

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

**TIJOLOS ECOLÓGICOS REFORÇADOS: UTILIZAÇÃO DE SOLO
EÓLICO-CIMENTO SOB ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
E FIBRAS VEGETAIS DE CAPIM ANNONI**

Alegrete

2024

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

**TIJOLOS ECOLÓGICOS REFORÇADOS: UTILIZAÇÃO DE SOLO
EÓLICO-CIMENTO SOB ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
E FIBRAS VEGETAIS DE CAPIM ANNONI**

Defesa de dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Tecnologia dos Materiais e Meio Ambiente.

Orientador: Ederli Marangon

Co-orientador: Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Alegrete

2024

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C172t CAMPAGNOLO, LUCIELE BILHALVA

TIJOLOS ECOLÓGICOS REFORÇADOS: UTILIZAÇÃO DE SOLO EÓLICO-
CIMENTO SOB ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ E FIBRAS
VEGETAIS DE CAPIM ANNONI / LUCIELE BILHALVA CAMPAGNOLO.

128 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2024.

"Orientação: EDERLI MARANGON".

1. TIJOLOS ECOLÓGICOS VAZADOS. 2. SOLO EÓLICO-CIMENTO. 3.
SÍLICA DA CASCA DE ARROZ. 4. FIBRAS VEGETAIS DE CAPIM ANNONI.
I. Título.

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

**TIJOLOS ECOLÓGICOS REFORÇADOS: UTILIZAÇÃO DE SOLO
EÓLICO-CIMENTO SOB ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ
E FIBRAS VEGETAIS DE CAPIM ANNONI**

Dissertação defendida e aprovada em: 25/10/2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr.Ederli Marangon

Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr.Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Coorientador
UNIPAMPA

Profa. Dra Simone Dornelles Venquiaruto

UNIPAMPA

Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro

UFSM

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

**TIJOLOS ECOLÓGICOS REFORÇADOS: UTILIZAÇÃO DE SOLO EÓLICO-CIMENTO SOB
ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ E FIBRAS VEGETAIS DE CAPIM ANNONI**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 25/10/2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ederli Marangon

Orientador

(Unipampa)

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Coorientador

(Unipampa)

Profa. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto

(Unipampa)

Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro
(UFSM)



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/11/2024, às 17:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/11/2024, às 17:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/11/2024, às 18:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro, Usuário Externo**, em 04/11/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1563642** e o código CRC **B6A8C0C5**.

Dedico este trabalho aos meus familiares, em especial ao meu parceiro de todas as horas, Roberto, à minha mãe, Fátima, e ao meu amado pai, Luiz (*in memoriam*).

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Todos vocês foram essenciais na minha jornada.

Primeiramente, quero agradecer à minha família, em especial ao meu amor e companheiro Roberto. Obrigada por segurar a minha mão e mostrar que eu era capaz. Agradeço por me apoiar em todas as crises e por confiar em mim mais do que eu mesma (às vezes). Obrigada por todo amor e carinho diário, essencial para eu chegar até aqui. Obrigada por tudo!

Nos momentos difíceis, tive muito apoio dos meus anjinhos de quatro patas. Quando me via frente às dificuldades, sempre havia um deles para me consolar com uma lambida e um carinho. Cacau, Luna e Ted, sei que vocês não entendem, mas foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Obrigada, mãe, por tudo. Agradeço por entender sempre que eu não podia conversar contigo porque estava no computador. Saiba que quero sempre que você tenha orgulho de mim, por isso, às vezes abduco de lazer e me dedico tanto.

Gostaria de expressar minha imensa gratidão às minhas irmãs, Cláudia e Tatiana, e aos meus sobrinhos, João Vitor, Endriel, Maria Eduarda e Melissa. Vocês são a minha força e meu refúgio, e sou profundamente grata por tê-los em minha vida. O apoio, o amor e o carinho que sempre me ofereceram foram essenciais para que eu conseguisse alcançar esse sonho.

Minha profunda gratidão à minha amiga e comadre Luziele, por tudo o que já fez e continua fazendo por mim. Agradeço pela amizade, companheirismo, carinho e parceria ao longo desta jornada. Sou especialmente grata pela ajuda na confecção de mais um molde. Não tenho palavras suficientes para expressar minha gratidão e espero, um dia, poder retribuir tudo o que você fez por mim.

Obrigada meu amigo Eliseu, por ter aceitado me ajudar nas inúmeras horas de trabalho no laboratório, nas moldagens e nos ensaios. Agradeço por todo o apoio e dedicação que você sempre demonstrou, e espero um dia poder retribuir tudo o que fez por mim. Obrigada por não desistir!

Agradeço a todos os meus professores e mestres. Embora não mencione nomes para não correr o risco de esquecer alguém, reconheço o quanto cada um de vocês foi essencial ao longo da minha trajetória. Agradeço pela disposição em sempre ajudar e pelos valiosos ensinamentos que levarei comigo para toda a vida.

Agradeço aos técnicos de laboratório da UNIPAMPA, em especial ao Marcelo, a Raquel, o Juliano, o Felipi, a Rafaela, o Diogo e o Giulian. Agradeço imensamente toda a ajuda de vocês, vocês foram essenciais, sempre dispostos a ajudar no que fosse preciso.

Obrigada ao pessoal do grupo MAEC, em especial ao Rubens e Jaime. Agradeço

por toda a ajuda que recebi de vocês, sou grata.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, Geandra, Nathália Dotta, Lucas Tito, Luizele, Letícia, Érica, Mariana e Bruna, que sempre me ouviram, apoiaram, e me ofereceram palavras de carinho, compartilhando da minha alegria em cada conquista. Com o apoio e carinho de vocês consegui chegar até aqui. Sou imensamente grata por ter vocês ao meu lado.

Agradeço a todos os meus colegas do mestrado. Cada troca, cada ajuda, foram essenciais na minha jornada; agradeço de coração à todos vocês.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos e professores do SESC piscina. A natação, além de ser meu hobby, é a minha terapia, e a companhia de vocês torna meus dias melhores e mais leves. Obrigada por todo apoio que recebo de vocês e, agora, me cobrem a promessa de nadar 3 km!

Por fim, e não menos importante, agradeço à UNIPAMPA pela oportunidade de realizar este sonho. Gratidão!

”A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de tijolos ecológicos vazados a partir da mistura de solo eólico, cimento e sílica da casca de arroz (SCA), com e sem a incorporação de fibras vegetais de capimannoni. Para isso, inicialmente foram realizados ensaios preliminares de resistência à compressão simples, em corpos de prova cilíndricos compactados com o método Proctor Normal, isso com o intuito de avaliar o comportamento mecânico dos materiais e determinar o teor de umidade mais adequado para fabricação dos tijolos. Seguidamente, visando a incorporação de fibras vegetais do capimannoni nos tijolos ecológicos vazados, foram avaliados diferentes tamanhos de corte (1,5 cm, 2,5 cm e 3,0 cm), tratamentos superficiais das fibras sob imersão em solução de SCA-água (2:1) e imersão em solução de soda cáustica diluída (em concentração de 6%), além de avaliar os teores de fibra de 0,15%, 0,25% e 0,50% em substituição ao solo. Para fabricação dos tijolos vazados, foi confeccionado um molde metálico de aço comum, de acordo com as dimensões recomendadas pela norma ABNT NBR 8491 (2012) para tijolos do tipo A, com medidas de 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (comprimento x largura x altura) e uma distância entre furos de 5 cm. Em seguida, foram fabricados cinco lotes de tijolos ecológicos vazados, correspondentes às misturas de solo eólico-cimento-SCA-sem (SF) ou com (F) a incorporação de fibras de capimannoni: T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F. Após o período de cura em câmara úmida, os tijolos foram submetidos a ensaios laboratoriais, tais como: absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração na flexão em três pontos e durabilidade por ciclos de molhagem-secagem. Com base nos testes preliminares, os componentes (solo eólico, cimento e SCA) mostraram-se viáveis para aplicação na confecção dos tijolos ecológicos vazados, com teores de umidade entre 9% e 10% para o melhor desempenho de compressão. Quanto às fibras vegetais de capimannoni, mostraram-se adequadas para uso em tijolos ecológicos vazados, especialmente quando utilizadas no tamanho de 2,5 cm, tratadas com soda cáustica e em um teor de 0,15% como substituição parcial do solo. A incorporação das fibras contribuiu para um aumento de até 31% na resistência à tração na flexão dos tijolos, além de atender aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 8491 (2012), com médias de absorção de água abaixo de 20%. Embora as fibras tenham causado uma redução média de aproximadamente 9,68% na resistência à compressão, os valores obtidos foram superiores à 2,0 MPa, conforme o estabelecido pela referida normativa da ABNT. Finalmente, com o desenvolvimento desta pesquisa, conclui-se que as dosagens 79,85%-15%-5%-0,15% e 80%-15%-5%-0%, compostas por solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz-fibra de capimannoni, apresentaram resultados relevantes em termos de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade ao desgaste, demonstrando-se adequadas para a fabricação de tijolos ecológicos vazados e, constituindo alternativas viáveis do ponto de vista técnico e sustentável pelo uso de materiais alternativos na composição.

Palavras-chave: Tijolos ecológicos vazados. Solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz. Fibras vegetais de capimannoni.

ABSTRACT

The objective of this study is to develop eco-friendly hollow bricks using a mixture of aeolian soil, cement, and rice husk ash silica (RHA), with and without the incorporation of annoni grass fibers. Initially, preliminary compressive strength tests were conducted on cylindrical specimens compacted using the Standard Proctor method to assess the mechanical behavior of the materials and determine the optimal moisture content for brick fabrication. Following this, to incorporate annoni grass fibers into the hollow eco-friendly bricks, different fiber lengths (1,5 cm, 2,5 cm, and 3,0 cm), surface treatments (soaking in an RHA-water solution at a 2:1 ratio and soaking in a diluted caustic soda solution with a 6% concentration), and fiber contents of 0,15%, 0,25%, and 0,50% as partial substitutes for soil were evaluated. For the fabrication of the hollow bricks, a steel mold was made according to the dimensions recommended by standard ABNT NBR 8491 (2012) for type A bricks, with measurements of 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (length x width x height) and a spacing between holes of 5,0 cm. Subsequently, five batches of eco-friendly hollow bricks were manufactured, corresponding to mixtures of aeolian soil-cement-RHA without fibers (SF) or with (F) the addition of annoni grass fibers: T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0.15F, T80-15-5-SF, and T79,85-15-5-0.15F. After a curing period in a humid chamber, the bricks were subjected to laboratory tests such as water absorption, compressive strength, flexural tensile strength by three-point bending, and durability through wet-dry cycles. Based on preliminary tests, the components (aeolian soil, cement, and RHA) proved viable for the production of eco-friendly hollow bricks, with optimal moisture contents between 9% and 10% for the best compressive performance. As for the annoni grass fibers, they were found suitable for use in eco-friendly hollow bricks, particularly when used in 2,5 cm lengths, treated with caustic soda, and at a content of 0,15% as a partial replacement for soil. The fiber incorporation contributed to an increase of up to 31% in flexural tensile strength, in addition to meeting the requirements established by ABNT NBR 8491 (2012), with average water absorption values below 20%. Although the fibers caused an average reduction of approximately 9,68% in compressive strength, the resulting values remained above 2,0 MPa, as specified by the ABNT standard. Finally, through this research, it was concluded that the mixtures 79,85%-15%-5%-0,15% and 80%-15%-5%-0%, composed of aeolian soil-cement-RHA-annoni grass fibers, showed promising results in terms of mechanical strength, water absorption, and durability to wear. These mixtures are suitable for the production of eco-friendly hollow bricks and represent technically and sustainably viable alternatives due to the use of alternative materials in their composition.

