



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Ednardo Fernandes de Medeiros

Estudo da utilização de resíduos vítreos na produção de tijolos solo-cimento

MOSSORÓ

2024

Ednardo Fernandes de Medeiros

Estudo da utilização de resíduos vítreos na produção de tijolos solo-cimento

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Sâmea Valensca Alves Barros,
Prof^a Dra

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a 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 tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M488e Medeiros, Ednardo Fernandes de.
Estudo da utilização de resíduos vítreos na
produção de tijolos solo-cimento / Ednardo
Fernandes de Medeiros. - 2024.
34 f. : il.

Orientadora: Sâmea Valensca Alves Barros.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2024.

1. tijolos ecológicos. 2. reciclagem de resíduos
de vidro. 3. sustentabilidade. 4. propriedades
mecânicas. 5. absorção de água. I. Barros, Sâmea
Valensca Alves, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

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.

Ednardo Fernandes de Medeiros

Estudo da utilização de resíduos vítreos na produção de tijolos solo-cimento

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 25 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Adna Érica Melo de Sousa Fontes, M.Sc em Eng. Civil (UFERSA)
Membro Examinador

Engenheiro Civil Elói Romão dos Santos Souza
Membro Examinador Externo

DEDICATÓRIA

A minha vó, Teresinha Ferreira Fernandes Pereira (In Memoriam). Lembro-me com carinho das noites alegres que vivemos nas reuniões de família em sua casa, dos abraços e da sua voz dizendo em cada despedida: “vá com Deus e seja feliz”. A senhora, vó, dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que esteve sempre comigo ao longo dessa trajetória e me amparou nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais, Eduardo e Graça, minhas inspirações maiores e que nunca pouparam esforços para possibilitar a realização dos meus estudos.

Agradeço aos meus irmãos, Matheus e Maria Eduarda, que me inspiram a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço a minha família paterna e materna, especialmente a minha prima Monalisa e seu marido Everton, minha prima Andreza e seu marido Caio, e minha tia Tida, por todo apoio ao longo da minha trajetória acadêmica.

Agraço ao professor, amigo e maior inspiração no ramo da construção civil Cristiano Augusto Menescal Jales. Seus conselhos e ensinamentos foram e serão essenciais em minha vida profissional.

Agradeço aos amigos que construí durante toda trajetória acadêmica, tornando essa jornada mais leve e enriquecedora.

Agradeço a minha orientadora, Prof.^a Dra. Sâmea Valensca Alves Barros, pela dedicação, paciência e conhecimento transmitido durante a realização deste trabalho. Sua orientação e apoio foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha jornada acadêmica. Cada um de vocês contribuiu para que eu chegasse até aqui, com sabedoria e ferramentas para construir meu futuro. Agradeço, especialmente, ao grande Prof. Dr. Raimundo Gomes de Amorim Neto por me fazer perceber que posso VOAR ALTO e alcançar meus sonhos.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios do Centro de Engenharias da UFERSA, Augusto César, Rudna Angelica e Fabrício de Almeida, pelas orientações e acompanhamentos nos ensaios.

Por fim, sou grato à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) por proporcionar um ambiente propício à pesquisa e ao desenvolvimento acadêmico.

Muito obrigado a todos.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), regida pela Lei 12.305/10, apresenta o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, que envolve desde os fabricantes até os consumidores. Tal conceito promove a reinserção dos resíduos, que já completaram seu ciclo de vida em um processo produtivo, em novas cadeias produtivas, criando, assim, um novo ciclo de vida para esses materiais. Nesse sentido, o desenvolvimento de pesquisas que buscam reinserir os resíduos de vidro em uma nova cadeia produtiva por meio da reciclagem é de suma importância. Este trabalho teve como objetivo verificar a viabilidade da substituição parcial do Cimento *Portland* por resíduos vítreos beneficiados na produção de tijolos solo-cimento. Os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento desta pesquisa experimental quanto a produção dos tijolos de solo-cimento seguem as prescrições normativas da ABNT NBR 10833:2012 e NBR 10834:2012. Ademais, realizou-se a caracterização química do resíduo de vidro, após passar por beneficiamento através dos processos de moagem e peneiramento em peneira ABNT número 200, e a caracterização física do solo para garantir que o solo coletado era apto ao uso na fabricação de tijolos de solo-cimento. Os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando a viabilidade da substituição parcial do cimento CP V ARI RS tanto para o teor de incorporação de 10% de pó de vidro quanto para o de 20%, pois eles atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos por norma para absorção de água e para resistência à compressão.

