



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA EMANUELLY DA SILVA MATIAS

**COMPORTAMENTO DE MATRIZ CIMENTÍCIA CONFECCIONADA COM
RESÍDUO DE VIDRO PROCESSADO**

ANGICOS

2024

CAMILA EMANUELLY DA SILVA MATIAS

**COMPORTAMENTO DE MATRIZ CIMENTÍCIA CONFECCIONADA COM
RESÍDUO DE VIDRO PROCESSADO**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Sâmea Valenska Alves Barros,
Prof(a). Dra.

ANGICOS

2024

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)



O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

CAMILA EMANUELLY DA SILVA MATIAS

**COMPORTAMENTO DE MATRIZ CIMENTÍCIA CONFECCIONADA COM
RESÍDUO DE VIDRO PROCESSADO**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Sâmea Valenska Alves Barros, Prof(a). Dra. (UFERSA)
Presidente

Kleber Cavalcanti Cabral, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Gerbeson Carlos Batista Dantas, Mestre em engenharia
(Membro externo)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Venho por meio desse meu trabalho agradecer primeiramente á Deus por ter me dado discernimento para chegar até aqui, por me permitir ultrapassar os obstáculos encontrados ao longo do meu trajeto.

A minha eterna gratidão a minha mãe Francisca Luciléia da Silva e minha avó Antônia Neide da Silva Barbosa por todo apoio, incentivo e compreensão, tudo o que sou e consegui até hoje é fruto dos ensinamentos delas, espero recompensar todo esforço. Agradecer a toda a minha família que esteve presente nesse processo. Muito obrigada.

Gostaria de agradecer a minha orientadora a professora doutora Sâmea valenska Alves Barros, por esses anos de conhecimento, por despertar em mim o interesse pela pesquisa, a começar pela iniciação científica que hoje é fruto desse trabalho. Por me orientar e ter desempenhado essa função com dedicação, paciência e competência.

Agradecer aos professores em geral, responsáveis por todo conhecimento adquirido durante esses anos, em especial aos doutores Kleber Cabral, Luis Henrique e Arthur Gomes pela troca de conhecimento, o incentivo e o carinho dentro e fora de sala de aula.

Gostaria de agradecer também ao meu noivo Nadson Rafael que traçou essa trajetória juntamente comigo segurando firme na minha mão, me apoiando em todos os momentos e não me deixando fraquejar.

Gostaria de agradecer também a UFERSA campus Angicos, por todo acolhimento, por ter sido minha morada por todos esses anos, sentirei muita falta.

Por fim, mas não menos importante quero agradecer em especial aos meus amigos Iany Vanessa e Jalmir de Medeiros que a UFERSA me deu e irei levar para toda a vida, que compartilhou de momentos bons e ruins dentro e fora da UFERSA, que hoje são como irmãos para mim. Muito obrigada por terem feito parte de toda essa trajetória até aqui.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação
determina o que você conquista.”

Aldo Novak

RESUMO

A investigação da viabilidade técnica de transformar resíduos de vidro em matéria prima para produção de argamassas alternativas corrobora com a prática do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável de número 12 (ODS 12). Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do uso de resíduos de vidro coletados no município de Mossoró/RN na resistência à compressão simples de argamassas de complementação de alvenaria, assim como também em seu comportamento diante o ensaio de absorção de água. Os procedimentos metodológicos para o beneficiamento do resíduo utilizado consistiram no uso das técnicas de moagem e peneiramento. A confecção das argamassas alternativas aconteceu utilizando moldes cilíndricos com dimensões (50 X 100) mm com teores de substituição parcial ao cimento Portland de 10% e 15%. A resistência à compressão simples foi determinada seguindo os procedimentos prescritos na NBR 7215 (ABNT, 2019) e a absorção de água conforme NBR 9778 (ABNT, 2005). Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica quanto aos parâmetros determinados nesta pesquisa. E que o aumento do teor de substituição do cimento Portland por resíduos de vidro beneficiado resultou em menor absorção de água, que corresponde uma característica importante para a durabilidade das argamassas propostas aos ataques químicos ambientais, embora não tenha resultado em ganho de resistência à compressão simples, os valores ficaram dentro dos valores permitidos para uso em argamassa de complementação de alvenaria conforme a NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Palavras-chave: Argamassas Alternativas. Sustentabilidade da indústria da AEC. Produção Sustentável.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Preparação da mistura da argamassa	24
Figura 2	–	Resultados aos 28 dias do teste de resistência a compressão simples (RCS)...	26
Figura 3	–	Resultados aos 90 dias do teste de resistência a compressão simples (RCS).....	27
Figura 4	–	Resultados do teste de absorção de água	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Requisitos químicos para classificação de materiais em materiais pozolânicos.....	18
Quadro 2	–	Resíduos utilizados na confecção de matrizes cimentícias alternativas e os resultados obtidos	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Composição química do resíduo de vidro	25
----------	---	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RCS	Resistência a compressão simples
Dr	Doutor
NBR	Norma brasileira
MCS	Materiais cimentícios suplementares
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