Keywords: Hollow ecological bricks. Wind-blown soil-cement-silica from rice husk ash. Vegetable fibers from annoni grass.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento e do tempo de cura. | 29 |
| Figura 2 – Moldagem dos tijolos ecológicos: (A) Prensa manual utilizada; (B) Tijolo ecológico após moldagem. | 31 |
| Figura 3 – Configuração do teste de flexão em 3 pontos: (a) fotografia e (b) desenho esquemático. | 33 |
| Figura 4 – Análise da resistência mecânica à compressão e à flexão em relação ao teor de fibras: (A) Resistência à compressão (MPa) em função do teor de fibras (%); (B) Resistência à flexão (MPa) em função do teor de fibras (%). | 34 |
| Figura 5 – Fluxograma para representação da sequência adotada na pesquisa. . | 37 |
| Figura 6 – Imagem de satélite da área de coleta de amostras de solo eólico. . . | 38 |
| Figura 7 – Amostra de solo eólico. | 39 |
| Figura 8 – Amostra de sílica da casca de arroz. | 40 |
| Figura 9 – Coleta e preparo das fibras vegetais. | 41 |
| Figura 10 – Etapas de preparo das fibras de capimannoni: (a) desfibramento manual com escova de aço, (b) corte em três tamanhos, (c) fibras pré-secagem natural e, (d) fibras prontas pós-secagem natural . . . | 42 |
| Figura 11 – Etapas do tratamento com SCA nas fibras de capimannoni: (A) SCA e água; (B) Mistura homogênea de SCA e água; (C) Imersão das fibras na solução; (D) Fibras após a secagem em estufa; (E) Fibras tratadas com SCA prontas para utilização. | 43 |
| Figura 12 – Etapas do tratamento com soda cáustica nas fibras de capimannoni: (A) Imersão na solução; (B) Lavagem com água destilada; (C) Pré-secagem em estufa; (D) Fibras após secagem em estufa. | 44 |
| Figura 13 – Representação digital do tijolo ecológico vazado. | 46 |
| Figura 14 – Projeto digital do molde para tijolo ecológico vazado: (A) Vista frontal do molde completo; (B) Tampa superior; (C) Tampa inferior. | 46 |
| Figura 15 – Molde metálico para tijolos ecológicos vazados: (a) forma, (b) fundo e cilindros, (c) tampa superior, (d) molde montado para visualizar a parte interna, (e) molde completo montado e (f) parte interna montada com a forma, fundo e cilindros. | 47 |
| Figura 16 – Etapas da compactação: (a) e (b) Molde adaptado para compactação dinâmica, (c) Extração dos CPs e (d) CPs envoltos em papel filme e alocados para cura. | 49 |
| Figura 17 – Execução do ensaio de resistência à compressão. | 49 |
| Figura 18 – Moldagem dos tijolos ecológicos maciços em prensa hidráulica. . . . | 52 |
| Figura 19 – Etapas do ensaio de resistência à compressão: (A) Corte; (B) Capeamento; (C) Imersão em água; (D) Compressão. | 53 |
| Figura 20 – Etapas de fabricação dos tijolos ecológicos vazados: preenchimento do molde (a), prensagem (b), desmoldagem (c) e cura em câmara úmida (d). | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 – Ensaio de absorção de água: (a) imersão em água e (b) secagem em estufa. | 58 |
| Figura 22 – Execução das etapas de corte e capeamento nos tijolos vazados: (a) marcação na metade do comprimento para o corte, (b) tijolos cortados, (c) capeamento sendo executado, (d) capeamento finalizado e nivelado. | 59 |
| Figura 23 – Pintura estocástica aplicada aos tijolos ecológicos vazados com 28 dias de cura. | 59 |
| Figura 24 – Execução do ensaio de resistência à compressão. | 60 |
| Figura 25 – Esquema de execução do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos em tijolos ecológicos. | 61 |
| Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos. | 62 |
| Figura 27 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos: (a) visualização frontal do ensaio e (b) visualização lateral e traseira do ensaio. | 63 |
| Figura 28 – Distribuição granulométrica dos materiais: Solo eólico, cimento e sílica da casca de arroz (SCA). | 66 |
| Figura 29 – Análise mineralógica visual das amostras de solo eólico: (a) Fração Total e (b) Fração Fina | 68 |
| Figura 30 – MEV das fibras vegetais de capimannoni sem tratamento. | 69 |
| Figura 31 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni sem tratamento. | 69 |
| Figura 32 – MEV das fibras vegetais de capimannoni tratadas com SCA. | 70 |
| Figura 33 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni tratadas com SCA. | 70 |
| Figura 34 – MEV das fibras vegetais de capimannoni tratadas com soda cáustica. | 71 |
| Figura 35 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni tratadas com soda cáustica. | 71 |
| Figura 36 – Curvas de compactação proctor normal das dosagens de solo eólico-cimento-SCA. | 73 |
| Figura 37 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-0-20. | 74 |
| Figura 38 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-5-15. | 74 |
| Figura 39 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-10-10. | 75 |
| Figura 40 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-15-5. | 75 |
| Figura 41 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-20-0. | 76 |
| Figura 42 – Influência do tamanho das fibras de capimannoni tratadas com SCA na resistência à compressão dos tijolos maciços. | 80 |
| Figura 43 – Influência dos tratamentos superficiais aplicados nas fibras de capimannoni na resistência à compressão dos tijolos maciços. | 81 |
| Figura 44 – Tijolo ecológico vazado sem fibras vegetais de capimannoni do traço T80-10-10-SF: (a) vista superior e, (b) vista lateral. | 85 |
| Figura 45 – Tijolo ecológico vazado com fibras vegetais de capimannoni do traço T79,85-10-10-0,15F: (a) vista superior e, (b) vista lateral. | 86 |

| | |
|---|-----|
| Figura 46 – Comparação da resistência à compressão aos 28 dias dos tijolos em função do teor de fibras de capimannoni nas diferentes dosagens. . . | 91 |
| Figura 47 – Análise do comportamento da resistência à compressão dos tijolos vazados aos 28 dias de cura em relação a variação do teor de cimento e de SCA aplicado nas dosagens. | 92 |
| Figura 48 – Comparação do modo de falha e ruptura na resistência à compressão das diferentes dosagens aplicadas aos tijolos ecológicos vazados. . . | 96 |
| Figura 49 – Análise do comportamento da resistência à tração na flexão dos tijolos vazados aos 28 dias de cura em relação à variação do teor de cimento e de SCA aplicado nas dosagens. | 99 |
| Figura 50 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados, com e sem fibras vegetais de capimannoni, nas dosagens contendo 10% de cimento e 10% de SCA na mistura. | 101 |
| Figura 51 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados, com e sem fibras vegetais de capimannoni, nas dosagens contendo 15% de cimento e 5% de SCA na mistura. | 102 |
| Figura 52 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados sem fibras. | 102 |
| Figura 53 – Comparação do modo de falha na resistência à tração na flexão em 3 pontos aplicadas nos tijolos ecológicos vazados sob diferentes dosagens. | 104 |
| Figura 54 – Superfície de fratura dos tijolos ecológicos vazados: (a): Tijolos com fibras; (b) Tijolos sem fibra. | 105 |
| Figura 55 – Resultados de porcentagem média da perda de massa para as diferentes dosagens dos tijolos ecológicos vazados. | 106 |
| Figura 56 – Resultados médios de resistência à compressão dos tijolos ecológicos vazados antes e após os ciclos de molhagem-secagem. | 107 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Tipos e dimensões de tijolos ecológicos de solo-cimento | 36 |
| Tabela 2 – Composição da sílica da casca de arroz (SCA). | 41 |
| Tabela 3 – Indicadores de qualidade da água potável de Alegrete-RS. | 45 |
| Tabela 4 – Dosagens da mistura de solo eólico-cimento-SCA em corpos de prova cilíndricos. | 48 |
| Tabela 5 – Detalhamento dos lotes de tijolos ecológicos maciços fabricados a partir da dosagem T80-10-10 (solo eólico-cimento-SCA) sob diferentes tamanhos, tratamentos e teores de fibras de capimannoni | 51 |
| Tabela 6 – Composições das formulações testadas em tijolos ecológicos vazados aos 7 dias de cura | 54 |
| Tabela 7 – Dosagens finais dos materiais: solo eólico, cimento, SCA, fibras de capimannoni, teor de água e massa específica aparente seca empregados na fabricação dos tijolos ecológicos vazados | 55 |
| Tabela 8 – Ensaio laboratoriais realizados para avaliação das propriedades dos tijolos ecológicos vazados | 57 |
| Tabela 9 – Caracterização geotécnica, massa específica dos grãos e classificação do solo eólico de Alegrete-RS. | 65 |
| Tabela 10 – Composição química do solo eólico por Fluorescência de Raios X (FRX) | 67 |
| Tabela 11 – Teor de água e massa específica aparente seca correspondente ao melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão em CP's cilíndricos | 77 |
| Tabela 12 – Valores médios de resistência à compressão em tijolos maciços com fibras vegetais de capimannoni sob diferentes tamanhos, tratamentos e teores. | 78 |
| Tabela 13 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão nos tijolos maciços com fibras tratadas com SCA. | 79 |
| Tabela 14 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes tamanhos de fibras de capimannoni tratadas com SCA. | 79 |
| Tabela 15 – Efeito dos tratamentos superficiais das fibras de capimannoni na resistência à compressão de tijolos maciços: análise de variância (ANOVA). | 80 |
| Tabela 16 – Resultados do teste de Tukey para comparação do efeito dos tratamentos das fibras de capimannoni na resistência à compressão dos tijolos maciços. | 81 |
| Tabela 17 – Valores médios de resistência à compressão aos 7 dias de cura em tijolos ecológicos vazados. | 82 |
| Tabela 18 – Dosagens definitivas dos materiais para fabricação dos tijolos ecológicos vazados. | 84 |
| Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos ecológicos vazados: médias, desvio padrão e coeficiente de variação (CV). | 87 |
| Tabela 20 – Comparação entre dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura para absorção de água em tijolos ecológicos. | 88 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 21 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para absorção de água nos tijolos ecológicos vazados. | 89 |
| Tabela 22 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de absorção de água entre diferentes dosagens. | 89 |
| Tabela 23 – Valores médios de resistência à compressão (MPa), desvios padrão, coeficientes de variação (CV) dos tijolos ecológicos vazados após 28 dias de cura | 90 |
| Tabela 24 – Comparação entre dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura para resistência à compressão em tijolos ecológicos. . . | 93 |
| Tabela 25 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão nos tijolos ecológicos vazados. | 94 |
| Tabela 26 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes dosagens. | 94 |
| Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos: médias, desvio padrão e coeficiente de variação (CV%) | 97 |
| Tabela 28 – Comparação das dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura em tijolos ecológicos. | 98 |
| Tabela 29 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à tração na flexão em 3 pontos nos tijolos ecológicos vazados. | 100 |
| Tabela 30 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes dosagens. | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Cimento Portland

CPC – Corpo de prova cilíndrico

FRX – Fluorescência de raios-X

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MPa – Mega Pascal

NBR – Norma Brasileira

RS – Estado do Rio Grande do Sul

SCA – Sílica da casca de arroz

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

Sumário

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 19 |
| 1.2 | Objetivos específicos | 19 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 | TIJOLOS ECOLÓGICOS | 20 |
| 2.2 | COMPOSIÇÃO | 21 |
| 2.2.1 | Solo | 21 |
| 2.2.2 | Cimento | 22 |
| 2.2.3 | Materiais alternativos | 24 |
| 2.2.3.1 | Sílica da casca de arroz (SCA) | 24 |
| 2.2.3.2 | Fibras vegetais | 25 |
| 2.3 | ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO | 28 |
| 2.3.1 | Dosagem dos componentes | 28 |
| 2.3.2 | Mistura dos componentes, moldagem e processos de cura . . . | 30 |
| 2.3.3 | Ensaio laboratoriais | 32 |
| 2.4 | ESTUDOS DE CASO: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DESEMPENHO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS | 32 |
| 2.5 | TIPOS E APLICAÇÕES DE TIJOLOS ECOLÓGICOS | 35 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 3.1 | MATERIAIS E TESTES DE CARACTERIZAÇÃO | 38 |
| 3.1.1 | Solo eólico | 38 |
| 3.1.2 | Cimento | 39 |
| 3.1.3 | Sílica da casca de arroz | 40 |
| 3.1.4 | Fibras vegetais de capimannoni | 41 |
| 3.1.4.1 | Coleta das fibras | 41 |
| 3.1.4.2 | Desfibramento manual, corte e tratamentos superficiais apli- cados nas fibras vegetais | 42 |
| 3.1.4.3 | Análise da superfície das fibras de capimannoni: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia estereoscópica | 44 |
| 3.1.5 | Água | 44 |
| 3.2 | MÉTODOS | 45 |
| 3.2.1 | Confecção do molde para tijolos ecológicos vazados | 45 |
| 3.2.2 | Testes preliminares para definir as composições dos materiais | 47 |
| 3.2.2.1 | Testes em Corpos de Prova Cilíndricos (CPC) | 47 |
| 3.2.2.2 | Testes preliminares para avaliar o efeito da incorporação de fibras vegetais em tijolos ecológicos maciços | 50 |
| 3.2.3 | Fabricação dos tijolos ecológicos vazados | 53 |
| 3.2.4 | Ensaio laboratoriais realizados em tijolos ecológicos vazados | 56 |
| 3.2.4.1 | Absorção de água | 57 |
| 3.2.4.2 | Resistência à compressão | 58 |
| 3.2.4.3 | Resistência à tração na flexão em três pontos | 61 |
| 3.2.4.4 | Durabilidade por ciclos de imersão e secagem | 64 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.2.4.5 | Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade | 64 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 65 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 65 |
| 4.1.1 | Caracterização do solo eólico, cimento Portland e sílica da casca de arroz (SCA) | 65 |
| 4.1.2 | Caracterização das fibras vegetais de capimannoni | 68 |
| 4.2 | TESTES PRELIMINARES | 72 |
| 4.2.1 | Testes em CP's cilíndricos para definição das dosagens de solo eólico-cimento-SCA-água | 72 |
| 4.2.2 | Testes para avaliar o efeito da incorporação de fibras vegetais em tijolos ecológicos maciços | 77 |
| 4.2.3 | Testes em tijolos ecológicos vazados | 82 |
| 4.3 | ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS VAZADOS | 84 |
| 4.4 | ENSAIOS LABORATORIAIS APLICADOS NOS TIJOLOS ECOLÓGICOS VAZADOS | 87 |
| 4.4.1 | Absorção de água | 87 |
| 4.4.2 | Resistência à compressão | 89 |
| 4.4.3 | Resistência à tração na flexão em 3 pontos | 97 |
| 4.4.4 | Durabilidade por ciclos de imersão e secagem | 105 |
| 4.4.5 | Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade | 106 |
| 5 | CONCLUSÕES | 109 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 113 |
| | REFERÊNCIAS | 114 |

1 INTRODUÇÃO

O setor de construção civil desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico de um país. Apesar disso, é importante reconhecer que essa atividade também pode gerar impactos ambientais devido ao elevado consumo de recursos naturais não renováveis, além de gerar resíduos e emissões de gases de efeito estufa. Diante disso, a crescente preocupação com a sustentabilidade na construção civil tem se intensificado, principalmente na busca por materiais e técnicas que minimizem os impactos gerados ao meio ambiente.

Os tijolos cerâmicos tradicionais utilizados na construção civil são feitos de argila crua ou barro, passando pelo processo de secagem e queima para se tornarem, então, um material sólido e durável. Esse processo de fabricação acarreta na emissão de uma quantidade significativa de gases de efeito estufa, sendo que cada tijolo de argila submetido à queima emite, aproximadamente, 0,41 kg de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (PADMALOSAN et al., 2023). No entanto, na busca de uma opção mais sustentável, surge o tijolo ecológico como uma alternativa promissora, pois são produzidos pela compressão homogênea de uma mistura de solo, água e um material estabilizador, que confere resistência e durabilidade ao produto sem necessitar da etapa de queima, minimizando o impacto ambiental e contribuindo para a preservação dos recursos naturais (MURMU; PATEL, 2018).

Além de ser uma opção sustentável, os tijolos ecológicos também oferecem outras vantagens em comparação aos tijolos cerâmicos tradicionais, como a redução na quantidade de recursos naturais necessários para a produção. Essa redução é alcançada pela inclusão de materiais alternativos no processo de fabricação, sendo objeto de vários estudos (THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022; NASCIMENTO et al., 2021; XIAO et al., 2022; ROCHA et al., 2021). Tal processo se dá pelo aproveitamento de materiais reciclados e/ou resíduos, tais como plásticos reciclados, resíduos diversos (industriais, agrícolas e de construção), bem como de fontes renováveis, como solos e fibras vegetais. Além disso, outra vantagem está na facilidade de montagem, pois os tijolos ecológicos são projetados para se encaixar perfeitamente uns nos outros, reduzindo o uso de argamassa (GRANDE, 2003).