Palavras-chave: tijolos ecológicos; reciclagem de resíduos de vidro; sustentabilidade; propriedades mecânicas; absorção de água.

ABSTRACT

The National Solid Waste Policy (PNRS), governed by Law 12.305/10, introduces the concept of shared responsibility throughout the product lifecycle, encompassing manufacturers to consumers. This concept promotes the reinsertion of waste, which has reached the end of its lifecycle in a production process, into new production chains, thus creating a new lifecycle for these materials. In this context, the development of research aimed at reinserting glass waste into a new production chain through recycling is of paramount importance. This study aimed to verify the feasibility of partially replacing Portland Cement with processed glass waste in the production of soil-cement bricks. The methodological procedures for the development of this experimental research on the production of soil-cement bricks follow the normative prescriptions of ABNT NBR 10833:2012 and NBR 10834:2012. Additionally, the chemical characterization of the glass waste was conducted after undergoing milling and sieving processes using a 200 ABNT sieve. The physical characterization of the soil was performed to ensure its suitability for the production of soil-cement bricks. The results obtained were satisfactory, demonstrating the feasibility of partially replacing CP V ARI RS cement with both 10% and 20% glass powder content, as they met the minimum requirements established by the standard for water absorption and compressive strength.

Keywords: ecological bricks; glass waste recycling; sustainability; mechanical properties; water absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Tijolo de solo-cimento.....	21
Figura 2	–	Pó de vidro peneirado.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Limites das frações de solo pelo diâmetro/tamanho dos grãos	18
Tabela 2	–	CrITÉrios para a seleÇão de solos para uso em tijolos solo-cimento	22
Tabela 3	–	TraÇos volumÉtricos com base no percentual de substituiÇão	25
Tabela 4	–	Ensaio de CaracterizaÇão do solo	27
Tabela 5	–	ComposiÇão quÍmica do pÓ de vidro	27
Tabela 6	–	Resultados do ensaio de absorÇão d'Água	28
Tabela 7	–	Resultados do ensaio de resistÊncia à compressão	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
CaO	Óxido de Cálcio
cm	Centímetros
CO_2	Dióxido de Carbono
CP	Corpo de Prova
CP I	Cimento Portland comum
CP II	Cimento Portland composto
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V ARI RS	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfatos
Dra.	Doutora
Et al	E outros
Fe_2O_3	Óxido de Ferro (III)
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m	Metro
mm	Milímetro
Mpa	Mega Pascal
Na_2O	Óxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Prof. ^a	Professora
RCS	Resistencia à Compressão Simples
RN	Rio Grande do Norte
SiO_2	Dióxido de Silício
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido

LISTA DE SÍMBOLOS

©	Copyright
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO	18
3.1	Solos	18
3.2	Cimento <i>Portland</i>	19
3.3	Solo-cimento	20
3.3.1	Tijolo de solo-cimento.....	21
3.4	Uso de resíduos vítreos como substituto parcial do cimento <i>Portland</i>	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais	24
4.1.1	Materiais convencionais	24
4.1.2	Materiais alternativos	24
4.2	Métodos	25
4.2.1	Caracterização física do solo	25
4.2.2	Caracterização química do pó de vidro	25
4.2.3	Moldagem dos corpos de prova	25
4.2.4	Ensaio de absorção de água e resistência à compressão	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
5.1	Caracterização física do solo	27
5.2	Caracterização química do pó de vidro	27
5.3	Absorção de água	28
5.4	Resistência à compressão	29
6	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

O vidro é um material bastante utilizado em diversas cadeias produtivas, sendo empregado, por exemplo, em esquadrias, automóveis e utensílios domésticos. Logo, esta alta demanda por produtos de vidro gera uma volumosa quantidade de resíduos sólidos. Segundo Gil *et al.* (2020), em quantidades substanciais representam uma ameaça direta à saúde humana e ao meio ambiente.