@	Arroba
©	Copyright
®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	MATRIZES CIMENTÍCIAS	16
2.2	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND	16
2.2.1	Material Cimentício Suplementar (MCS)	16
2.2.2	Material Pozolânico	17
2.3	MATERIAIS ALTERNATIVOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL	18
3	METODOLOGIA	23
3.1	MATERIAIS	23
3.2	BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE VIDRO	23
3.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE VIDRO BENEFICIADO	23
3.4	PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS	23
3.5	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)	24
3.6	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	24
4	RESULTADOS	25
4.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE VIDRO	25
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS ARGAMASSAS PROPOSTAS	26
4.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS PROPOSTAS	28
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos com as crescentes alterações climáticas e impactos negativos causados na biosfera pelo consumo e produção não sustentável pelos diversos setores econômicos, vem ocorrendo uma maior preocupação com o meio ambiente, principalmente, entre os países integrantes da Organização das Nações Unidas (ONU). Nesta perspectiva, Li *et al.*, (2022) afirmam que a utilização de resíduos sólidos como matéria-prima alternativa para produção de materiais sustentáveis (ecologicamente corretos) se tornou uma preocupação do setor da construção civil.

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental no Brasil, contribuindo significativamente para o progresso econômico e social do país. No entanto, é importante promover a gestão adequada dos resíduos que gera no desenvolvimento de suas atividades, e diminuir o consumo dos recursos naturais. (Oliveira *et al.* 2020).

Oliveira *et al.* (2020) destacam, ainda, que diante deste cenário o setor tem a responsabilidade de encontrar um equilíbrio entre eficiência produtiva e a implementação de ações que promovam o desenvolvimento sustentável, reduzindo os impactos ambientais negativos que causa ao meio ambiente.

Nesta perspectiva, faz-se necessário adotar medidas significativas que levem em consideração a sustentabilidade ambiental e busquem minimizar os efeitos adversos causados pela construção civil pela grande exploração dos recursos naturais e pela geração de uma grande quantidade de resíduos, uma estratégia para a minimização destes impactos causados pela indústria é a reciclagem dos resíduos gerados nas distintas cadeias produtivas para atender as demandas do setor, a exemplo do processamento destes resíduos para uso como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e/ou como pozolana em argamassa.

O resíduo de vidro muitas vezes é descartado inadequadamente no meio ambiente e pode passar a ter valor econômico ao ser processado para uso em outras cadeias produtivas. O que o torna uma opção promissora pois a sua composição mineralógica é rica em sílica na forma não cristalina (amorfa), uma das características que confere ao resíduo de vidro propriedades pozolânicas (Husien *et al.*, 2023).

Ademais, a incorporação de resíduos de vidro em matrizes cimentícias reduz o consumo de cimento, resultando na diminuição da exploração de jazidas de calcário e argila, uma vez

que a produção de clínquer, componente do cimento, envolve a mistura dessas duas matérias-primas (Santos, 2016). Contribuindo para a redução do impacto ambiental associado à extração desses recursos naturais. Logo, percebe-se a importância desta pesquisa por contribuir com a destinação adequada destes resíduos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a resistência à compressão simples e a absorção de água de argamassas alternativas confeccionadas com resíduos de vidro processados através dos processos de moagem e peneiramento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Beneficiar através dos processos de moagem e peneiramento o resíduo de vidro coletado em município do interior do Rio Grande do Norte para estudar sua aplicação em argamassas.
- Estudar a caracterização química do resíduo de vidro beneficiado.
- Analisar a resistência à compressão simples (RCS) da argamassa alternativa proposta determinada para diferentes idades de cura.
- Compreender os valores da absorção de água da argamassa alternativa proposta determinada para diferentes idades de cura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MATRIZES CIMENTÍCIAS

Campos *et al.* (2022) e Silva *et al.* (2013) definem as matrizes cimentícias como materiais compostos por aglomerantes minerais, agregados, que misturados originam pastas, denominados de argamassas e/ou concretos. Estes se diferenciam pelas granulometrias dos agregados utilizados.

O cimento Portland é o material aglomerante mais empregado nas matrizes cimentícias que pode ser substituído parcialmente por adição de alguns materiais podendo ser materiais pozolânicos como por exemplo a sílica ativa, bentonita entre outros, ou por materiais cimentícios suplementares como a escória de alto-forno e as cinzas volantes.

Silva *et al.* (2013) ressaltam as fibras como materiais alternativos para serem incorporados a matrizes cimentícias pois melhoram a resistência à tração, à flexão e ao impacto da matriz. Isso ocorre porque as fibras atuam como reforços estruturais que distribuem melhor as cargas aplicadas sobre o material.