É importante frisar que o solo é a principal matéria-prima renovável utilizada na fabricação de tijolos ecológicos. Estudos indicam que solos arenosos, com teor de areia entre 45% e 50%, são os mais adequados para essa produção, pois apresentam melhor desempenho em termos de resistência à compressão (FERREIRA, 2003; SOUZA; SEGANTINI; PEREIRA, 2008). Dessa forma, uma alternativa promissora é o uso de solos eólicos, oriundos do processo erosão eólica, conhecido como arenização. Tal processo erosivo ocorre em várias regiões do mundo, e se caracteriza pela predominância

de solos arenosos com a ausência de cobertura vegetal contínua, formando visualmente extensas áreas de solo exposto, representando 1/4 de toda a área terrestre global (HE et al., 2023). Vários estudos têm sido realizados para viabilizar o aproveitamento de solos eólicos na construção civil (ALKARNI; ELKHOLY, 2012; AL-TAIE; AL-SHAKARCHI; MOHAMMED, 2013; AL-AGHBARI; DUTTA, 2005; TIWARI; SHARMA; YADAV, 2016; GHRIEB; MITICHE-KETTAB; BALI, 2012), também como material de construção em concretos (LUO et al., 2013), argamassas e tijolos (ABU SEIF et al., 2016; ABU SEIF; SONBUL, 2019). Em todos os estudos supracitados, o cimento Portland foi o aglomerante mais comum empregado para o melhoramento dos solos eólicos.

Na fabricação de tijolos ecológicos, o cimento Portland é o material estabilizante mais comum utilizado, conhecido por conferir alta resistência ao produto mesmo em pequenas quantidades. No entanto, essa adição, embora pequena, pode resultar em fraturas frágeis, nas quais o material se rompe sem deformação significativa quando submetido a tensões de tração ou impacto. Para aprimorar a resistência à tração e evitar a ruptura frágil em materiais cimentícios, é fundamental incorporar materiais reforçadores, como resíduos ou fibras. A inclusão desses materiais de reforço tende a aumentar a resistência, coesão, ductilidade, tenacidade e flexibilidade da mistura de solo-cimento, além de contribuir para a redução da quantidade de cimento e dos custos de produção (ABIOGHILI; HAMIDI, 2019; AMARAL; HOLANDA, 2014).

A sílica da casca de arroz (SCA) surge como uma alternativa promissora e sustentável para substituir, parcialmente, o cimento Portland na fabricação de tijolos ecológicos. Estudos recentes indicam que a SCA tem grande potencial para atuar como um substituto eficaz em compósitos cimentícios, como concreto, argamassas e tijolos (FARIAS et al., 2024; MOURÃO et al., 2024; PADOIN et al., 2022; MENDONÇA, 2022; ROCHA et al., 2021; MARANGON et al., 2021). Conforme destacam os autores, dependendo da dosagem, o uso da SCA pode melhorar as propriedades mecânicas desses materiais, como resistência à compressão. Os autores também ressaltam que a SCA, amplamente disponível no Rio Grande do Sul, tem baixo custo de produção, pois é obtida da queima da casca de arroz, um resíduo orgânico abundante nas indústrias de beneficiamento da região. Segundo RODRIGUES et al. (2024), o uso desse subproduto oferece diversas vantagens, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade ao reutilizar um resíduo agroindustrial na produção de materiais de construção.

O uso de fibras vegetais em tijolos ecológicos é uma prática conhecida e muito utilizada, devido à sua ampla disponibilidade, renovabilidade, baixo custo e capacidade de melhorar as propriedades mecânicas do material, como resistência à tração e ductilidade (CARVALHO et al., 2019; OJO et al., 2019; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022; SUJATHA; MAHALAKSHMI; KANNAN, 2023). Nesse contexto, buscando a utilização de um material disponível em abundância na região do Rio Grande do Sul, ainda não

explorado como material de reforço em tijolos ecológicos, surge o capimannoni. Essa planta invasora, presente em grande parte do bioma Pampa, tem causado degradação significativa e diversos prejuízos ao longo dos últimos setenta anos (MEDEIROS; FOCHT, 2007). Considerada a espécie invasora mais agressiva e de difícil controle nos campos do Pampa, o capimannoni representa uma ameaça alarmante, especialmente porque, segundo BOLDRINI (2009), o bioma Pampa cobre cerca de 62,2% do território do Rio Grande do Sul, correspondendo a dois terços da área total do estado, evidenciando seu potencial devastador sobre o ecossistema local. Portanto, a utilização das fibras do capimannoni em tijolos ecológicos visa a redução do impacto ambiental causado pela espécie e oferece uma alternativa econômica, devido à sua elevada disponibilidade na região.

Com o intuito de incorporar materiais alternativos na fabricação de tijolos ecológicos vazados, este trabalho propõe o aproveitamento de solo eólico proveniente de uma área de arenização, do reaproveitamento de um resíduo agroindustrial (sílica da casca de arroz – SCA) e das fibras vegetais do capimannoni (*Eragrostis plana* Nees).

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o comportamento mecânico dos tijolos ecológicos vazados, confeccionados a partir da combinação da mistura solo eólico, cimento, sílica da casca de arroz, com e sem a incorporação de fibras vegetais de capimannoni.

1.2 Objetivos específicos

Destacam-se dentre os objetivos específicos:

- Determinar a dosagem de solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz e do teor de umidade na confecção de tijolos ecológicos vazados;
- Determinar o tamanho, o tratamento superficial e o teor de fibras vegetais de capimannoni na confecção de tijolos ecológicos vazados;
- Avaliar a resistência mecânica à compressão e resistência à tração na flexão, além da absorção de água, da durabilidade por imersão e secagem dos tijolos ecológicos vazados;
- Analisar a influência da incorporação de sílica da casca de arroz e de fibras vegetais de capimannoni nas propriedades físico-mecânica dos tijolos ecológicos vazados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIJOLOS ECOLÓGICOS

A utilização de tijolos ecológicos representa uma solução confiável e eficiente para edificações, atendendo as preocupações ambientais, pois podem ser produzidos a partir da compressão homogênea da mistura de solo, água e um material estabilizador (cimento Portland), sem a necessidade de queima, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente, além da possibilidade de incorporar na mistura os mais diversos tipos de resíduos, materiais reciclados e/ou fibras, tornando-o ainda mais ecologicamente correto e sustentável (MOTA et al., 2010; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022; DONKOR; OBONYO, 2016).

O tijolo é um dos materiais de construção mais antigos e amplamente empregados na construção civil. O emprego do tijolo cerâmico tradicional é predominante, com uma produção global de aproximadamente 1,391 trilhão de unidades fabricadas por ano, conforme relatado em 2013 (ZHANG, 2013). Buscando uma alternativa para reduzir o consumo de energia, os tijolos ecológicos ganham destaque, pois com o seu uso consegue-se uma redução de 10% no consumo de energia em comparação com os tijolos cerâmicos tradicionais (WALKER, 1995).

As vantagens do uso de tijolos ecológicos vão além das questões ambientais, refletindo também na economia do processo construtivo. Conforme apontado por SANTOS et al. (2009), esses tijolos proporcionam uma economia significativa de 30% a 50% do valor total de uma obra de alvenaria com tijolos cerâmicos. Essa economia pode ser atribuída a diversos fatores, como a redução de materiais com a possibilidade de uso de materiais reciclados, praticidade e mão de obra simplificada devido ao formato dos tijolos ecológicos, que permite um encaixe preciso entre as peças, contribuindo para a diminuição do consumo de argamassa para assentamento. Além disso, a presença de furos facilita a passagem de vigas e tubulações (CAMPOS; WEBER; BORGA, 2017; GRANDE, 2003; TEIXEIRA et al., 2021).

Os tijolos ecológicos de solo-cimento apresentam várias vantagens em comparação aos tradicionais, demonstrando alta resistência mecânica e uma durabilidade até 6 vezes superior (TEIXEIRA et al., 2021). Com base na pesquisa realizada por MOTTA et al. (2014), que avaliou a resistência à compressão e a absorção de água dos tijolos ecológicos de solo-cimento em comparação com os tijolos cerâmicos tradicionais, pode-se afirmar que os tijolos ecológicos apresentam maior resistência, menor absorção de água e maior durabilidade em relação aos tradicionais. Além disso, o uso de tijolos ecológicos proporciona maior conforto térmico nas edificações. De acordo com a pesquisa conduzida por ROMERO, FRANCISCA e GIOMI (2021), os tijolos de solo-cimento fabricados

com teores de cimento de 3% e 9% em peso exibiram baixa condutividade térmica e uma capacidade reduzida de transferência de calor com o ambiente.

Considerando o que foi apresentado, observa-se um aumento na procura por inovações no processo de produção dos tijolos ecológicos de solo-cimento, sendo um dos desafios encontrar maneiras eficientes de combinar técnicas de construção com o uso de materiais sustentáveis.

2.2 COMPOSIÇÃO

2.2.1 Solo

A utilização de solo na construção de habitações é um dos métodos mais antigos e comuns utilizados no mundo. Diante disso, o solo se tornou a principal matéria-prima na produção de tijolos ecológicos (VILELA et al., 2020). Entretanto, nem todos os solos são adequados para a fabricação de tijolos de solo-cimento, conforme destaca GRANDE (2003), é preciso atenção cuidadosa na escolha quanto ao tipo de solo, pois os mesmos podem interferir diretamente na resistência mecânica do material.

De acordo com NEVES (2003) e SOUZA, SEGANTINI e PEREIRA (2008), solos com teor de areia entre 50% e 90% são os mais adequados para a fabricação de tijolos de solo-cimento, proporcionando maior resistência mecânica com menor consumo de cimento. MILANI et al. (2020) analisaram a dosagem mínima de cimento para a estabilização de diferentes solos, observando que solos mais argilosos exigiram um teor maior de cimento para estabilização em comparação aos solos arenosos. FERREIRA (2003) constatou que a estabilização química com 6% e 10% de cimento em solos arenosos resultou em maior resistência à compressão em relação a solos argilosos. Já MILANI (2005) comparou tijolos ecológicos confeccionados com solos arenosos e argilosos, constatando maior resistência à compressão nos tijolos fabricados com solo arenoso.

GRANDE (2003) comenta que os solos argilosos, quando compactados, necessitam de maiores teores de água para atingirem a umidade ótima devido à maior área superficial, sendo assim, mais susceptíveis a fissuras, trincas e danos após a secagem, diminuindo a resistência mecânica e durabilidade do material. Entretanto, a presença de silte e argila na composição do solo é necessária para dar a mistura de solo-cimento coesão suficiente para compactação. Estudos realizados por SEGANTINI (2000), mostra que teores abaixo de 20% de finos (silte e argila) não propiciam compactação adequada para a produção de tijolos de solo-cimento.

Segundo LOPES (2002) a presença de impurezas orgânicas nos solos não é recomendada, uma vez que essas impurezas podem dificultar as reações de hidratação do cimento, tolerando-se, no entanto, um teor máximo de 2% de matéria orgânica.

Para a ABNT NBR 10833 (2012), as características adequadas do solo para produção de tijolos solo-cimento são:

- 100% do solo deve passar por peneira 4,8 mm;
- 10% a 50% do solo deve passar pela peneira 0,075 mm;
- O limite de liquidez seja igual ou inferior a 45%;
- O índice de plasticidade seja igual ou inferior a 18%.

O uso de solos eólicos, também chamados de areias eólicas, vem sendo explorado para diversas aplicações na construção civil (ALKARNI; ELKHOLY, 2012; LOPEZ-QUEROL et al., 2017). ALKARNI e ELKHOLY (2012) investigaram a influência da adição de cimento na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento de um solo eólico da Arábia Saudita, utilizando proporções variadas de cimento (5%, 7% e 9% em peso seco do solo) nas misturas. Os autores verificaram que o uso de cimento melhorou a resistência mecânica das areias eólicas, possibilitando sua aplicação em estradas e como material de fundação. Além disso, pesquisas como a de LOPEZ-QUEROL et al. (2017) avaliaram a utilização de areias eólicas na construção de aterros, por meio da estabilização química do solo sob diferentes teores de cimento (2%, 4% e 6% em peso seco do solo). Os resultados destacaram a viabilidade do uso desse tipo de areia eólica para aterros quando estabilizada com cimento, evidenciando melhorias nas propriedades geotécnicas do solo com o aumento da quantidade de cimento.

ABU SEIF et al. (2016) conduziram um estudo sobre o uso de areias eólicas coletadas em Jeddah e Mecca, na Arábia Saudita, para aplicações em materiais de construção. As amostras coletadas consistiram principalmente de areia, representando, em média, 2,4% de areia grossa, 19,97% de areia média e 76,28% de areia fina; o teor de partículas de silte e argila foi baixo nas amostras, em torno de 1%. Os resultados indicaram que o solo eólico investigado seria adequado para a fabricação de tijolos e argamassas, desde que misturado com agregados finos triturados. Além disso, os testes de resistência à compressão e trabalhabilidade mostram-se aceitáveis, desde que a proporção da mistura (solo eólico + agregado fino) não ultrapassasse 50% da quantidade total de solo eólico. Por fim, as características mineralógicas e químicas da areia eólica revelaram-se estáveis o suficiente para serem empregadas como agregados miúdos em materiais de construção.

2.2.2 Cimento

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002) define o cimento Portland como um pó fino com

propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. O cimento é amplamente empregado devido à sua fácil disponibilidade, capacidade de ganhar resistência rapidamente (em aproximadamente um mês) e considerável melhora na resistência à compressão (BARMAN; DASH, 2022).

O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado na fabricação de tijolos ecológicos de solo-cimento (NASCIMENTO et al., 2021; ROCHA et al., 2021; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022). No processo de fabricação, podem ser utilizados diferentes tipos de cimento, conforme orienta ??), tais como o cimento Portland comum (CP I e CP I-S), cimento composto (CP II-E, CP II-Z e CP II-F), cimento de alto-forno (CP III), cimento pozolânico (CP IV) e cimento de alta resistência inicial (CP V).

A adição de um aglomerante ao solo desempenha um papel fundamental, agindo como um estabilizante químico que une as partículas, proporcionando maior coesão (MAKUSA, 2013). Através das reações químicas, os aglomerantes reduzem as variações volumétricas causadas pela absorção e perda de umidade, diminuem a porosidade e, conseqüentemente, aumentam a resistência mecânica e a durabilidade do material resultante (PUPPALA, 2016).