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos devem ser pautados na seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final dos rejeitos (BRASIL, 2010). Nesse contexto, o desenvolvimento de pesquisas que visam a inserção dos resíduos de vidro processados e beneficiados em novas cadeias produtivas, como a da construção civil, é de suma importância.

Morais *et al.* (2022) avaliaram o comportamento de argamassas cimentícias com substituição parcial ao Cimento *Portland* por resíduos de vidro e obtiveram resultados superiores aos limites mínimos estabelecidos por normas. Já Costa e Schneider (2021) verificaram a viabilidade da substituição de aglomerante por resíduos vítreos na produção de pavimento intertravado de concreto e os resultados se mostraram satisfatórios.

Portanto, fica evidente a importância de ampliar os estudos da viabilidade da substituição parcial do cimento *Portland* por resíduos vítreos. Nesta perspectiva, esta pesquisa se propõe a verificar a viabilidade da produção de tijolos solo-cimento com resíduos vítreos coletados no município de Mossoró/RN, permitindo a ampliação do uso em matrizes cimentícias e assim contribuir para inserir estes resíduos após serem beneficiados em novo ciclo produtivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Verificar a viabilidade técnica da substituição parcial do Cimento *Portland* por resíduo de vidro beneficiado através dos processos de moagem e peneiramento em tijolos de solo-cimento.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização física do solo a ser utilizado na confecção dos tijolos propostos, verificando se atende aos parâmetros normativos para este uso;
- Beneficiar os resíduos de vidro através dos processos de moagem e peneiramento para deixar na mesma granulometria do Cimento *Portland*;
- Realizar a caracterização química do resíduo de vidro utilizado;
- Determinar a absorção de água e a resistência à compressão simples dos tijolos propostos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Solos

De acordo com Pinto (2006), os solos constituem-se de um conjunto de partículas sólidas originadas a partir da decomposição de rochas por agentes físicos e químicos. Entre essas partículas existem espaços vazios que são preenchidos por água e ar. Logo, é um sistema trifásico, onde a fase sólida é formada pelas partículas de minerais; a fase líquida por partículas de água e a gasosa por ar.

Nesse mesmo sentido, Caputo (1988) define solos como sendo materiais que se originam através do processo de intemperismo, também conhecido como meteorização, das rochas, podendo ocorrer por meio da desintegração mecânica ou pela decomposição química. Quando por desintegração mecânica, ocorre a ação de agentes como a água e o vento. Já quando por decomposição química, o principal agente é a água que gera mecanismos de ataques como a oxidação e a hidratação.

Segundo Pinto (2006), uma das características que diferencia um solo de outro é o tamanho das suas partículas constituintes ou grãos, havendo partículas que podem ser visualizadas a olho nu e partículas que só é possível sua visualização quando analisadas em conjunto. Para cada faixa de tamanho de grãos, é atribuída uma denominação, cujos limites variam de acordo com o sistema de classificação utilizado pela Associação Brasileira de Norma Técnica (ABNT). A Tabela 1 apresenta os valores adotados pela NBR 6502 (ABNT, 2022).

Tabela 1 – Limites das frações de solo pelo diâmetro/tamanho dos grãos.

FRAÇÃO	LIMITES
Bloco de rocha	Superior a 1 m
Matacão	20 cm a 1 m
Pedra de mão	6 cm a 20 cm
Pedregulho grosso	2 cm a 6 cm
Pedregulho médio	6 mm a 2 cm
Pedregulho fino	2 mm a 6 mm
Areia grossa	0,60 mm a 2,00 mm
Areia média	0,20 mm a 0,60 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,20 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: Adaptado NBR 6502 (ABNT, 2022).

As principais partículas ou grãos de minerais que constituem o solo são: pedregulho; areia; argila e silte. Pedregulhos são fragmentos de rochas, comumente compostos por grãos de quartzo, feldspato e outros minerais. As partículas de areia, por sua vez, são predominantemente constituídas por quartzo e feldspato, embora outros minerais possam estar presentes em menor quantidade. Siltes são frações do solo com tamanho de partícula intermediário entre a areia e a argila, sendo constituídos principalmente por grãos finos de quartzo e fragmentos de minerais micáceos, que apresentam formato lamelar. As argilas, por sua vez, são compostas por partículas ainda menores, com formato lamelar, e são constituídas principalmente por minerais do grupo das micas, argilominerais e outros minerais em proporções variáveis (Das & Sobhan, 2014).