Atualmente, muitos tipos de resíduos estão sendo extensivamente transformados em recursos alternativos para atender as demandas da indústria da construção civil. Dentre esses materiais, Moraes *et al.* (2022) destacam que o resíduo de vidro, por ser um material inorgânico amorfo, que tem como principal componente o óxido de silício (SiO_2) e possui características físicas e químicas que o tornam adequado para substituição parcial em matrizes cimentícias.

Souza (2021) ressalta que o Brasil é o país que mais tem interesse na utilização de resíduos de vidro em matrizes cimentícias, incorporando estes resíduos em substituição parcial do cimento Portland, após sua moagem, pois afirma que fica com propriedades pozolânicas, o que o torna bom o suficiente para compor as misturas cimentícias.

2.2 SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND

2.2.1 Material Cimentício Suplementar (MCS)

A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS) representa uma solução eficaz para diminuir a emissão de dióxido de carbono e reduzir a extração de recursos naturais pela indústria de cimento (Carvalho *et al.*, 2021).

Moraes (2020) define esses materiais cimentícios suplementares como materiais inorgânicos, cujo sua função é contribuir para melhorar as propriedades de uma mistura que contenha cimento na composição, de forma que essa melhoria ocorra por meio de hidratação própria ou por atividade pozolânica. Esses materiais atuam em substituição parcial do cimento, preenchendo os vazios e reduzindo a permeabilidade quando utilizado em proporções adequadas, podendo resultar no melhoramento do desempenho mecânico da mistura.

Costa (2021) descreve em seus estudos os materiais cimentícios suplementares (MCS) como substâncias que atuam como materiais cimentantes, complementando a função do cimento comum em diversas aplicações na construção civil. Esses materiais se comportam de maneira semelhante ao cimento tradicional, pois endurecem ao entrar em contato com a água, formando uma matriz sólida que confere resistência e durabilidade às estruturas.

Essa prática de envolver a incorporação de materiais adicionais ao cimento, contribui não apenas para a sustentabilidade ambiental, mas também pode melhorar as propriedades do produto final (Farias *et al.*, 2023).

2.2.2 Material Pozolânico

Materiais pozolânicos são substâncias originadas de fontes ricas em silício (Si) e alumínio (Al), a atividade pozolânica desses materiais está relacionada a capacidade de reagirem com o hidróxido de cálcio gerado durante a hidratação do cimento Portland. Essa interação resulta em uma reação química que forma silicato de cálcio hidratado (CSH), um componente crucial para a resistência mecânica da pasta cimentícia (Costa, 2021).

Flores (2024) define os materiais pozolânicos como materiais que contêm silicatos ou silico-aluminatos amorfos que apresentam pouca ou nenhuma atividade aglomerante por si só. No entanto, quando misturados com água em temperatura ambiente, esses materiais reagem com o hidróxido de cálcio, gerando substâncias com características cimentantes. Esses materiais eles podem ser de origem natural como por exemplo as rochas vulcânicas ou de resíduos industriais tais como o pó de vidro. A elevada concentração de sílica amorfa no pó de vidro permite que ele reaja com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, conferindo-lhe propriedades pozolânicas (Radwan *et al.*, 2021).

De acordo com a NBR 12653 (2014) os materiais pozolânicos são definidos como substâncias silicosas ou silicoaluminosas que, isoladamente, têm pouca ou nenhuma capacidade de ligação. No entanto, quando adequados em um tamanho com finura adequada e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente, gerando compostos com propriedades ligantes.

Os materiais pozolânicos precisam reagir com água e cálcio para terem a capacidade de agir como ligante, enquanto os materiais cimentícios suplementares (MCS) sozinhos já possuem essa característica (MACEDO, 2022). De forma pode-se observar que qualquer material pozolânico é também um material cimentício suplementar, porém nem todo material cimentício suplementar é pozolânico. Para ser pozolânico, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), deve apresentar os requisitos químicos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Requisitos químicos para classificação de materiais em materiais pozolânicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio(*)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{AlO}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO_3	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na_2O	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25
(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico				

Fonte: NBR 12653 (2014)

2.3 MATERIAIS ALTERNATIVOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL

A indústria da construção civil, apesar de essencial para o desenvolvimento social e econômico, é reconhecida como uma das maiores consumidoras de recursos naturais e energéticos do mundo. Diante dos desafios ambientais e da crescente necessidade de práticas sustentáveis, a busca por materiais alternativos e ecologicamente corretos tem se intensificado. A construção civil é responsável por um volume significativo de resíduos, que muitas vezes são descartados de forma inadequada, gerando impactos negativos para o meio ambiente e a saúde pública. No Brasil, por exemplo, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Resíduos de

Construção e Demolição (RCD) é expressiva, e a gestão desses resíduos representa um desafio para as empresas e o poder público. A falta de planejamento e infraestrutura para o descarte adequado, aliada à disposição irregular em terrenos baldios e áreas protegidas, agrava os problemas ambientais e de saúde pública, como a contaminação do solo e a proliferação de vetores de doenças (Santos *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2022).