O mecanismo de estabilização da adição de cimento ao solo envolve três processos, incluindo troca catiônica, hidratação cimentícia e reações pozolânicas (PRUSINSKI; BHATTACHARJA, 1999). Segundo MILANI e FREIRE (2006), na estabilização do solo com cimento, ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, resultando na formação de um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, proporcionando resistência inicial. Simultaneamente, ocorrem reações iônicas que levam à troca de cátions nas estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio liberados durante a hidratação do cimento. A cimentação que se desenvolve posteriormente é conhecida como reação pozolânica, e ela confere maior rigidez à mistura (PEREIRA, 2012).

A adição de cimento ao solo transforma-o em um material coeso, mais resistente e estável para várias aplicações na construção civil (OLIVEIRA, 2011). No entanto, essa adição, mesmo em pequenas quantidades, pode levar a fraturas frágeis, onde o material cimentício se rompe abruptamente sob tensão de tração ou impacto, resultando em rápida perda de resistência (HIBBELER, 2010). Para melhorar a resistência à tração, é essencial incorporar materiais reforçadores, como resíduos ou fibras, para conferir um comportamento mais dúctil de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação (AZEVEDO et al., 2021).

2.2.3 Materiais alternativos

Diante de um levantamento bibliográfico (RODRIGUES; HOLANDA, 2013; DONKOR; OBONYO, 2016; VILELA et al., 2020; ALSHUHAIL et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021; ROCHA et al., 2021; KETOV et al., 2021; SOUZA et al., 2021; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022), foi possível verificar que a incorporação de materiais alternativos em tijolos de solo-cimento oferece uma série de vantagens para o material, além de reduzir o consumo de cimento, essa prática melhora as propriedades de resistência à cargas de impacto, ductilidade e tenacidade do material, reduzindo significativamente o risco de fraturas frágeis típicas dos materiais cimentícios. Dentre os materiais alternativos possíveis, estão incluídos resíduos de diversas origens, materiais reciclados e fibras vegetais, proporcionando uma abordagem mais sustentável e eficiente para a produção de tijolos.

2.2.3.1 Sílica da casca de arroz (SCA)

A casca de arroz é um resíduo sólido que, atualmente, é em grande parte queimada para produzir energia ou eletricidade, gerando como subproduto uma considerável quantidade de cinzas, que após esse processo apresentam um teor de sílica superior a 92%, sendo denominada sílica da casca de arroz (SCA) (HOSSAIN; ROY, 2020; DAS et al., 2020; STOCHERO et al., 2017). De acordo com GOMES e MARTON (2015), o processo de combustão controlada (temperatura e tempo) da casca de arroz, além de melhorar a eficiência da queima, também permite a extração da SCA com qualidade constante, alto grau de amorficidade e, conseqüentemente, aumento da pozolanicidade. Esse material (SCA) tem sido amplamente utilizada em muitos campos industriais, como eletrônica, materiais químicos, materiais compósitos cerâmicos, argamassas e concretos (STOCHERO et al., 2017; MARANGON et al., 2021).

Visando uma construção mais sustentável, várias alternativas e pesquisas têm sido desenvolvidas nas últimas décadas para reduzir o consumo de cimento nas construções. Uma alternativa promissora envolve o reaproveitamento de resíduos, como a sílica da casca de arroz (MARANGON et al., 2021). Essa substituição gradual do cimento Portland pela sílica da casca de arroz tem demonstrado uma redução significativa no impacto ambiental, contribuindo para a sustentabilidade do material desenvolvido (CORDEIRO; FILHO; FAIRBAIRN, 2009; NAIR et al., 2008; TAYEH et al., 2021). Além disso, o uso de pozolanas reativas em substituição parcial do cimento Portland, contribui significativamente para o ganho de coesão e resistência à compressão da mistura (MARANGON et al., 2013). A literatura apresenta estudos envolvendo o uso de SCA como substituto do cimento em concretos (GOMES; MARTON, 2015; MSINJILI et al., 2017; TUAN et al., 2011; CHAO-LUNG; ANH-TUAN; CHUN-TSUN, 2011; TAYEH et

al., 2021), onde os autores obtiveram melhoras significativas na resistência à compressão e durabilidade do concreto com a incorporação da SCA em até 20%, devido à sua alta reatividade pozolânica e efeito de enchimento.

Em tijolos de solo-cimento, ROCHA et al. (2021) investigaram a adição de cinza da casca de arroz (CCA) em teores de 2,5% e 5% como substituto parcial do cimento Portland, avaliando os efeitos sobre a resistência à compressão e a absorção de água. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que a substituição de 2,5% de cimento por CCA foi a mais eficiente, promovendo um melhor desempenho, devido à capacidade das cinzas de preencher poros de menor diâmetro. No entanto, os autores verificaram que em teores mais elevados de cinza da casca de arroz (5%), houve aumento na formação de poros maiores, o que resultou em menor resistência à compressão e maior absorção de água. Apesar disso, os valores médios de resistência à compressão do estudo atenderam os requisitos da ABNT NBR 8491 (2012), com médias superiores a 2,0 MPa (20 kgf/cm²) e absorção de água abaixo de 20%.

Embora alguns estudos já tenham explorado a incorporação de sílica da casca de arroz em tijolos ecológicos, ainda há a necessidade de realizar mais pesquisas que comprovem os benefícios desse material, especialmente em termos de desempenho mecânico, durabilidade e sustentabilidade, promovendo o desenvolvimento de materiais de construção mais eficientes e com menor impacto ambiental.

2.2.3.2 Fibras vegetais

O emprego de fibras naturais em materiais cimentícios abrange considerações de natureza ambiental e tecnológica (AZEVEDO et al., 2021). Do ponto de vista ambiental, destaca-se a reutilização das fibras em materiais de construção, o que pode resultar na redução do impacto ambiental e contribuir para a preservação dos recursos naturais (XIAO et al., 2022). Já sob uma perspectiva tecnológica, as fibras naturais têm o potencial de fortalecer significativamente o compósito, melhorando suas propriedades mecânicas (encolhimento, resistência à tração e ductilidade) e favorecendo aplicações específicas (LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023; AZEVEDO et al., 2021).

CARVALHO et al. (2019) destaca que uma das principais características das fibras é seu potencial para fornecer reforço mecânico à matriz em que são inseridas, permitindo maior absorção de energia e, conseqüentemente, aumento da resistência à tração e tenacidade do material compósito resultante.

De acordo com o estudo realizado por OJO et al. (2019), a incorporação de fibras de sisal em materiais de construção de terra promoveu melhorias na resistência à flexão e na absorção de água. Além disso, a incorporação de fibras vegetais no solo demonstrou um notável potencial de reforço em materiais à base de terra, apresentando

um equilíbrio satisfatório entre resistência, densidade e ductilidade. Essa abordagem resulta em materiais de construção mais sustentáveis, com maior resistência à fraturas e contribuições positivas para o meio ambiente (OJO et al., 2019; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023).

As fibras vegetais oferecem diversas vantagens na sua aplicação, incluindo baixa massa específica, abrasividade reduzida, atoxicidade, biodegradabilidade, baixo custo e consumo de energia durante a produção, além de possuir baixa condutividade térmica, proporcionando um excelente isolamento térmico e acústico (LERTWATTANARUK; SUNTIJITTO, 2015). Com base na literatura, diversos estudos têm explorado o uso de fibras vegetais como reforço para tijolos ecológicos (LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023; TAALLAH; GUETTALA, 2016; BOUCHEFRA et al., 2022; NIYOMUKIZA et al., 2022; OJO et al., 2019; CARVALHO et al., 2019; LERTWATTANARUK; SUNTIJITTO, 2015), com o objetivo de obter melhorias nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, resistência à compressão e tenacidade, ao mesmo tempo em que buscam aprimorar o isolamento termoacústico desses materiais. Para otimizar o desempenho dos tijolos de solo-cimento com fibras, CARVALHO et al. (2019) destaca que é preciso avaliar os teores das fibras (dentro de limites adequados), seu módulo de elasticidade, coesão e aderência com o aglomerante da matriz, além de considerar sua composição e dimensões.

LATHA, MURUGESAN e THOMAS (2023) conduziram um estudo para avaliar a incorporação de fibras de sisal, em dois comprimentos diferentes (30mm e 50mm), tratadas com soda cáustica (NaOH), em solução de NaOH com água destilada em concentração de 5%, em tijolos ecológicos maciços, com o intuito de obter melhorias na resistência mecânica do material. As fibras foram adicionadas nas concentrações de 0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2,0% da massa seca total dos tijolos. Para aumentar ainda mais a resistência, o cimento foi misturado em diferentes quantidades (0%, 6%, 8%, 10% e 12%) com as fibras. Após 28 dias, os tijolos foram submetidos a testes de resistência à compressão e flexão. Os resultados revelaram que a incorporação de fibras de sisal nos tijolos ecológicos proporcionou melhorias na resistência mecânica do material e evitou a fratura frágil. Os melhores resultados de resistência à compressão e flexão foram alcançados na mistura contendo 10% de cimento e 1% de fibra de sisal, para ambos os comprimentos (30mm e 50mm).

O estudo de BOUCHEFRA et al. (2022) investigou aspectos físicos (densidade e absorção de água), propriedades mecânicas (resistência à compressão) e comportamento térmico de tijolos reforçados com fibras de palmeira brutas (RDF) e fibras de palmeira tratadas (TDF). O teor de fibras incorporado variou de 0% a 2% em massa. Os autores concluíram que a adição de fibras brutas e tratadas reduz a resistência à compressão em 25% e 35%, respectivamente. Além disso, a absorção de água aumentou com o

incremento do teor de fibras nos tijolos.

Um dos principais desafios ao empregar fibras naturais em materiais cimentícios está relacionado à elevada alcalinidade gerada pelos produtos de hidratação do cimento, ocasionando um ataque químico nas fibras pelo hidróxido de cálcio (AZEVEDO et al., 2021). Para superar essa questão, diversos estudos têm se dedicado a proteger as fibras por meio de sua impregnação com substâncias, mineralização ou pela aplicação de revestimentos externos como barreira física, visando conservar a integridade das fibras e melhorar a durabilidade e o desempenho dos compósitos (AZEVEDO et al., 2021; GUALBERTO et al., 2020). Além disso, a adesão da fibra na matriz cimentícia é influenciada pelas características atribuídas à zona de interface, que afeta diretamente o desempenho e a durabilidade do produto, sendo que a adesão fibra-matriz pode ser melhorada analisando a morfologia, rugosidade, absorção e porosidade da fibra (AZEVEDO et al., 2021).

Muitos estudos têm utilizado o tratamento alcalino com solução de hidróxido de sódio (NaOH), popularmente conhecido como soda cáustica, em fibras vegetais para sua aplicação em tijolos ecológicos (ALVAREZ; VÁZQUEZ, 2006; ??; TAALLAH; GUETTALA, 2016; OJO et al., 2019; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023). Os autores utilizam o tratamento com NaOH com o propósito de modificar a superfície das fibras buscando melhorar a adesão com a matriz, além de impermeabilizar a superfície das fibras para minimizar o ataque químico do cimento nas fibras, remover impurezas (hemiceluloses, lignina e outros resíduos), e também de reduzir o diâmetro das fibras. Conseqüentemente, os autores citados alcançaram uma melhoria significativa na adesão e no contato superficial entre as fibras e a matriz (solo-cimento) dos tijolos, resultando em aprimoramentos nas propriedades físico-mecânicas, termoacústicas e de durabilidade desses materiais.

Diversos métodos de tratamento superficial estão sendo explorados em fibras vegetais (CARDOSO, 2017; GARCEZ et al., 2022). No tratamento proposto por Cardoso (2017), ocorre a impregnação das fibras de sisal com uma solução de polímero termoplástico EPS dissolvido em solvente e sílica de casca de arroz (SCA), visando proteger as fibras da degradação pela matriz cimentícia. Porém, a alta densidade da solução causou aglutinação nas fibras, prejudicando a análise da interação fibra-matriz. Em outro estudo (GARCEZ et al., 2022), foram avaliados quatro métodos de impermeabilização de fibras de capimannoni visando diminuir a absorção de água e retardar a degradação. Os tratamentos investigados pela autora incluem sílica da casca de arroz (SCA), cal hidratada, cimento Portland e goma xantana. Os resultados indicaram que com o uso da SCA foi possível obter a menor absorção de água entre os tratamentos, indicando ser uma alternativa viável com potencial aplicabilidade.

Apesar da ampla disponibilidade das fibras de capimannoni (*Eragrostis Plana*

Nees) no Brasil, seu uso na construção civil ainda é pouco explorado. Alguns estudos (OLIVEIRA, 2016; COCCO et al., 2017) analisaram sua aplicação como reforço em matrizes cimentícias, demonstrando melhorias nas propriedades mecânicas e vantagens econômicas devido à abundância do capim *annoni*. No entanto, a produção de tijolos ecológicos com fibras de capim *annoni* carece de pesquisa específica, revelando uma lacuna nesse campo.

2.3 ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002), o processo de fabricação dos tijolos ecológicos de solo-cimento compreendem etapas simples e de baixo custo, tais como:

- Coleta, preparação e caracterização do solo;
- Dosagem dos componentes (solo, cimento, água e resíduos ou fibras), através da escolha dos traços que serão aplicados nos tijolos;
- Moldagem e desmoldagem dos tijolos;
- Processo de cura;
- Ensaio laboratoriais para controle e qualidade dos tijolos;
- Armazenamento adequado para manter a integridade do material.

2.3.1 Dosagem dos componentes

A escolha da melhor dosagem de solo-cimento ocorre a partir de um estudo experimental, através de sucessivos ensaios realizados com a mistura de solo, cimento e água, avaliando os resultados obtidos com critérios previamente estabelecidos. As normas técnicas ABNT NBR 12023 (2012) e ABNT NBR 12253 (2012), orientam as principais etapas para estabelecimento do teor de cimento:

1. Identificação do solo para prever o teor em cimento adequado;
2. Preparação das misturas com vários teores em cimento;
3. Ensaio de compactação para determinar o teor em água ótimo e a massa específica seca máxima de cada mistura;
4. Submeter os corpos de prova compactados, de cada mistura, ao ensaio de resistência à compressão simples após a cura (7 ou 28 dias).

