqui almejados foi necessário a execução de cinco experimentos principais, sendo eles, determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias, determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias, ensaio de tração na flexão, ensaio de compressão e absorção de água por imersão.

De acordo com a ABNT NBR 12653:2014 não é possível realizar a substituição de cimento por cinzas em argamassas de assentamento, já que as cinzas não possuem características pozolânicas mínimas exigidas, tendo reprovado nos ensaios de determinação do índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias, determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. A granulometria do material não foi levada em conta pois todo o material utilizado era o passante na peneira de 45 μm .

Porém os ensaios mecânicos obtiveram resultados satisfatórios, já que os corpos de prova em que houveram substituição de 9% de cimento por cinzas obtiveram um bom desempenho, quando comparada com os requisitos exigidos pela ABNT NBR 13281/2005, tanto no ensaio de resistência a compressão quanto no de resistência a tração na flexão.

Também é possível extrair dos dados que nos traços em que foram rompidos com 7 e 28 dias, no caso dos traços com substituição de 7% e 14%, os resultados não tiveram uma variação significativa, pois ao aplicar um Teste-t de duas amostras em par para médias foi obtido um *valor-P* próximo a zero, podendo indicar que as cinzas podem ter características de aceleradores de pega. Contudo, é importante salientar que para validar esta característica é necessário realizar um estudo próprio para tal.

Desse modo, os resultados aqui obtidos puderam nos elucidar que do ponto de vista da sustentabilidade é interessante realizar a substituição parcial do cimento *Portland* por outro material, que neste trabalho foram as cinzas provenientes da queima de eucalipto como forma de combustível em fabricas de cerâmica em Palmas-TO, para que desta forma haja a redução na produção de cimento e, conseqüentemente, a redução na produção de CO₂. Assim abrindo uma porta para o seguinte debate: em benefício da sustentabilidade e economia, é possível rever normas da construção civil?

6. REFERÊNCIAS

De Simoni, W. *et al.* 2021. “O Estado da Qualidade do Ar no Brasil”. Working Paper. São Paulo, Brasil: WRI Brasil. Disponível online em <https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>

Souza MM, Gastaldini MCC. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. Eng Sanit Ambient 2014; 19(3):263-274.

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_arttext&pid=S151770762016000200321&lng=pt&tlng=pt . Acesso em: 17 maio. 2022.

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 poliuretana 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: 28 janeiro 2022.

BIFF, Sergio; SILVA, Manoel Ribeiro da. Uso do resíduo sólido proveniente do processo de beneficiamento de agregado miúdo 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 (Sci- ELO). <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%20resiste%20aos,ca be%20aos%20blocos%20de%20alvenaria.> . Acesso em: 27/03/2022.

CARASEK, Helena et al. Parâmetros da agregado miúdo 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.

DALE P. BENTZ; – **National Institute of Standards and Technology , Gaurav Sant and Jason Weiss - Purdue University : Early-Age Properties of Cement-Based Materials. I : Influence of Cement Fineness** - ASCE Journal of Materials in Civil Engineering / July 2008 Parte I <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/build08/PDF/b08007.pdf>

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. Acesso em 16 de fevereiro de 2022 <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.071>.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. "Biomassa"; *Brasil Escola*. Disponível em: <https://brasilestola.uol.com.br/geografia/biomassa.htm>. Acesso em 25 de janeiro de 2022.

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>

LIMA, E. M.; FERNANDES, ROGÉRIO TAYGRA VASCONCELOS; DANTAS, S. L. Quantificação de CO2 emitido decorrente dos materiais empregados na construção de uma residência unifamiliar. In: **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**. 2018. https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/171_qdceddmencduru.pdf

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 maio. 2022.

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.

Relatório anual 2013. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf> . Acesso em: 07 nov. 2022.

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 maio. 2022.

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-sobepara-12-em-marco> . Acesso em: 20/02/2022.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050**. Paris, 2010.