3.2 Cimento *Portland*

De acordo com Ambrozewicz (2012), cimento *Portland* é o nome técnico do material amplamente utilizado na construção civil, conhecido simplesmente como cimento. Ele foi desenvolvido e registrado como patente em 1824 por *Joseph Aspdin*, um construtor inglês. O cimento *Portland* recebeu essa nomenclatura devido à semelhança, em cor e resistência, com uma pedra acinzentada da ilha de *Portland*, que era bastante utilizada em construções na época.

Ainda conforme Ambrozewicz (2012), o cimento *Portland* é caracterizado por sua granulometria de pó e por sua capacidade de endurecer ao entrar em contato com a água, formando um material resistente e estável mesmo em ambientes úmidos.

Neville (2016) relata que o processo de fabricação do cimento consiste na moagem da matéria-prima, que são misturadas e, em seguida, submetidas a uma queima em elevadas temperaturas. Com isso, resultando em clínquer que, após resfriado, recebe a adição de uma certa quantidade de sulfato de cálcio, passando, então, por uma nova moagem, transformando-se em um pó muito fino que é denominado como cimento *Portland*.

Ambrozewicz (2012) relata que, de acordo com sua composição e adições, os cimentos *Portland* podem receber as seguintes classificações: Cimento *Portland* comum (CP I) – Sem adições, além de gesso; Cimento *Portland* composto (CP II) – composição intermediária entre os Cimento *Portland* Comum e o Cimento *Portland* com adição de escória ou pozolana. Cimento *Portland* de alto-forno (CP III) – adição de escória granulada de alto-forno; Cimento *Portland* pozolânico (CP IV) – adição de pozolana, e Cimento *Portland* de alta resistência inicial (CP V-ARI) – atinge altas resistências já nos primeiros dias após a aplicação.

Ademais, Ambrozewicz (2012) destaca a existência de duas classificações especiais, podendo qualquer um dos cinco citados anteriormente receberem uma dessas classificações, a depender de suas composições. Uma delas é o Cimento *Portland* resistente a sulfatos, que é indicado para uso em ambientes agressivos, como, por exemplo, redes de esgotos e alguns tipos de solos; e a outra é o Cimento *Portland* de baixo calor de hidratação, que apresenta taxas lentas de evolução de calor, sendo, por esse motivo, indicado para concretagens de estruturas que requerem grandes volumes de concreto continuamente.

3.3 Solo-cimento

O solo-cimento corresponde a uma mistura homogênea e compactada entre solo, cimento e água cuja dosagem ocorre de acordo com as normas que regulamentam a produção desse material utilizado na construção civil. Essa mistura quando endurecida e curada adquire boa resistência (ABCP, 2004).

Bauer (2008) relata que a qualidade do solo-cimento e suas características são determinadas por diversos fatores, incluindo a quantidade de cimento utilizada, o tipo de solo empregado, o nível de umidade da mistura e o grau de compactação.

A primeira obra executada em solo-cimento no Brasil foi uma casa de bombas, no Pará, em 1945. Em seguida, em Petrópolis, casas residenciais foram construídas com paredes executadas apenas em solo-cimento pela qualidade e características que esse material apresenta. E outra que teve grande destaque foi a do Hospital Adriano Jorge, em Manaus, em 1948, por ter apresentado ótimo desempenho necessitando de manutenção apenas quase três décadas depois (Bauer, 2008).

De acordo com Grande (2003), dentre outras vantagens, a incorporação do cimento ao solo faz com que se obtenha um produto que apresenta baixa variação volumétrica, mesmo quando submetido a ciclos de umidade e secagem, e menor permeabilidade, contribuindo, assim, para maior durabilidade. Além disso, proporciona a dispensa do processo de queima na fabricação de tijolos de solo-cimento, tornando um produto sustentável no seu processo produtivo. Tais características fizeram com que as várias pesquisas venham sendo realizadas ao longo das últimas décadas para investigar formulações de tijolos de solo-cimento que incorporem os diferentes resíduos sólidos e se mantenha ou melhore suas propriedades.