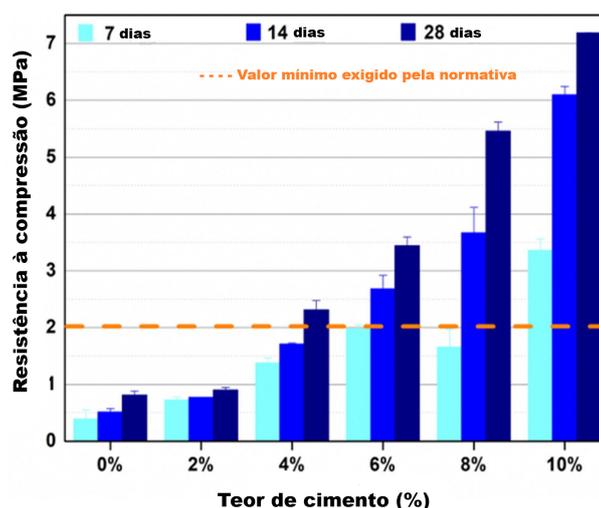
Após essas etapas, conforme orienta ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002), é realizada uma comparação entre a média da resistência obtida nos corpos de prova e a resistência à compressão mínima aceitável, conforme especificado pela ABNT NBR 8491 (2012), para a mistura em análise. O traço utilizado na produção dos tijolos deve assegurar que a média da resistência à compressão seja igual a 2,0 MPa (20 kgf/cm²), garantindo simultaneamente que nenhum dos valores individuais seja inferior a 1,7 MPa (17 kgf/cm²), após um mínimo de 7 dias de cura (ABNT NBR 8491, 2012).

De acordo com MURMU e PATEL (2018), independentemente do tipo de solo, o teor de cimento e a densidade são os principais fatores que afetam a resistência à compressão de tijolos ecológicos de solo-cimento. RIBEIRO, NÉRI e CARDOSO (2016) conduziram testes com misturas de solo-cimento, variando a dosagem de cimento de 13% a 17%, e constatou que a resistência à compressão é consistentemente maior nas misturas com maior dosagem de cimento.

As proporções típicas de cimento utilizadas na fabricação de tijolos ecológicos de solo-cimento variam de aproximadamente 5% a 15% de cimento em relação ao peso do solo (MOUIH et al., 2023; KONGKAJUN et al., 2020; VILELA et al., 2020; REBELLO; DEEKSHITHA; SHETTY, 2023).

MOUIH et al. (2023) produziram em seu estudo tijolos ecológicos com diferentes teores de cimento (2%, 4%, 6%, 8% e 10%), com o intuito de avaliar o efeito do teor de cimento na resistência à compressão (Figura 1) aos 7, 14 e 28 dias de cura.

Figura 1 – Variação da resistência à compressão em função do teor de cimento e do tempo de cura.



Fonte: Adaptado de MOUIH et al. (2023)

Com base na análise da Figura 1, fica evidente que há um incremento na

resistência à compressão conforme o teor de cimento é aumentado. Notavelmente, o traço com 10% de cimento se destaca ao apresentar o melhor desempenho em termos de resistência. Além disso, a partir do percentual de 4% de cimento e após um período de cura de 28 dias, a resistência à compressão dos tijolos atende às exigências estabelecidas pela norma ABNT NBR 8491 (2012), mantendo valores médios acima de 2,0 MPa.

2.3.2 Mistura dos componentes, moldagem e processos de cura

Após a determinação da dosagem dos componentes dos tijolos ecológicos, as etapas subsequentes envolvem a mistura dos materiais, moldagem e a cura. A revisão da literatura (VILELA et al., 2020; SOUZA et al., 2021; ROCHA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021) revela uma variedade de métodos empregados para esses processos na produção de tijolos. Dentre os exemplos de métodos de mistura estão a mistura manual ou através de um misturador elétrico, garantindo uniformidade para a prensagem. Da mesma forma, a moldagem poderá ser realizada em prensa manual ou hidráulica, que proporcionam diferentes níveis de compactação nos tijolos resultantes. Quanto à cura, pode ocorrer em câmaras de cura controladas com ajuste de temperatura e umidade, exposição ao ambiente natural ou uma combinação de ambos, por um determinado período, em geral, de 7 a 28 dias.

No estudo de VILELA et al. (2020), os componentes de cada formulação dos tijolos foram submetidos a um processo de secagem, pesagem e mistura utilizando um misturador planetário, visando obter uma consistência uniforme. Em seguida, a água foi incorporada, seguida por nova homogeneização, e a mistura resultante foi transferida para uma prensa hidráulica com motor de 7,5 CV para a moldagem dos tijolos maciços. A quantidade de água em cada formulação foi determinada através do teste de Proctor Normal. As dimensões dos tijolos produzidos foram de 25,0 cm × 12,5 cm × 5 cm (comprimento x largura x altura), em conformidade com as especificações da norma técnica da ABNT NBR 8491 (2012). Após a moldagem, os tijolos passaram pelo processo de cura realizado em um ambiente com temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade (95%) controlados por 28 dias. Após esse período, foram caracterizadas as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e microestruturais dos tijolos.

No experimento conduzido por SOUZA et al. (2021), os materiais para fabricação de tijolos ecológicos foram misturados utilizando um misturador Motomil-MB-150L. Inicialmente, os materiais secos foram misturados mecanicamente por 2 minutos para garantir a homogeneização das composições, com a abertura do misturador sendo selada para evitar perda de material. A água foi adicionada gradualmente enquanto a mistura continuava por mais 10 minutos. Após a preparação no misturador, as formulações foram peneiradas para eliminar aglomerados. A moldagem dos tijolos foi realizada com

uma prensa manual capaz de aplicar uma carga de 2,0 MPa de compactação. Os tijolos obtidos apresentavam dimensões de 5 cm × 10 cm x 21 cm. Os corpos de prova foram submetidos a um processo de cura úmida por 7 dias com água pulverizada manualmente, e depois permaneceram em local fechado à temperatura ambiente (26°C) com umidade relativa de 88,5% até os períodos de teste de 28 e 49 dias.

Durante o processo de fabricação de tijolos ecológicos realizado por ROCHA et al. (2021), os materiais (cimento, cinza da casca de arroz, solo e água) foram misturados de forma homogênea utilizando um misturador mecânico. A moldagem dos tijolos ocorreu manualmente, empregando uma prensa compressora (Figura 2), seguindo o padrão de tijolos vazados com dois furos e dimensões de 25 cm de comprimento, 12,5 cm de largura e 7,5 cm de altura. Após a produção, os tijolos foram submetidos a um processo de cura e secagem pelo período de 7, 28 e 56 dias, sendo mantidos no laboratório para proteção contra sol e chuva. Durante os primeiros 7 dias, os tijolos foram borrifados com água e foi colocado plástico no chão para evitar a perda de umidade.

Figura 2 – Moldagem dos tijolos ecológicos: (A) Prensa manual utilizada; (B) Tijolo ecológico após moldagem.



Fonte: ROCHA et al. (2021)

No estudo de NASCIMENTO et al. (2021) as matérias-primas foram misturadas manualmente. Inicialmente, o cimento, o solo e o resíduo foram misturados, adicionando-se posteriormente água com o auxílio de um regador. Os tijolos com dimensões de 24,6 cm de comprimento, 6,1 cm de altura, 12,1 cm de largura e 5,8 cm de abertura do furo, foram moldados em prensa manual de tijolos ecológicos, modelo Contenco

HD-200T, com capacidade de moldar um tijolo por vez. Na etapa de cura, os tijolos foram protegidos do sol e do vento em ambiente natural por um período de sete dias.

2.3.3 Ensaios laboratoriais

Os ensaios laboratoriais desempenham um papel fundamental na avaliação das propriedades dos tijolos ecológicos, pois abrangem uma variedade de características que são essenciais para determinar a qualidade e o desempenho desses materiais sustentáveis. Além dos testes mais comuns, como a avaliação da resistência à compressão e da absorção de água, também são conduzidos ensaios abordando outras propriedades, como a resistência à flexão (DONKOR; OBONYO, 2015; DONKOR; OBONYO, 2016; MOSTAFA; UDDIN, 2015; MOREL; PKLA, 2002), a durabilidade através da perda de massa por ciclos de molhagens e secagens (LIMA; NEVES; CARVALHO, 2010; SOUZA et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2021; VILELA et al., 2020), a condutividade térmica para análise do desempenho térmico (VILELA et al., 2020; KONGKAJUN et al., 2020), além da capacidade de isolamento acústico (RABELLO et al., 2019).

2.4 ESTUDOS DE CASO: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES E DESEMPENHO DE TIJOLOS ECOLÓGICOS

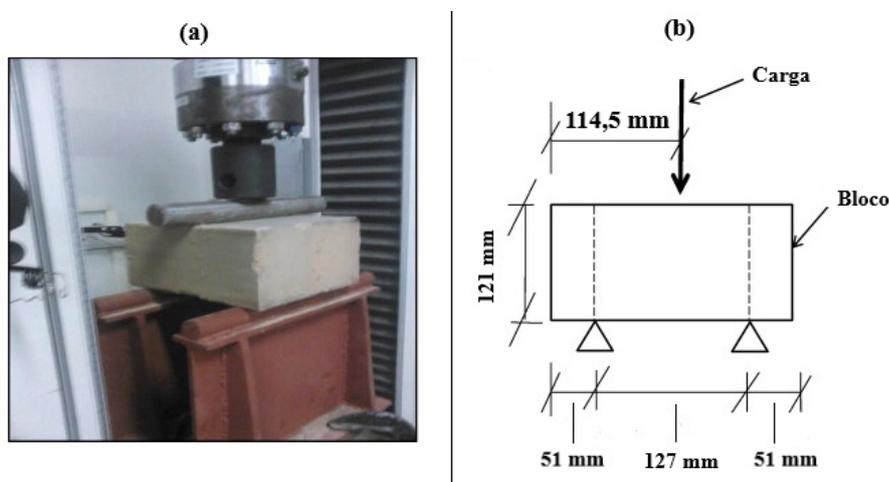
O estudo de KONGKAJUN et al. (2020) investigou as características de tijolos de solo-cimento, englobando densidade, resistência à compressão, absorção de água e condutividade térmica, ao incorporar subprodutos industriais, como resíduos de tijolos de argila e lodo residual proveniente da produção de fibrocimento. A inclusão dos subprodutos impactou negativamente na resistência à compressão e na absorção de água dos tijolos, resultando em desempenho inferior comparado aos tijolos de referência (compostos apenas por solo-cimento). No entanto, a densidade e a condutividade térmica dos tijolos com subprodutos apresentaram redução, demonstrando uma menor condutividade térmica quando comparados com a formulação de referência.

VILELA et al. (2020) avaliaram o impacto da substituição do solo por resíduos de mineração (0%, 10%, 20%, 30% e 40%) nas propriedades de tijolos de solo-cimento. Utilizando solo A-4, cimento CP V ARI e resíduos, foram analisadas propriedades físico-químicas. A proporção 1:9 (cimento:solo) com diferentes teores de resíduos foi adotada. Foram avaliadas densidade seca, absorção de água, perda de massa, resistência à compressão, condutividade térmica e microestrutura. Os resultados indicaram que a densidade dos tijolos foi influenciada pela quantidade de rejeitos de mineração, com maior adição resultando em maior densidade. A relação entre densidade e absorção de água foi observada, melhorando as propriedades dos tijolos com 40% de resíduos. A resistência à compressão atingiu padrões (mínimo 2,0 MPa) para todos os tratamentos,

destacando-se o tratamento com 10% de rejeitos que apresentou os melhores resultados tanto após 28 dias de cura quanto de envelhecimento acelerado. A condutividade térmica mostrou relação direta com a densidade, indicando que maior densidade (40% de resíduos) resultou em menor dissipação de calor.

No estudo realizado por DONKOR e OBONYO (2015), foi investigado o uso de fibras de polipropileno para melhorar a resistência, ductilidade e deformabilidade de tijolos ecológicos maciços. Os tijolos ecológicos foram fabricados com 8% de cimento em peso variando as proporções de peso de fibras (0,0%, 0,20%, 0,40%, 0,60%, 0,80% e 1,0%) e submetidos a testes de resistência à compressão e flexão em 3 pontos (Figura 3).

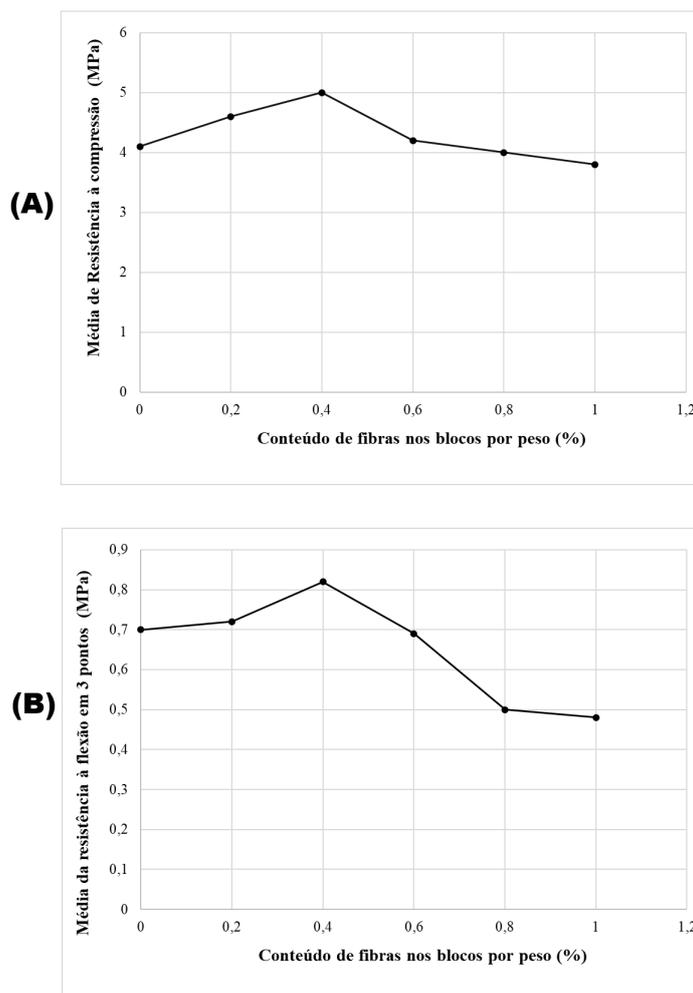
Figura 3 – Configuração do teste de flexão em 3 pontos: (a) fotografia e (b) desenho esquemático.



Fonte: Adaptado de DONKOR e OBONYO (2015).

A Figura 4 mostra os resultados médios de resistência à compressão (A) e flexão em 3 pontos (B) *versus* teor de fibras dos tijolos ecológicos.