A sustentabilidade na construção civil busca atender às necessidades da geração presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprir suas próprias demandas. Esse conceito envolve a utilização de materiais e técnicas construtivas que minimizem o impacto ambiental, promovam a eficiência energética, conservem os recursos naturais e garantam a qualidade de vida da população. A busca por materiais alternativos se alinha aos princípios da economia circular, que visa reduzir o desperdício e maximizar o reaproveitamento de recursos, transformando resíduos em matérias-primas para novos produtos (Brito *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2023).

Diversos materiais alternativos têm sido estudados e aplicados na construção civil. O Quadro 2 apresenta os resíduos mais utilizados nas últimas décadas alguns na confecção de matrizes cimentícias alternativas e os resultados obtidos pelos autores das respectivas pesquisas.

Quadro 2: Resíduos utilizados na confecção de matrizes cimentícias alternativas e os resultados obtidos

Resíduos	Definição do autor
Pó de entulho de construção (<i>Waste Spoil Powder - WSP</i>)	O WSP resulta dos processos de moagem e de tratamento térmico de resíduos da construção civil investigado como substituto parcial do cimento Portland em argamassas. Os resultados demonstraram que podem melhorar as propriedades da argamassa, como resistência, retração e absorção de água (Wu <i>et al.</i> , 2022).

Pó de resíduos de geopolímero (<i>Waste Geopolymer Powder - WGP</i>)	O WGP é proveniente de resíduos de materiais geopoliméricos foi investigado como substituto parcial do cimento Portland. Os resultados levaram a conclusão que apesar de poder afetar negativamente a microestrutura e a resistência da argamassa, a adição de aditivos ativos, como a sílica ativa, pode melhorar o desempenho destas argamassas (Liang <i>et al.</i>, 2023).
Resíduo de vermiculita	A vermiculita, mineral de origem natural, gera resíduos durante seu beneficiamento para sua comercialização. Os estudos mostraram que a incorporação de até 10% de resíduo de vermiculita na argamassa pode melhorar sua resistência à compressão, preenchendo os vazios e aumentando a coesão (Brito <i>et al.</i>, 2023).
Resíduo de caulim	O caulim, utilizado em diversas indústrias, gera resíduos que podem ser aplicados na construção civil. Pesquisas indicam que o resíduo de caulim possui características pozolânicas e pode substituir parcialmente o cimento em concretos, com resultados promissores em termos de resistência e sustentabilidade (Almeida <i>et al.</i>, 2023).

Cinzas da folha de bananeira	As cinzas da folha de bananeira, um resíduo agrícola abundante, têm sido estudadas como material pozolânico em argamassas. Resultados mostram que a adição de cinzas pode aumentar a resistência à compressão da argamassa (Mota <i>et al.</i> , 2020).
Resíduo de lapidação de vidro (RLV)	O RLV, gerado no processo de lapidação de vidro, pode ser incorporado em argamassas como substituto parcial do cimento e do agregado. Estudos indicam que o RLV pode melhorar a resistência à compressão, reduzir a absorção de água e aumentar a durabilidade da argamassa (Santos <i>et al.</i> , 2024).
Pó de vidro reciclado	O pó de vidro reciclado, proveniente de resíduos de vidro, tem sido utilizado como substituto parcial do cimento em argamassas e concretos. Pesquisas demonstram que a incorporação de pó de vidro pode melhorar a resistência à compressão e reduzir o impacto ambiental do descarte de vidro (Moraes <i>et al.</i> , 2022).

Fonte: Autoria própria

A utilização de materiais alternativos na construção civil apresenta desafios, como a necessidade de padronização, desenvolvimento de tecnologias de processamento e avaliação do desempenho a longo prazo. No entanto, as perspectivas futuras são promissoras, com o crescente interesse em práticas sustentáveis e o desenvolvimento de pesquisas que buscam soluções inovadoras para a construção civil no Brasil em consonância com os objetivos do desenvolvimento sustentável.

A incorporação de resíduos e subprodutos industriais em materiais de construção representa uma oportunidade de reduzir o impacto ambiental, promover a economia circular e construir um futuro mais sustentável para o setor (Santos *et al.*, 2024; Almeida *et al.*, 2023; Morais *et al.*, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Os materiais convencionais que foram utilizados neste trabalho são: cimento Portland CP V ARI MAX e areia comercial. Enquanto, o material alternativo utilizado foi garrafas de vidro tipo “*long neck*” variadas coletadas em município do interior do Rio Grande do Norte.