3.3.1 Tijolo de solo-cimento

De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), o tijolo de solo-cimento (Figura 1) é um produto obtido a partir da mistura uniforme de solo, cimento *Portland* e água, além de outros componentes opcionais como aditivos e pigmentos, os quais são compactados e endurecidos.

Figura 1 – Tijolo de solo-cimento.



Fonte: Alphaz Tijolos Ecológicos (2021)¹.

A ABPC (2000) afirma que ao comparar as resistências dos tijolos de solo-cimento com os cerâmicos é possível verificar que os valores são similares, sendo que ao aumentar o percentual de cimento daquele, sua resistência também aumenta sendo limitada a uma umidade ótima de forma a garantir a qualidade.

Dentre as vantagens proporcionadas pelo uso do tijolo solo-cimento, a ABPC (2000) relata que várias podem ser citadas, como, por exemplo, a redução no custo do transporte, visto que a produção desse tipo de tijolo é facilitada podendo ser produzido no próprio canteiro de obras; redução nos impactos ambientais em virtude de não necessitar de queima; e não carece de mão de obra especializada, devido ao seu fácil assentamento. Além disso, Euphrosino *et al.* (2022) acrescentam que a passagem das tubulações elétricas e hidráulicas é de fácil execução devido aos furos que o tijolo pode apresentar, ficando embutidas e podendo ser executadas em conjunto com o levantamento da alvenaria. Tal prática elimina a necessidade de quebras

¹ Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/tijolo-ecologico-consumo-agua/>. Acesso em: 10 out. 2024.

posteriores para a realização dessas instalações, reduzindo a geração de resíduos e otimizando o processo construtivo.

Em relação a fabricação de tijolos de solo-cimento, requer equipamentos específicos, que podem variar desde formas simples de madeira para moldagem manual até prensas mais complexas para moldagem mecânica (Bauer, 2008).

Para produção de tijolos de solo-cimento o solo tem que passar por seleção criteriosa, pois é fundamental para a obtenção de um produto final com as características desejadas e se ter um menor consumo do cimento (ABCP, 2000).

A ABCP (2000) enfatiza que os solos arenosos, em geral, demandam menor quantidade de cimento em sua composição quando comparados aos solos argilosos e siltosos. Entretanto, a presença de argila é fundamental para conferir à mistura solo-cimento, após a adição de água e compactação, a coesão necessária para a manipulação dos tijolos recém-moldados, permitindo sua remoção das formas sem que se desintegrem.

Nesse sentido, a NBR 10833 (ABNT, 2012) estabelece que a quantidade de matéria orgânica no solo deve ser limitada de forma a não prejudicar a hidratação do cimento, além de apresentar as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios para a seleção de solos para uso em tijolos solo-cimento.

CARACTERÍSTICA	REQUISITO (%)
% passante na peneira ABNT 4,75 mm	100
% passante na peneira ABNT 0,075 mm	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Índice de plasticidade	≤ 18

Fonte: Adaptado da NBR 10833 (ABNT, 2012).

No que diz respeito ao cimento para a produção do tijolo solo-cimento, podem ser utilizados: Cimento *Portland* Comum, Composto, de Alto-Forno, Pozolânico e o de Alta Resistência Inicial, desde que atendam as normas referentes a cada tipo. Quanto a água, deve ser de boa qualidade, livre de impurezas que possam prejudicar a reação química de hidratação do cimento (ABPC, 2000).

3.4 Uso de resíduos vítreos como substituto parcial do cimento *Portland*

O vidro é um material amplamente utilizado no setor da construção civil, podendo ser definido, de acordo com Bauer (2008), como um líquido super-resfriado composto, principalmente, por sílica, carbonato de sódio e cálcio, sendo a sílica o componente com maior percentual. Devido a predominância de sílica em sua composição, o vidro pode apresentar boas propriedades pozolânicas, tornando-o um material com potencial para aplicação em matrizes cimentícias (Campbell, 2023).