Figura 4 – Análise da resistência mecânica à compressão e à flexão em relação ao teor de fibras: (A) Resistência à compressão (MPa) em função do teor de fibras (%); (B) Resistência à flexão (MPa) em função do teor de fibras (%).



Fonte: Adaptado de DONKOR e OBONYO (2015).

Conforme observa-se na Figura 4, tanto a resistência à compressão quanto a resistência à flexão em 3 pontos foram melhoradas em 22,5% e 22,0%, respectivamente, com 0,4% de teor de fibra em relação aos tijolos sem fibra. Após esse teor de fibra (0,4%), ambas resistências começaram a diminuir à medida que a fração de peso da fibra excedia 0,6%. Portanto, os autores recomendam não exceder 0,6% de teor de peso de fibra de polipropileno para a produção de tijolos de solo-cimento. Dessa forma, os autores concluíram que quando utilizadas na dosagem ideal (entre 0,4% e 0,6%) as fibras de polipropileno são viáveis para a produção de tijolos, contribuindo para o aumento da resistência mecânica, ductilidade e deformabilidade das matrizes solo-cimento.

LIMA, NEVES e CARVALHO (2010) investigaram diversas propriedades de tijolos ecológicos de solo-cimento produzidos com a incorporação de resíduo granítico em

proporções de 30%, 40% e 50% em peso. Os autores avaliaram a resistência à compressão simples e a absorção de água aos 7 e 28 dias de cura, a durabilidade por ciclos de molhagem e secagem (causando o envelhecimento acelerado do material), a perda de massa, a variação de volume e a resistência à compressão após o ensaio de durabilidade. Os resultados indicaram que a resistência à compressão ficou abaixo de 2,0 MPa em todas as proporções aos 7 e 28 dias. A adição crescente de resíduo aumentou a absorção de água, a perda de massa e a variação de volume. Após o ensaio de durabilidade, as amostras com 30% de resíduo apresentaram uma redução de 8% na resistência, enquanto as com 40% mostraram um aumento de 25%. As amostras com 50% tiveram uma redução de 36% na resistência, indicando que os tijolos com essa proporção de resíduo sofreram a maior redução na resistência pós-envelhecimento.

SOUZA et al. (2021) analisaram a utilização do efluente da mandioca, um subproduto da produção de farinha contendo amido, como substituto da água potável na fabricação de tijolos ecológicos de solo-cimento, com dois teores (6% e 12%) de cimento em peso. Foram conduzidos ensaios abrangendo resistência à compressão, absorção de água, durabilidade através de ciclos de molhagem-secagem, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura para avaliar propriedades mecânicas e de durabilidade dos tijolos. Os resultados obtidos mostraram que as composições utilizando o efluente da mandioca (EM) apresentaram resultados médios superiores em relação às produzidas com água potável para as mesmas proporções de cimento (6% e 12%). O tijolo fabricado com EM e 12% de cimento exibiram a maior resistência à compressão (4,9 MPa) e menor absorção de água (12,91%) aos 49 dias, além de uma perda de massa reduzida (0,3%) após seis ciclos de molhagem-secagem.

2.5 TIPOS E APLICAÇÕES DE TIJOLOS ECOLÓGICOS

No setor da construção civil, há uma variedade de tijolos ecológicos disponíveis, com diferentes modelos e dimensões, conforme apresentado na Tabela 1. Essa diversidade tem como objetivo satisfazer as demandas particulares de cada projeto, levando em consideração fatores como mão de obra, equipamentos e materiais disponíveis (SEGANTINI, 2000).

LIMA, NEVES e CARVALHO (2010) destacam que cada tipo de tijolo ecológico (maciço, vazado, com encaixes, 1/2 tijolo) oferecem soluções específicas para uma variedade de necessidades construtivas, tais como:

- Tijolo ecológico maciço: adequado para diversos usos em alvenarias de maneira semelhante ao tijolo cerâmico tradicional;

Tabela 1 – Tipos e dimensões de tijolos ecológicos de solo-cimento

| Tipo | Dimensões |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tijolo maciço comum | (5x10x20) cm |
| Tijolo maciço de encaixe | (5x10x21) cm |
| 1/2 tijolo maciço com encaixe | (5x10x10,5) cm |
| Tijolo com 2 furos e encaixe | (5x10x20) cm ou (7x12,5x25) cm |
| 1/2 tijolo com furo e encaixe | (5x10x10) cm ou (7x12,5x12,5) cm |
| Canaletas | (5x10x20) cm ou (7x12,5x25) cm |

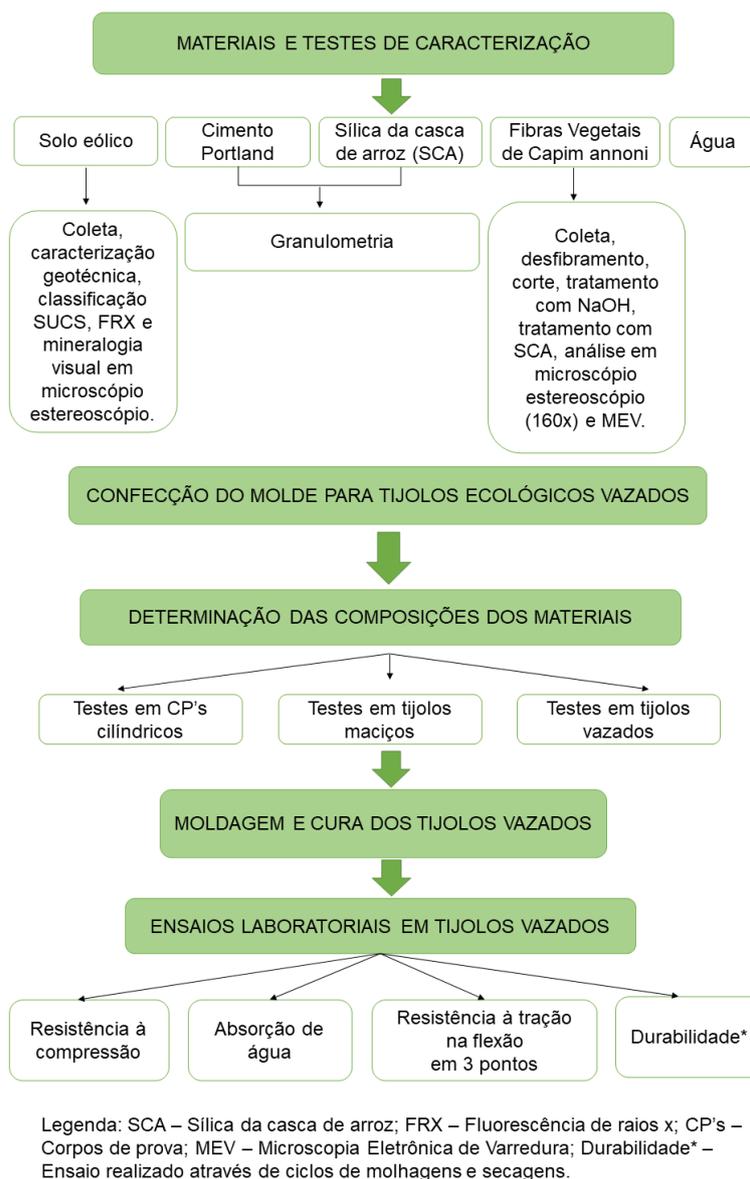
Fonte: Adaptado de SEGANTINI (2000)

- Tijolo maciço com encaixe: possibilita a redução do consumo de argamassa (GRANDE, 2003);
- Meio tijolo com encaixe: facilita conexões e amarrações, evitando a necessidade de quebras;
- Tijolo com dois furos: permite amarrações e passagem de tubulações;
- Caneletas: desempenham funções como vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e condução de tubulações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, tais como as matérias-primas empregadas, os equipamentos utilizados e as etapas que abrangem desde a fabricação até os ensaios laboratoriais para análise das propriedades físico-mecânicas e de durabilidade dos tijolos ecológicos vazados. A Figura 5 ilustra a sequência adotada para a realização da pesquisa.

Figura 5 – Fluxograma para representação da sequência adotada na pesquisa.



Fonte: A autora, 2024.

3.1 MATERIAIS E TESTES DE CARACTERIZAÇÃO

3.1.1 Solo eólico

O solo utilizado é proveniente de uma área de arenização eólica no sudoeste do Rio Grande do Sul, município de Alegrete, subdistrito do Durasnal, localizado nas coordenadas geográficas $29^{\circ}54'44.6''\text{S}$ e $55^{\circ}29'11.1''\text{O}$. A origem dos sedimentos do solo eólico está relacionada à geomorfologia da região, que favorece a formação de areais naturais que se desenvolvem a partir da degradação das rochas areníticas, resultando no retrabalhamento de areias dos arenitos Botucatu e Guará, além de sedimentos inconsolidados (PEDRON; DALMOLIN, 2019; SUERTEGARAY, 2011). A Figura 6 exibe a imagem de satélite dessa área.

Figura 6 – Imagem de satélite da área de coleta de amostras de solo eólico.



Fonte: Google Earth, 2024.

A Figura 7 exibe a amostra do próprio solo eólico, apresentando características visuais típicas de areia.

Figura 7 – Amostra de solo eólico.



Fonte: A autora, 2024.

No laboratório, as amostras de solo eólico foram homogeneizadas, quarteadas e secas até a umidade higroscópica. Os ensaios foram realizados em triplicatas, sendo realizados os ensaios de caracterização geotécnica, incluindo análise granulométrica pelo método do peneiramento (ABNT NBR 7181, 2016), determinação da massa específica dos grãos usando o picnômetro (ABNT NBR 6458 (2016) - Anexo B), limite de liquidez (ABNT NBR 6459, 2016) e limite de plasticidade (ABNT NBR 7180, 2016).

A composição química do solo eólico foi analisada usando o teste de fluorescência de raios X (FRX), que permite a quantificação das concentrações elementares. Os resultados deste método foram normalizados para um total de 100%, fornecendo uma representação clara da abundância relativa de cada elemento presente nas amostras de solo.

Duas amostras de solo eólico foram preparadas no laboratório de solos da UNIPAMPA, para análise visual da mineralogia, utilizando um microscópio trinocular com ampliação de 160x. A primeira amostra representava o solo em sua totalidade, enquanto a segunda correspondia à fração fina do solo (passante na peneira de 0,075 mm), já que essa fração mostrou a presença de outros minerais durante o ensaio de peneiramento. Complementarmente, durante a análise visual, foi aplicado ácido clorídrico (HCl) para verificar a presença de carbonatos no solo, uma vez que a reação entre HCl e carbonatos gera dióxido de carbono, água e cloreto de cálcio, observada por meio de efervescência ou borbulhamento (GONZÁLEZ, 2011).

3.1.2 Cimento

Para a produção dos tijolos ecológicos vazados, foi utilizado o cimento Portland CP V ARI, devido à sua alta reatividade inicial, ou seja, pelo fato de permitir um desenvolvimento de resistência mecânica mais rápido nas primeiras idades após a

fabricação. A caracterização do cimento foi realizada através da análise granulométrica pelo método de difração de raios laser.

3.1.3 Sílica da casca de arroz

A sílica da casca de arroz (SCA), ilustrada na Figura 8, foi fornecida pela Geradora de Energia Elétrica de Alegrete (GRRA) sob a marca comercial Silcca® Nobre – SBI. A incorporação da sílica visou proporcionar um efeito de enchimento (filler) na composição da mistura, promovendo uma melhoria na compactação da matriz ao reduzir os espaços vazios entre as partículas de solo e cimento, resultando em uma estrutura mais densa e coesa.

Figura 8 – Amostra de sílica da casca de arroz.



Fonte: A autora, 2024.

A sílica é produzida a partir da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado com temperatura controlada (750°C). A composição da SCA foi encontrada por Azolim (2022) e está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição da sílica da casca de arroz (SCA).

| Elemento | % em massa |
|---|------------|
| Dióxido de silício - SiO ₂ | 92,777 |
| Óxido de potássio - K ₂ O | 1,888 |
| Pentóxido de fósforo - P ₂ O ₅ | 0,704 |
| Óxido de cálcio - CaO | 0,673 |
| Dióxido de manganês - MnO ₂ | 0,38 |
| Cloro - Cl | 0,275 |
| Óxido sulfúrico - SO ₃ | 0,091 |
| Óxido de ferro (III) - Fe ₂ O ₃ | 0,055 |
| Óxido de európio (III) - Eu ₂ O ₃ | 0,036 |

Fonte: Azolim (2022).

A Tabela 2 mostra que a SCA possui elevado teor de pureza, alcançando o valor de 92% de SiO₂ e baixo teor de impurezas, mostrando-se viável tecnicamente para a produção de tijolos ecológicos.

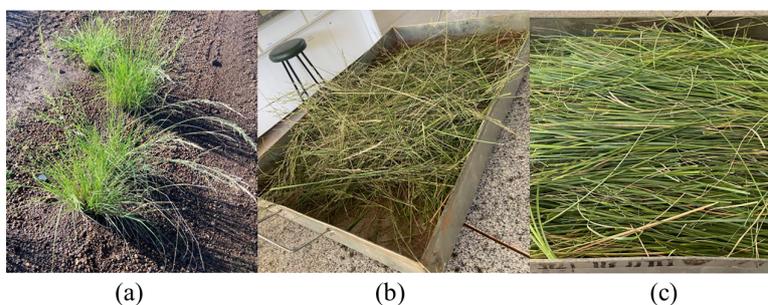
A SCA passou pela análise da granulometria através da difração de raios laser.

3.1.4 Fibras vegetais de capim annoni

3.1.4.1 Coleta das fibras

O capim annoni (*Eragrostis plana* Nees) é uma planta invasora amplamente disponível no Rio Grande do Sul. Sua utilização na fabricação de tijolos ecológicos é justificada pelo potencial de aprimorar as propriedades de resistência à tração dos materiais. O capim annoni foi coletado no município de Alegrete-RS, nas dependências da Universidade Federal do Pampa. Após a coleta, no laboratório, foram separadas e retiradas as partes de floração da planta, restando apenas a parte vegetativa das fibras (caule) para posterior preparo. A Figura 9 mostra a planta de capim annoni (a), as fibras antes da separação (b) e as fibras separadas (c).

Figura 9 – Coleta e preparo das fibras vegetais.