3.2 BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE VIDRO

As garrafas de vidro descartadas inadequadamente (resíduos de vidro) após serem coletados foram lavadas e secas, posteriormente, tiveram sua granulometria modificada, em moinho de bolas no Laboratório do curso de Edificações do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), campus Mossoró.

Após moagem, o material resultante foi passado em peneira de abertura nº 200 da ABNT, separou-se 5g para realização da caracterização química. Este foi utilizado em substituição parcial ao cimento Portland nas proporções de 10% e 15%.

3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE VIDRO BENEFICIADO

A composição química do resíduo de vidro beneficiado foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), usando o equipamento da Shimadzu EDX-720 para obtenção dos óxidos presentes na composição das amostras. Vale salientar que a caracterização química foi realizada no Laboratório de Tecnologia dos Materiais (LTM) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

3.4 PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Foram moldados corpos de prova (CP's) cilíndricos nas dimensões (50 x100) mm no traço 1:3, com teor de substituição parcial ao cimento de 10% e de 15%. E CP's no traço de referência (sem teor de substituição). Conforme as prescrições da NBR 13583 (ABNT, 2014) e da NBR 7215 (ABNT, 2019), a cura ocorreu pelos períodos de 28 dias e 90 dias, em cura úmida. Na figura 1 é apresentado o momento do preparo da mistura da argamassa.

Figura 1 - Preparação da mistura da argamassa



Fonte: autoria própria

3.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

A resistência à compressão simples (RCS) das argamassas propostas foi obtida conforme a norma da NBR 7215 (ABNT, 2019), utilizando a Máquina Universal Emic SSH300.

3.6 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água das argamassas propostas foi determinada conforme o procedimento descrito na norma NBR 9778 (ABNT, 2005), que envolve a imersão dos corpos de prova em água por um período determinado e a medição da variação de massa.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO DE VIDRO

A tabela 1 apresenta a composição química do resíduo de vidro processado estudado.

Tabela 1 – Composição química do resíduo de vidro

Composição química	Porcentagem (%)
SiO ₂	72,19%
CaO	13,50%
Na ₂ O	6,56%
Al ₂ O ₃	3,42%
Fe ₂ O ₃	2,52%
SO ₃	0,18%
Outros	1,63%

Fonte: autoria própria

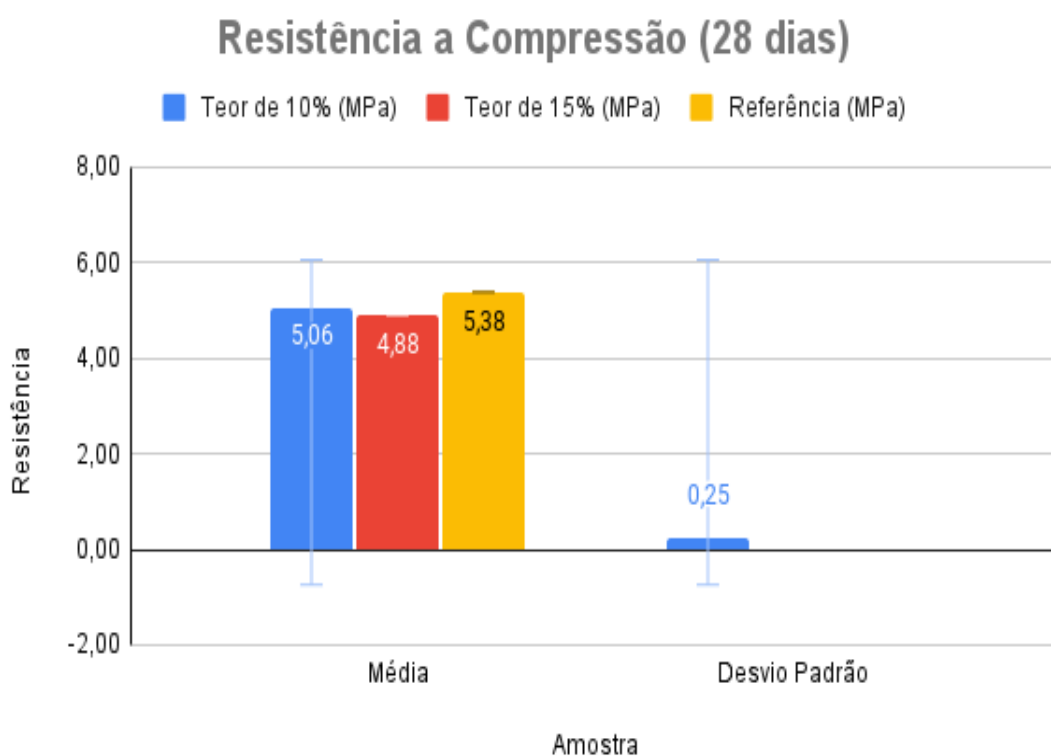
Ao analisar a composição química do resíduo de vidro processado estudado e comparar com os requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2014), verificou-se que ele apresenta alto teor de SiO₂ (72,19%) e que a soma de SiO₂ com Al₂O₃ e Fe₂O₃ $\geq 70\%$ (78,13%) e teor de anidrido sulfúrico (SO₃) ≤ 4 (0,18%) logo pode ser classificado como material pozolânico quando se analisa estes requisitos, porém para afirmar com cem por cento de certeza essa classificação é necessário a realização da determinação da composição mineralógica e verificar se a sílica é amorfa como afirmam Radwan *et al.* (2021).