Nesse sentido, Shao *et al.* (2000), ao estudarem o concreto com adição de resíduos de vidro moído de lâmpadas fluorescentes, puderam concluir que, quando moído mais fino que 38 μm , o vidro apresenta comportamento pozolânico e que a resistência apresentada pelo concreto com substituição de 30% do cimento por vidro foi maior que a exigida por norma.

Já Costa & Schneider (2021) analisaram a viabilidade da substituição parcial do cimento por pó de vidro na produção de pavimento intertravado de concreto com teores de substituição de 5%, 10%, 20% e 40% de pó de vidro quanto a inspeção visual, resistência a compressão e absorção de água. Verificaram, quanto a análise visual, que ao aumentar o percentual do pó ocorreu redução de poros, porém, ao atingir o percentual de 40% a peça passa a esfarelar. Algo parecido aconteceu com a absorção, na qual os corpos de prova com teor de 40% apresentaram aumento da absorção e os demais percentuais, redução. Em relação a resistência a compressão simples houve melhoras significativas, no entanto, não foi atingida a resistência mínima exigida pela norma para tráfego de pedestres e veículos leves.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Materiais convencionais

Os materiais convencionais utilizados foram: Cimento Portland CP V ARI RS e solo argiloso. O solo utilizado foi coletado no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), em Mossoró/RN. Após a coleta, o material passou pelo processo de secagem ao ar, destorroamento e peneiramento na peneira ABNT nº 4 (4,75 mm) no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFERSA.

4.1.2 Materiais alternativos

O material alternativo utilizado foi resíduos de vidro oriundos de garrafas do tipo “*Long-Neck*” de cervejas coletadas no município de Mossoró/RN. Essas passaram pelo processo de moagem no Abrasão de *Los Angeles*, e posteriormente pelo processo de peneiramento em peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,075 mm) nos Laboratórios de Mecânica dos Solos e de Materiais de Construção da UFERSA, respectivamente. A Figura 2 mostra o resíduo de vidro após moagem e peneiramento (granulometria de pó).

Figura 2 – Pó de vidro peneirado.



Fonte: Autor (2024).

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização física do solo

A caracterização física do solo ocorreu através dos ensaios: granulometria por peneiramento (ABNT NBR 7181/2016); Limite de Liquidez (LL) (ABNT NBR 6459/2016); Limite de Plasticidade (LP) (ABNT NBR 7180/2016) e compactação Proctor Normal (ABNT NBR 7182/2016), realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos no Campus Leste da UFERSA Mossoró.

4.2.2 Caracterização química do pó de vidro

A caracterização química do pó de vidro ocorreu utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento EDX 720 da Shimadzu) para determinação da composição química no Laboratório de Tecnologia dos Materiais da universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.2.3 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados 18 corpos de provas (CP's) cilíndricos, com dimensões de (50x100) mm, seguindo a norma NBR 12024 (ABNT, 2012), sendo: 06 CP's no traço 1:10 (cimento: solo), esses chamados de referência; 06 CP's no traço 1:10 (cimento: solo) com teor de substituição parcial do cimento *Portland* por 10% de pó de vidro e 06 CP's no traço 1:10 (cimento: solo) com teor de substituição parcial do cimento *Portland* por 20% (Tabela 3). Dos 18 CP's, 09 foram para a realização do ensaio de absorção e 09 para o de resistência à compressão simples.

Tabela 3 – Traços volumétricos com base no percentual de substituição.

PERCENTUAL DE SUBSTITUIÇÃO	QUANTIDADE DE CP'S	TRAÇO (CEMENTO: PÓ DE VIDRO: SOLO)
Referência	06	1:10*
10 %	06	0,90:0,10:10
20 %	06	0,80:0,20:10

*Refere-se apenas à cimento e solo, pois no de referência não foi utilizado pó de vidro.

Fonte: Autor (2024).

A quantidade de água para moldar CP's foi estabelecida através do ensaio de compactação Proctor Normal, conforme a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Neste ensaio, determinou-se a umidade ótima e o peso específico seco máximo, sendo 21% e 1,70 g/cm³, respectivamente.

Após moldados, os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 28 dias, para posterior ensaios de absorção de água e de resistência à compressão simples.