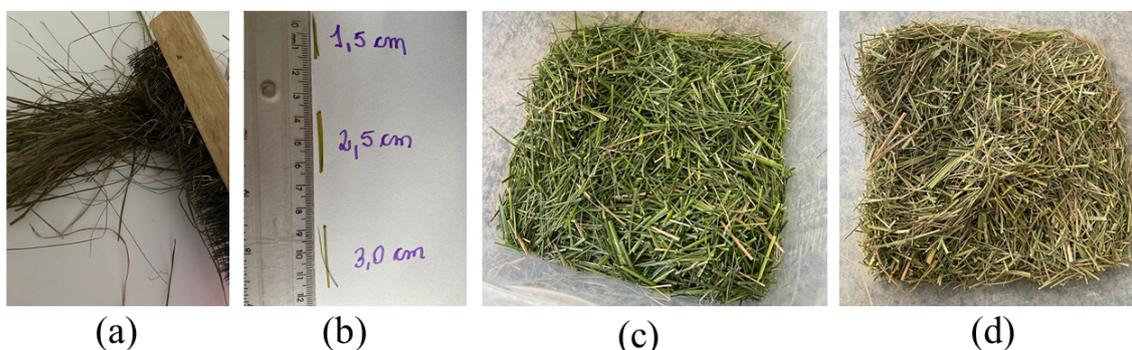
Fonte: A autora, 2024.

3.1.4.2 Desfibramento manual, corte e tratamentos superficiais aplicados nas fibras vegetais

Após a coleta, as fibras de capimannoni foram submetidas ao processo de desfibramento manual com o uso de uma escova de aço. Esse processo reduziu significativamente a espessura das fibras, que passaram a medir apenas 1 mm. Posteriormente, as fibras foram cortadas para melhorar o desempenho mecânico nos tijolos ecológicos, já que sem o corte, as fibras se apresentam muito longas, dificultando sua utilização. Para definir os tamanhos das fibras, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os tamanhos de fibras vegetais empregados em materiais compósitos (AYMERICH et al., 2016; PEREIRA, 2018; SILVEIRA, 2018; AMADO; REIS, 2019; CELESTINO et al., 2023; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023; JUNGES et al., 2024). Com base nesse levantamento, as fibras foram cortadas em três comprimentos distintos: 1,5 cm, 2,5 cm e 3 cm. Por fim, as fibras foram secas ao ar livre, de forma natural, por aproximadamente 48h.

A Figura 10 ilustra as etapas do processo de preparo das fibras vegetais de capimannoni, incluindo o desfibramento manual, o corte e as fibras pré e pós secagem natural.

Figura 10 – Etapas de preparo das fibras de capimannoni: (a) desfibramento manual com escova de aço, (b) corte em três tamanhos, (c) fibras pré-secagem natural e, (d) fibras prontas pós-secagem natural



Fonte: A autora, 2024.

Duas técnicas de tratamento superficial foram empregadas nas fibras com o propósito de melhorar sua estabilidade volumétrica, impermeabilização e aderência à matriz: uma com sílica da casca de arroz (SCA) e outra com soda cáustica (hidróxido de sódio - NaOH).

A metodologia proposta para o tratamento superficial das fibras de capimannoni à base de imersão na solução contendo sílica da casca de arroz (SCA), foi a mesma utilizada por GARCEZ et al. (2022). Esse tratamento consiste em realizar a diluição da SCA em água na proporção de 2:1, imergir as fibras pelo tempo de 120 minutos na

solução, retirar da solução, espalhar as fibras em uma bandeija e levar para secagem em estufa a 60°C pelo período de 48 horas. Após a secagem, as fibras são peneiradas para retirar o excesso de material não agregado. Na Figura 11, mostra-se a execução dos processos do tratamento com SCA.

Para o tratamento aplicado nas fibras de capimannoni através da solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH), popularmente conhecido como soda cáustica, a metodologia foi adaptada de estudos anteriores em diversas fibras vegetais (ALVAREZ; VÁZQUEZ, 2006; MOSTAFA; UDDIN, 2015; TAALLAH; GUETTALA, 2016; OJO et al., 2019; THANUSHAN; SATHIPARAN, 2022; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023). Neste procedimento, as fibras foram imersas em uma solução aquosa de NaOH a 6% em peso, utilizando água desmineralizada, o equivalente a 60 gramas de soda cáustica para cada litro de água desmineralizada, pelo período de 24 horas à temperatura ambiente. Após o tratamento, as fibras foram lavadas com água desmineralizada para remover o excesso de hidróxido de sódio e, em seguida, secas em estufa a 60°C por 24 horas. Observou-se, após a secagem, uma redução no volume das fibras e um aumento em sua rugosidade. A Figura 12 ilustra as etapas do tratamento com soda cáustica.

Figura 11 – Etapas do tratamento com SCA nas fibras de capimannoni: (A) SCA e água; (B) Mistura homogênea de SCA e água; (C) Imersão das fibras na solução; (D) Fibras após a secagem em estufa; (E) Fibras tratadas com SCA prontas para utilização.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 12 – Etapas do tratamento com soda cáustica nas fibras de capimannoni: (A) Imersão na solução; (B) Lavagem com água destilada; (C) Pré-secagem em estufa; (D) Fibras após secagem em estufa.



Fonte: A autora, 2024.

3.1.4.3 Análise da superfície das fibras de capimannoni: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia estereoscópica

As fibras vegetais de capimannoni foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para observar a superfície antes e após os tratamentos superficiais aplicados. As análises foram realizadas com um microscópio modelo MA-10, da marca Zeiss, no Laboratório de Imagens da Unipampa, Campus Alegrete-RS. Foram examinadas três amostras de fibras: fibras sem tratamento, fibras tratadas com soda cáustica e fibras tratadas com SCA, cada uma das três amostras com ampliações de 50x, 100x, 200x e 500x. Adicionalmente, essas amostras foram analisadas com um microscópio estereoscópico trinocular com aumento de 160x.

3.1.5 Água

Foi empregada água potável proveniente da rede de abastecimento da cidade de Alegrete-RS, fornecida pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN). Conforme estipulado na norma ABNT NBR 10833 (2012), a água destinada à produção de solo-cimento deve estar isenta de impurezas prejudiciais ao processo de hidratação do cimento. Tal condição é verificada através de indicadores de qualidade da água fornecido pela CORSAN, apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores de qualidade da água potável de Alegrete-RS.

| Parâmetro | Valor |
|-----------------------------|--------------|
| Turbidez (UT) | 0,30 |
| Cor (UH) | 0 |
| Cloro livre residual (mg/L) | 1,08 |
| Colliformes Totais | Ausente |
| Escherichia Coll | Ausente |

Fonte: Companhia Riograndense de Saneamento (2023).

3.2 MÉTODOS

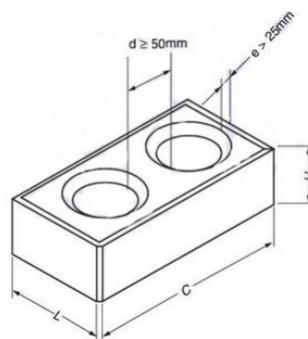
A metodologia empregada para a execução desta pesquisa consiste nas seguintes etapas, realizadas no laboratório de materiais e estruturas da UNIPAMPA:

- Confecção do molde para fabricação dos tijolos ecológicos vazados;
- Testes preliminares para definir as dosagens dos materiais (solo eólico-cimento-SCA-fibras-água);
- Dosagens finais dos materiais para a fabricação dos tijolos ecológicos vazados;
- Moldagem e cura dos tijolos ecológicos vazados;
- Execução dos ensaios laboratoriais nos tijolos ecológicos vazados.

3.2.1 Confecção do molde para tijolos ecológicos vazados

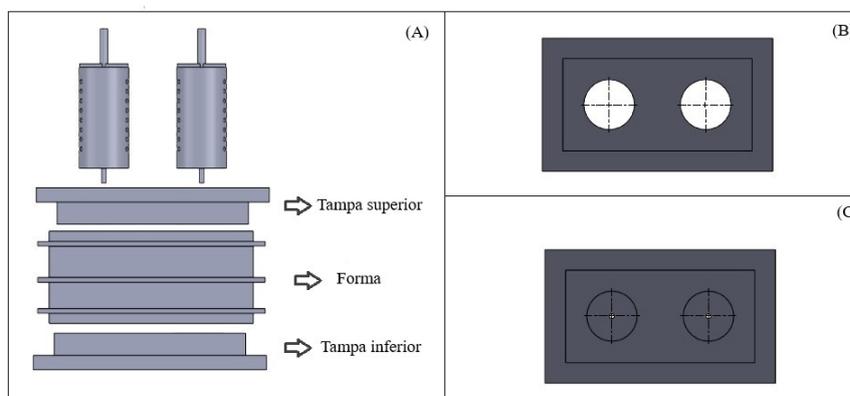
Para a fabricação dos tijolos ecológicos vazados (Figura 13) foi desenvolvido um molde metálico, nas dimensões sugeridas pela normativa ABNT NBR 8491 (2012), para produzir tijolos vazados do tipo A, com dimensões de 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (comprimento x largura x altura) e distância entre furos de 5 cm. O projeto inicial do molde foi realizado no *software* SolidWorks®, sendo composto por um fundo metálico com encaixe para dois cilindros que tiveram a função de preencher os furos, uma forma metálica reforçada para evitar deformações e uma tampa superior para prensagem, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 13 – Representação digital do tijolo ecológico vazado.



Fonte: ABNT NBR 8491 (2012).

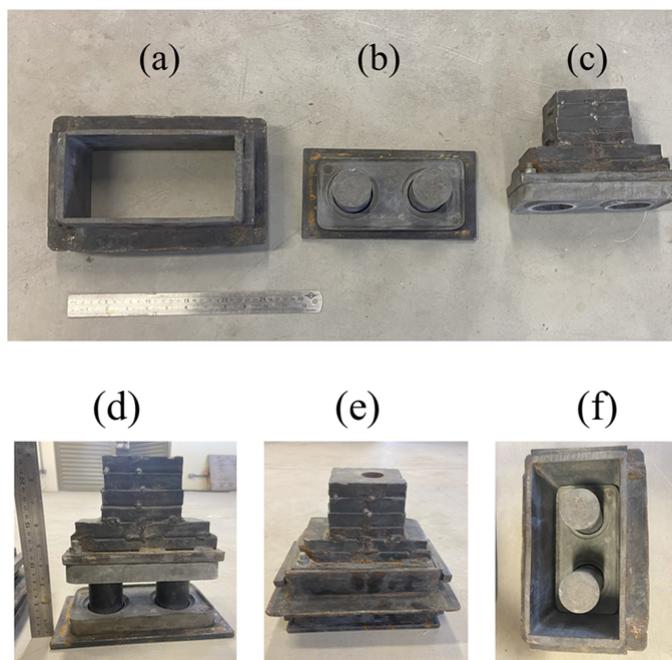
Figura 14 – Projeto digital do molde para tijolo ecológico vazado: (A) Vista frontal do molde completo; (B) Tampa superior; (C) Tampa inferior.



Fonte: A autora, 2024

A partir do projeto digital, foi fabricado o molde em aço comum. Durante a fabricação, foram realizados ajustes na tampa superior com a adição de placas de aço para suportar a carga de moldagem. A Figura 15 mostra o molde utilizado na fabricação dos tijolos ecológicos vazados.

Figura 15 – Molde metálico para tijolos ecológicos vazados: (a) forma, (b) fundo e cilindros, (c) tampa superior, (d) molde montado para visualizar a parte interna, (e) molde completo montado e (f) parte interna montada com a forma, fundo e cilindros.



Fonte: A autora, 2024.

Após a confecção, o molde foi testado na produção de tijolos ecológicos vazados e atendeu o objetivo de fabricar tijolos sob compressão confinada.

3.2.2 Testes preliminares para definir as composições dos materiais

Os testes preliminares para definir as composições dos materiais a serem utilizados na fabricação de tijolos ecológicos têm como objetivo garantir a qualidade e o desempenho mecânico do produto final. A seguir, são apresentados os testes preliminares realizados em corpos de prova cilíndricos, em tijolos maciços e tijolos vazados.

3.2.2.1 Testes em Corpos de Prova Cilíndricos (CPC)

Essa etapa preliminar foi conduzida em corpos de prova cilíndricos com o objetivo de avaliar o desempenho de diferentes dosagens dos componentes (solo eólico, cimento e SCA), variando densidades e teores de umidade, a fim de selecionar as dosagens e o teor de umidade mais adequados para a fabricação dos tijolos ecológicos vazados. As dosagens escolhidas devem alcançar resistência à compressão simples superior a 2,0 MPa, conforme exigido pela norma ABNT NBR 8491 (2012), além de otimizar o uso de

cimento, buscando a menor quantidade possível e determinando o teor de umidade que proporcione o melhor desempenho de resistência à compressão.

A análise seguiu as diretrizes das normativas ABNT NBR 12023 (2012) e ABNT NBR 7182 (2016), utilizando o método de compactação Proctor Normal para fabricar os corpos de prova cilíndricos com diferentes dosagens de solo eólico, cimento (CP V ARI) e SCA, e avaliando a resistência à compressão após 28 dias de cura.

As dosagens dos materiais foram elaboradas com base em um levantamento bibliográfico que analisou o uso de cimento Portland e materiais alternativos na fabricação de tijolos ecológicos (MOUIH et al., 2023; KONGKAJUN et al., 2020; VILELA et al., 2020; REBELLO; DEEKSHITHA; SHETTY, 2023; GRANDE, 2003; MILANI, 2005). A partir dessas referências, as proporções de cimento e SCA foram ajustadas, variando entre 0% e 20% em relação ao peso seco. A Tabela 4 apresenta as dosagens utilizadas na confecção dos corpos de prova cilíndricos.

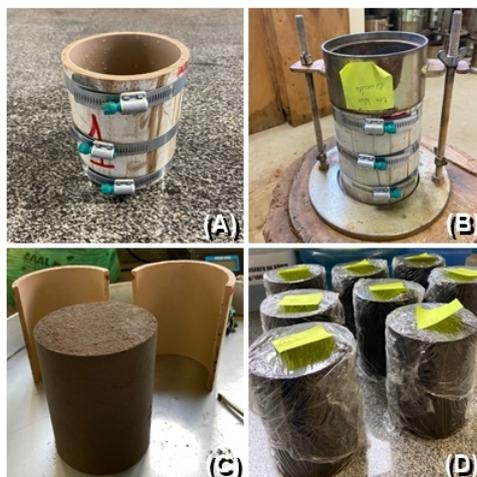
Tabela 4 – Dosagens da mistura de solo eólico-cimento-SCA em corpos de prova cilíndricos.

| NOMENCLATURA | SOLO EÓLICO | CIMENTO | SCA |
|---------------------|--------------------|----------------|------------|
| T80-0-20 | 80% | 0% | 20% |
| T80-5-15 | 80% | 5% | 15% |
| T80-10-10 | 80% | 10% | 10% |
| T80-15-5 | 80% | 15% | 5% |
| T80-20-0 | 80% | 20% | 0% |

Fonte: A autora, 2024.