Os resultados obtidos nesta pesquisa para composição química se assemelham aos obtidos por Jochem *et al.* (2021) que classificaram os resíduos de vidro como material pozolânico diante do requisito apresentado.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DAS ARGAMASSAS PROPOSTAS

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para resistências à compressão simples das argamassas com teores de substituição de 10%; 15% e de referência após 28 dias de cura.

Figura 2 – Resultados aos 28 dias do teste de resistência a compressão simples (RCS)

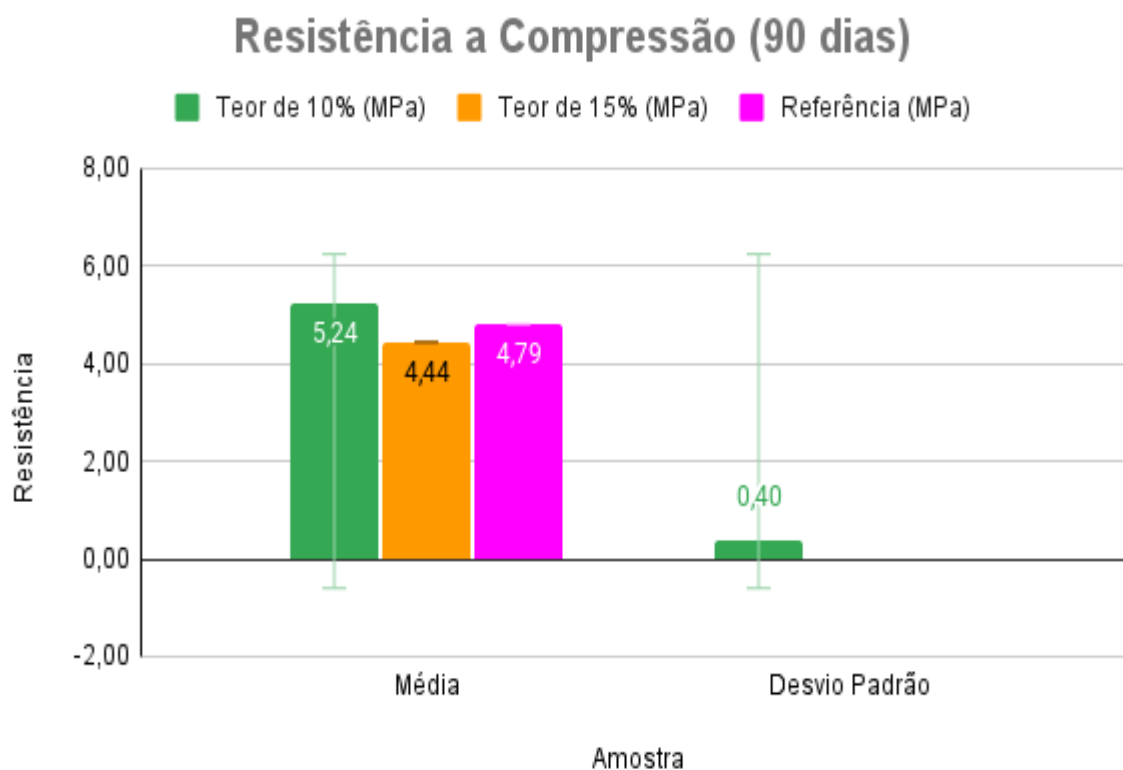


Fonte: Autoria Própria

A partir da análise descritiva dos dados da Figura 2, verifica-se que quando comparado com os resultados de referência aos 28 dias o teor de 10% de substituição parcial do cimento *Portland* pelo resíduo de vidro processado ocasionou uma redução de 5,95%. O teor de 15% de substituição parcial do cimento *Portland* pelo resíduo de vidro processado ocasionou uma redução de 9,29%. Logo, o teor de 10% de substituição teve melhor desempenho aos 28 dias.

As resistências à compressão simples para as argamassas estudadas com teores de substituição de 10% e 15% e de referência após 90 dias de cura são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Resultados aos 90 dias do teste de resistência a compressão simples (RCS).