4.2.4 Ensaio de absorção de água e resistência à compressão

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme rege a NBR 8492 (ABNT, 2012). Enquanto o ensaio de resistência à compressão simples ocorreu conforme a NBR 12025 (ABNT, 2012). Para a realização desse ensaio, o equipamento utilizado para romper os CP's foi a Máquina Universal de Ensaio EMIC Modelo DL 10000, célula CCE30kN.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização física do solo

A Tabela 4 apresenta as características físicas obtidas para o solo utilizado nesta pesquisa.

Tabela 4 – Ensaio de caracterização do solo.

CARACTERÍSTICA	REQUISITO (%)	VALOR OBTIDO PARA O SOLO ESTUDADO (%)
% passante na peneira ABNT 4,75 mm	100	100
% passante na peneira ABNT 0,075 mm	10 a 50	22
Limite de liquidez	≤ 45	37
Índice de plasticidade	≤ 18	15

Fonte: Autor (2024).

De acordo com os resultados da Tabela 5, percebe-se que o solo estudado atende a todos os requisitos exigidos pela NBR 10833 (ABNT, 2012) para ser utilizado na fabricação de tijolos de solo-cimento. Verifica-se, ainda, na Tabela 5 que ele é classificado, de acordo com Caputo (1988), como mediantemente plástico porque seu IP se encontra no intervalo $7 < IP \leq 15$.

5.2 Caracterização química do pó de vidro

A Tabela 5 apresenta a composição química do pó de vidro. Ao analisar a composição química dele e comparar com os requisitos químicos da NBR 12653 (ABNT, 2014), verificou-se que apresenta alto teor de SiO_2 (72,19%) e que a soma de SiO_2 com Al_2O_3 e Fe_2O_3 corresponde a 78,13%, logo é considerado um material com atividade pozolânica.

Tabela 5 - Composição química do pó de vidro.

Componentes	SiO_2	CaO	Na_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	Outros óxidos
(%)	72,19	13,50	6,56	3,42	2,52	1,81

Fonte: Autor (2024).

5.3 Absorção de água

A Tabela 6 apresenta de forma detalhada os valores de absorção de água encontrados para cada um dos corpos de prova submetidos ao ensaio. Ao se comparar os valores da Tabela 6 com os requisitos exigidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012) é possível concluir que todos os CP's atenderam. Para a média dos valores de absorção de água, o máximo exigido pela norma é 20%, e para os valores individuais, 22%. Como nenhum CP excedeu esses valores, foram atendidos os requisitos.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de absorção d'água.

CORPO DE PROVA	TRAÇO (CIMENTO: PÓ DE VIDRO: SOLO)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)	MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO
CP 01	1:10 (referência)	18,76		
CP 02	1:10 (referência)	18,88	18,81	(±) 0,05
CP 03	1:10 (referência)	18,79		
CP 04	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	17,56		
CP 05	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	17,97	17,83	(±) 0,19
CP 06	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	17,95		
CP 07	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	18,02		
CP 08	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	17,74	17,87	(±) 0,12
CP 09	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	17,84		

Fonte: Autor (2024).

Em comparação ao traço de referência, os traços que contém pó de vidro na sua composição apresentaram menor absorção de água, tanto nos valores individuais quanto na média, corroborando com os resultados obtidos para resistência à compressão simples.

5.4 Resistência à compressão

A Tabela 7 mostra os resultados do ensaio de resistência à compressão simples para todos os 09 CP's, apresentando também as resistências médias e o desvio padrão.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de resistência à compressão.

CORPO DE PROVA	TRAÇO (CIMENTO: PÓ DE VIDRO: SOLO)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPA)	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO MÉDIA (MPA)	DESVIO PADRÃO
CP 10	1:10 (referência)	2,38		
CP 11	1:10 (referência)	2,92	2,75	(±)0,26
CP 12	1:10 (referência)	2,94		
CP 13	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	2,64		
CP 14	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	2,60	2,65	(±)0,05
CP 15	0,90:0,10:10 (10% de substituição)	2,71		
CP 16	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	3,43		
CP 17	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	3,76	3,54	(±)0,17
CP 18	0,80:0,20:10 (20% de substituição)	3,83		

Fonte: Autor (2024).

Nota-se que todos os CP's atingiram as resistências mínimas média (2,0 Mpa) e individual (1,7 Mpa) requerida pela NBR 8491 (ABNT, 2012). Também é possível observar que as resistências do traço com teor de substituição de 20 % do pó de vidro se sobressaíram em relação às demais, tanto nos valores individuais quanto nos médios.

Confrontando-se o traço de referência com os demais, nota-se que o traço que apresenta teor de substituição de 10% de vidro por Cimento *Portland* apresentou menor valor de RCS,

provavelmente por não ser um teor capaz de proporcionar ganho no valor da RCS, à medida que o teor de 20% proporcionou um aumento no valor da RCS.

6 CONCLUSÕES

Diante do estudo realizado, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- O solo utilizado nesta pesquisa apresenta os parâmetros físicos indicados pela NBR 10833 (ABNT, 2012) e está apto para ser utilizado na fabricação de tijolos de solo-cimento;
- A composição química do pó de vidro quando se analisa o parâmetro da soma de SiO_2 com Al_2O_3 e Fe_2O_3 estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014) é considerado material com atividade pozolânica;
- Os resultados dos ensaios de absorção de água indicaram que os corpos de provas produzidos com adição de resíduos vítreos atendem aos requisitos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), tanto em relação aos valores individuais quanto à média, confirmando a viabilidade técnica da utilização desse material para a fabricação de tijolos solo-cimento;
- Ao se comparar o traço de referência com os que contém pó de vidro na sua composição, estes apresentaram menor absorção de água, tanto nos valores individuais quanto na média;
- A análise dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples revelou que os corpos de prova contendo pó de vidro superaram os valores mínimos exigidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), com destaque para a formulação com o teor de 20% de substituição, que apresentou as maiores resistências individuais e média;
- O teor de 10% de substituição não proporcionou ganho de RCS quando comparado ao traço de referência, demonstrando que o teor de substituição ideal para solo-cimento para promover o ganho de RCS é o de 20%;
- Os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica da substituição parcial do cimento CP V ARI RS por pó de vidro na produção de tijolos de solo-cimento. Com isso, a incorporação de resíduos vítreos contribui para promover um novo ciclo de vida para garrafas “*Long-Necks*”.

REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de Construção**: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. São Paulo: Pini, 2012. 460 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Boletim Técnico: Fabricação de Tijolos de Solo-Cimento com a Utilização de Prensas Manuais – BT-111**. 3ed. rev. atual. São Paulo, 2000. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio**. São Paulo, 2004. 57p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

BAUER, L.A F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 538 p. 2 v.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 24 jul. 2024.

CAMPBELL, Aluisio Pimentel. **Análise da substituição da areia por resíduos de vidro na construção civil**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXXIII, Nº. 000229, 24/01/2023.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**: Fundamentos. 6. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

COSTA, I. A.; SCHNEIDER, R. Estudo da viabilidade da substituição de aglomerante por resíduos vítreos na produção de pavimento intertravado de concreto. Capítulo 5. **Força, crescimento e qualidade da engenharia civil no Brasil 3**. Editora Atena, p. 52-58, Ponta Grossa - PR, 2021.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 632 p.

EUPHROSINO, C.A. et al. **Tijolos de solo-cimento usados para Habitação de Interesse Social (HIS) em mutirão**: estudo de caso em olaria comunitária. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, 2022.

GIL, A. D.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, J. L. M. DE; FELISMINO, T. R.; A, A. A. R. Tapos e bancadas de cimento e vidro triturado reciclado como alternativas sustentáveis a materiais de granito e mármore. In: XXII SEMANA UNIFICADA DE APRESENTAÇÕES – XXII SUA, 22. 2020. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Dr. Alexandre Saron, 2020. p. 1-29.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, 165 p.

MORAIS, A.; DOURADO, J. B. O. L.; LIMA, É. K. DE; RESENDE, C. X.; PAZ, G. M. DA; MATOS, J. M. E. DE; SANTOS, V. B. DOS. Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. **Cerâmica industrial**, v. 27, n. 1, p. 1–11, 2022. Disponível em:

<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2022.008/pdf/ci-27-1-1.pdf>.
Acesso em: 25 jul. 2024.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** / tradução: Ruy Alberto Cremonini. – 5. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2016.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**. Elmsford, 2000.