Fonte: Autoria Própria

A análise descritiva dos dados da Figura 3, quando comparada com os resultados de referência demonstra que aos 90 dias o teor de 10% de substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo de vidro processado ocasionou um aumento de 9,39%. Enquanto, o teor de 15% de substituição parcial do cimento Portland pelo resíduo de vidro processado ocasionou uma redução de 7,31%. O teor de 10% continuou tendo um melhor desempenho, aos 90 dias conseguiu promover um pequeno ganho de resistência á compressão simples.

As argamassas propostas com teores de substituição parcial de 10% e 15% apresentam valores de resistência à compressão simples em conformidade com a NBR 13281-2 (ABNT, 2023), logo são classificadas como argamassas inorgânicas para fixação horizontal de alvenaria (AAF), ou seja, argamassa de complementação de alvenaria (encunhamento), pois apresenta

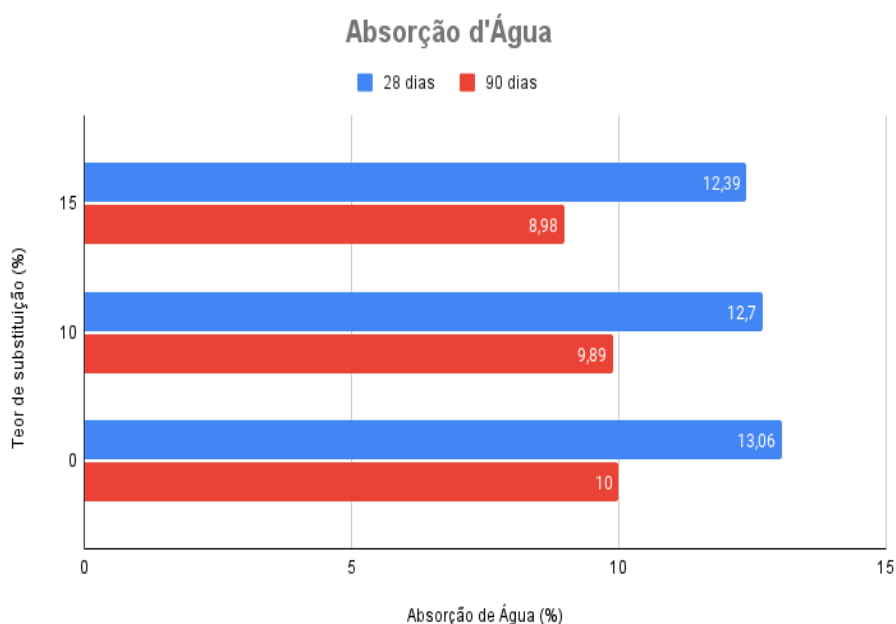
valores médio de resistência superior a 1,5 MPa, que é o mínimo estabelecido pela norma para esta classificação de uso.

É importante destacar que a quantidade de água utilizada para moldar as argamassas foi obtida para se ter uma consistência estabelecida pela NBR 12655 (ABNT, 2022), que garante boa trabalhabilidade e bom desempenho dela no estado endurecido.

4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS PROPOSTAS

Na figura 4 são apresentados os resultados obtidos para absorção de água para as idades de cura de 28 e 90 dias.

Figura 4 - Resultados do teste de absorção de água



Fonte: Autoria Própria

De acordo com os resultados obtidos (Figura 4), aos 28 e 90 dias de cura, demonstram tendência do aumento do teor de substituição do cimento Portland por pó de vidro leva a uma redução no valor da absorção de água.

Aos 28 dias, a argamassa de referência (sem substituição) apresentou maior absorção (13,06%), seguida pela argamassa com 10% de substituição (12,70%) e, por fim, a com 15% de substituição (12,39%). Enquanto, aos 90 dias, essa tendência se manteve, com a argamassa de referência apresentando absorção de 10 %; a argamassa com 10% de substituição apresentou

9,89% de absorção e a argamassa com 15% de substituição com a menor absorção, sendo o resultado 8,98%.

Diante dos resultados, pode-se analisar que a redução na absorção de água pode ser atribuída à diminuição da quantidade de vazios na argamassa com a incorporação do pó de vidro. O pó de vidro, ao ser adicionado à mistura, preenche parte dos espaços vazios entre os grãos de cimento e areia, tornando a estrutura da argamassa mais compacta e menos permeável à água. (MORAIS et al., 2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização deste estudo sobre argamassas confeccionadas com resíduo de vidro processado em substituição parcial ao cimento Portland, é possível concluir:

- A caracterização química do resíduo de vidro processado o classifica como material pozolânico devido quando se analisa os requisitos: teor da soma de SiO_2 com Al_2O_3 e Fe_2O_3 ter dado 78,16% ($\geq 70\%$) e o teor de SO_3 ter sido 0,18% ($\leq 0,4$), porém para afirmar com 100% de certeza seria necessário determinar a composição mineralógica e outros requisitos que não foram possíveis determinar neste estudo por falta de acesso aos equipamentos.
- As argamassas confeccionadas com 10% e 15% de resíduo de vidro processado na granulometria de pó, considerando o uso, conforme classificação da NBR 13281-2 (ABNT, 2023) apresentaram valores de resistência à compressão simples que as classificam como: argamassa de complementação de alvenaria (encunhamento), devido terem apresentados resultados superiores ao que se é estabelecido pela norma.
- As argamassas confeccionadas com 10% e 15% de resíduo de vidro processado na granulometria de pó apresentaram bons valores de absorção de água, valores menores que o da argamassa de referência, essa característica é extremamente positiva.
- As argamassas com maior teor de substituição do cimento Portland pelo resíduo estudado (15%) tendem a ser mais duráveis e resistentes à deterioração causada pela umidade ambiente ao longo do tempo, pois apresentaram menor valor de absorção de água.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro: Abmtenc, 2005. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: Abmtenc, 2014. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. 4 ed. Rio de Janeiro, 2022. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281-2**: Argamassas inorgânicas — requisitos e métodos de ensaios parte 2: argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. 1 ed. Rio de Janeiro: Abmtenc, 2023. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13583**: Cimento Portland - determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014. 14 p.

CARVALHO, Matos Samile Raiza *et al.* MÉTODO DE RIETVELD PARA QUANTIFICAÇÃO DE FASES EM RESÍDUOS PARA USO COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS). 7º Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção, [S.L.], p. 42-50, 26 nov. 2021. Atena Editora.
<http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.8192108116>.

COSTA, Josiane Moraes, **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES EM CONCRETO**. 2021. 76 f.
Dissertação (Doutorado) - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

DE ALMEIDA, K. M.; VIDAL, F. W. H.; CASTRO, N. F. Uso sustentável de resíduos de caulim do Seridó na formulação de concreto. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 12, p. 23995–24010, 2023.

DE BRITO, A. N. DOS S. L. et al. Aproveitamento do resíduo de Vermiculita em argamassa alternativa sustentável. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, v. 16, n. 6, p. 3151–3168, 2023.

FARIAS, Lidianne do Nascimento *et al.* ACV DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES E AGREGADOS RECICLADOS: uma revisão sistemática. **Mix Sustentável**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 67-81, 25 jul. 2023. Mix Sustentavel. <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.mix2023.v9.n3.67-81>.

FLORES, Jorman Joe Revilla. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PÓ DE VIDRO COMO SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS**. 2024. 52 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (Ilatit), Foz do Iguaçu, 2024.

HUSEIEN, Ghasan Fahim *et al.* A Review on Concrete Composites Modified with Nanoparticles. **Journal Of Composites Science**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 67, 7 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/jcs7020067>.

JOICHEM, Lidiane Fernanda *et al.* Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 273, p. 121704, 1 mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121704>.

LI, Qiong *et al.* Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 324, p. 126531, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>.

LIANG, C. et al. Utilizing waste geopolymer powder as partial cement replacement for sustainable cement mortar: Micro-macro properties and modification. **Journal of materials research and technology**, v. 25, p. 2738–2757, 2023.

MACEDO, Amanda Regina de Souza. **EFEITOS DA DIATOMITA EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND NAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS CONVENCIONAIS**. 2022. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais,

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

MALHEIRO, Rafhaele *et al.* Utilização do pó de vidro como substituto parcial do cimento: Uma abordagem experimental a cerca da resistência mecânica. In: congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis (CLBMCS), 4., 2022, Salvador. **ISBN: 978-65-00-55912-5**. Salvador: Abmtenc, 2022. p. 647-657.

MOTA, D. M. P. et al. ADIÇÃO DA CINZA DA FOLHA DE BANANEIRA NA ARGAMASSA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 55, 2020.

MORAES, Flávia Ribeiro de. **RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA (RIC) DO DISTRITO FEDERAL COMO MATERIAL POZOLÂNICO**: caracterização e ciclo de vida. 2020. 84 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

MORAIS, Agnelo *et al.* Argamassa cimentícia: uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 1-11, 2022. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.008>.

OLIVEIRA, J. P. et al. **Concrete performance evaluation of coarse aggregate replacement by civil construction waste**. Universidade Federal de Santa Maria, 04 de setembro de 2020. Acesso em: 24 julho 2023.

SANTOS, Carlos Alberto Andrade Serra dos *et al.* Material compósito de argamassa e polímero: uma opção sustentável para a construção civil e reutilização de pneus inservíveis na cidade de açailândia, brasil. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 1-15, 25 maio 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4591>.

SANTOS, D. P. **influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante**. 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2016.

SANTOS, E. A. et al. Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, 2024.

WU, H. et al. Upcycling of construction spoil powder as partial cement replacement for sustainable cement-based materials: Properties and modification. **Journal of cleaner production**, v. 369, n. 133361, p. 133361, 2022.