Primeiramente, para cada dosagem dos componentes (solo eólico, cimento e SCA), foi realizada uma mistura manual com diferentes teores de umidade, variando de 6% a 16%. Em seguida, foram moldados 20 corpos de prova cilíndricos (CPC) para cada dosagem, com dimensões de 9,6 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura, pelo método de compactação Proctor Normal. Para facilitar a extração dos corpos de prova, a compactação foi realizada em um molde adaptado, confeccionado a partir de um tubo de PVC de 100 mm, cortado lateralmente e preso com três braçadeiras aparafusadas (Figura 16), mantendo as dimensões especificadas pelas normativas supracitadas. Após a compactação, os CPC foram retirados do molde, envoltos em papel filme e armazenados em local climatizado, com temperatura constante, para um período de cura de 28 dias. A Figura 16 ilustra o molde adaptado nas etapas (a) e (b), a extração dos CPC em (c) e a finalização do processo de compactação com os CPC na etapa de cura em (d).

Figura 16 – Etapas da compactação: (a) e (b) Molde adaptado para compactação dinâmica, (c) Extração dos CPs e (d) CPs envoltos em papel filme e alocados para cura.



Fonte: A autora, 2024.

Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 12025 (2012). Esse ensaio foi conduzido utilizando uma prensa hidráulica da marca EMIC com capacidade de 200 kN. Durante o ensaio, foi aplicado uma carga constante, com velocidade de 1,0 mm/min, até que o corpo de prova atingisse a carga máxima, momento no qual foi registrada a carga de ruptura. A Figura 17 mostra o ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 17 – Execução do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: A autora, 2024.

3.2.2.2 Testes preliminares para avaliar o efeito da incorporação de fibras vegetais em tijolos ecológicos maciços

Nessa etapa, foi realizada uma análise prévia para investigar o impacto da incorporação de fibras vegetais de capimannoni na resistência à compressão de tijolos ecológicos. Como o molde para tijolos vazados ainda não estava finalizado, os testes foram realizados em tijolos ecológicos maciços. O objetivo principal foi avaliar o efeito das fibras sobre a resistência dos tijolos e, com isso, definir o tamanho, o tratamento superficial e o teor das fibras a serem utilizadas nas dosagens finais para a fabricação dos tijolos ecológicos vazados.

Foram fabricados tijolos ecológicos maciços com dimensões de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 5 cm de altura, classificados como tipo A (ABNT NBR 8491, 2012). O processo de fabricação seguiu a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 8491 (2012) e adotada por Campagnolo (2022), utilizando a dosagem que apresentou o melhor desempenho em resistência à compressão no estudo da referida autora. Essa composição consistiu em 80% de solo eólico, 10% de cimento Portland (CP IV 32 RS) e 10% de sílica da casca de arroz (SCA), em peso. Para garantir consistência com o trabalho de Campagnolo (2022), foi empregado o cimento CP IV 32 RS exclusivamente nesta etapa. As fibras vegetais de capimannoni foram incorporadas substituindo parte do solo na dosagem, buscando manter a quantidade necessária de aglomerante (cimento) para garantir a integridade do material, ao mesmo tempo em que se aproveitam as propriedades benéficas das fibras, como a melhoria na resistência à tração e na ductilidade do material. Os tamanhos e teores das fibras foram definidos com base em uma revisão bibliográfica (PEREIRA, 2018; SILVEIRA, 2018; AMADO; REIS, 2019; CELESTINO et al., 2023; JUNGES et al., 2024).

Foram testadas fibras de capimannoni tratadas com solução de sílica da casca de arroz em três comprimentos diferentes (1,5 cm, 2,5 cm e 3 cm) e em dois teores de substituição ao solo (0,25% e 0,50% em peso). Além disso, foi testado o tratamento alcalino com soda cáustica (NaOH - hidróxido de sódio) apenas no comprimento de 2,5 cm e em dois teores de fibras em substituição ao solo (0,25% e 0,50% em peso). As fibras também foram testadas sem tratamento (testemunha) no comprimento de 2,5 cm em dois teores (0,25% e 0,50% em substituição ao peso de solo). A Tabela 5 detalha cada lote de tijolos ecológicos maciços que foram fabricados nesta etapa e o respectivo número de tijolos moldados. No total, foram produzidos 60 tijolos ecológicos maciços. Seguidamente, foi avaliada a resistência à compressão após 14 dias de cura, conforme a norma ABNT NBR 8492 (2012).

Tabela 5 – Detalhamento dos lotes de tijolos ecológicos maciços fabricados a partir da dosagem T80-10-10 (solo eólico-cimento-SCA) sob diferentes tamanhos, tratamentos e teores de fibras de capimannoni

| Nomenclatura | Teor de fibra | Tratamento | Tamanho | Nº Tijolos |
|---------------|---------------|------------|---------|------------|
| T025-SCA-1.5 | 0,25% | SCA | 1,5 cm | 6 |
| T050-SCA-1.5 | 0,50% | SCA | 1,5 cm | 6 |
| T025-SCA-2.5 | 0,25% | SCA | 2,5 cm | 6 |
| T050-SCA-2.5 | 0,50% | SCA | 2,5 cm | 6 |
| T025-SCA-3.0 | 0,25% | SCA | 3,0 cm | 6 |
| T050-SCA-3.0 | 0,50% | SCA | 3,0 cm | 6 |
| T025-SODA-2.5 | 0,25% | SODA | 2,5 cm | 6 |
| T050-SODA-2.5 | 0,50% | SODA | 2,5 cm | 6 |
| T025-TEST-2.5 | 0,25% | TESTEMUNHA | 2,5 cm | 6 |
| T050-TEST-2.5 | 0,50% | TESTEMUNHA | 2,5 cm | 6 |

Legenda: SCA: Sílica da casca de arroz; SODA: Soda cáustica; TESTEMUNHA: Sem tratamento superficial.

Fonte: A autora, 2024.

A mistura dos materiais (solo eólico, cimento e sílica de casca de arroz) foi realizada manualmente até a completa homogeneização em condições secas. Em seguida, as fibras foram adicionadas e misturadas. A quantidade de água adicionada para moldagem correspondeu ao teor de umidade ideal da mistura base (T80-10-10) definida por Campagnolo (2022). Posteriormente, a massa úmida a ser alocada no molde foi determinada buscando atingir a massa específica máxima da mistura referência ($2,0 \text{ g/cm}^3$). A mistura foi então prensada até alcançar as dimensões do tijolo ecológico maciço (20 cm x 10 cm x 5 cm), sem considerar a carga aplicada pela prensa. A prensagem foi realizada por uma prensa hidráulica uniaxial de 100 toneladas. Durante a prensagem, amostras da bandeja de mistura foram retiradas para determinar o teor de umidade real de cada tijolo. A Figura 18 mostra a etapa de moldagem dos tijolos ecológicos maciços.

Figura 18 – Moldagem dos tijolos ecológicos maciços em prensa hidráulica.



Fonte: A autora, 2024.

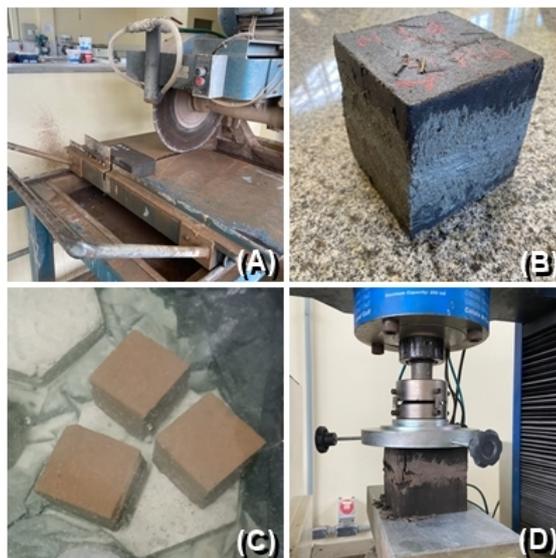
Após a moldagem, os tijolos foram alocados em câmara úmida pelo período de cura de 14 dias, sendo pulverizado água sobre eles nos 7 primeiros dias de cura. Ocorridos o tempo de cura, os tijolos foram submetidos ao teste de resistência à compressão simples, recomendado pela ABNT NBR 8492 (2012), que consiste nas seguintes etapas:

- Corte na metade do comprimento dos tijolos;
- Capeamento (união das faces inferior e superior) com uma fina camada de argamassa (até 3mm) composta de areia e cimento na proporção de 1:1;
- Secagem do capeamento pelo período de aproximadamente 48 horas;
- Verificar com o auxílio de um paquímetro as dimensões das faces e anotar para posterior cálculo da resistência à compressão;
- Imergir os tijolos em água pelo período de 6 horas antes do ensaio de resistência;
- Romper os tijolos imediatamente após retirada da água para realizar o ensaio na condição saturada do material.

O ensaio de resistência à compressão foi conduzido utilizando uma prensa hidráulica com capacidade máxima de 200 kN. A carga foi aplicada a uma taxa constante de 1 mm/min, e o ensaio foi interrompido quando a carga máxima começou a diminuir

e fissuras eram visíveis nos tijolos. A Figura 19 mostra a execução das etapas de corte, capeamento, imersão em água e ensaio de resistência à compressão realizados nos tijolos maciços.

Figura 19 – Etapas do ensaio de resistência à compressão: (A) Corte; (B) Capeamento; (C) Imersão em água; (D) Compressão.



Fonte: A autora, 2024.

Para determinar a resistência à compressão, seguiram-se as orientações da normativa ABNT NBR 8492 (2012), conforme a Equação 3.2, descrita na subseção 3.2.4.2.

3.2.3 Fabricação dos tijolos ecológicos vazados

Com base nos testes preliminares realizados em corpos de prova cilíndricos e tijolos ecológicos maciços, foram propostas diferentes dosagens para avaliar a eficácia das composições aplicadas aos tijolos vazados, garantindo que os mesmos atendam às propriedades mecânicas exigidas pela norma ABNT NBR 8491 (2012). Ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 dias de cura para selecionar as dosagens finais.

Para as dosagens testadas aos 7 dias, foram produzidos quatro tijolos vazados de cada formulação, no total de 36 tijolos ecológicos vazados. Os tijolos foram produzidos com e sem a incorporação de fibras vegetais de capimannoni cortadas manualmente no tamanho de 2,5 cm, sob diferentes proporções em substituição ao solo (0,15%, 0,25% e 0,50%) e com diferentes tratamentos superficiais empregados nas fibras (soda cáustica e sílica da casca de arroz). Os tijolos foram moldados com o teor de água que apresentou o melhor desempenho nos testes preliminares em CP's cilíndricos. As composições das

formulações aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados aos 7 dias de cura estão apresentadas e detalhadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Composições das formulações testadas em tijolos ecológicos vazados aos 7 dias de cura

| Nomenclatura | SOLO | CIM | SCA | Teor fibra | Tratamento |
|-----------------------|-------------|------------|------------|-------------------|-------------------|
| T80-5-15-SF | 80% | 5% | 15% | SF | - |
| T79,75-5-15-025F-SD | 79,75% | 5% | 15% | 0,25% | SODA |
| T79,50-5-15-050F-SD | 79,50% | 5% | 15% | 0,50% | SODA |
| T80-10-10-SF | 80% | 10% | 10% | SF | - |
| T79,75-10-10-025F-SD | 79,75% | 10% | 10% | 0,25% | SODA |
| T79,75-10-10-025F-SCA | 79,75% | 10% | 10% | 0,25% | SCA |
| T80-15-5-SF | 80% | 15% | 5% | SF | - |
| T79,85-15-5-015F-SD | 79,85% | 15% | 5% | 0,15% | SODA |
| T79,75-15-5-025F-SD | 79,75% | 15% | 5% | 0,25% | SODA |

Legenda: CIM: Cimento, SCA: Sílica da casca de arroz, SF: Sem fibra, SD: Soda cáustica.

Fonte: A autora, 2024.

Com base nos testes preliminares de resistência à compressão nos tijolos vazados (aos 7 dias), foram definidas cinco dosagens para serem aplicadas na fabricação final dos tijolos para realização dos ensaios laboratoriais, tais como absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração na flexão em 3 pontos, durabilidade por ciclos de molhagem-secagem e resistência à compressão após durabilidade.

Para as dosagens finais, foram moldados 21 tijolos de cada composição (lote), totalizando 105 tijolos vazados do tipo A, com dimensões de 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (comprimento x largura x altura) e distância entre furos de 5,0 cm. Foram confeccionados três lotes sem a incorporação de fibras (T80-5-15-SF, T80-10-10-SF e T80-15-5-SF) e dois lotes com a incorporação de 0,15% de fibras vegetais de capimannoni, em substituição ao solo (T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F), tratadas com soda cáustica e cortadas manualmente no tamanho de 2,5 cm. Para cada dosagem, foram utilizados os parâmetros definidos na etapa preliminar em corpos de prova cilíndricos (teor de água e massa específica aparente seca correspondentes ao melhor desempenho de resistência à compressão). A Tabela 7 apresenta os detalhes dessas dosagens finais aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados.

Tabela 7 – Dosagens finais dos materiais: solo eólico, cimento, SCA, fibras de capimannoni, teor de água e massa específica aparente seca empregados na fabricação dos tijolos ecológicos vazados

| TRAÇO | SOLO | CIM | SCA | FIBRAS | ÁGUA | ρ seca |
|--------------------|--------|-----|-----|--------|-------|------------------------|
| T80-5-15-SF | 80% | 5% | 15% | SF | 10,0% | 1,90 g/cm ³ |
| T80-10-10-SF | 80% | 10% | 10% | SF | 9,3% | 1,96 g/cm ³ |
| T79,85-10-10-0,15F | 79,85% | 10% | 10% | 0,15% | 9,3% | 1,96 g/cm ³ |
| T80-15-5-SF | 80% | 15% | 5% | SF | 9,0% | 2,04 g/cm ³ |
| T79,85-15-5-0,15F | 79,85% | 15% | 5% | 0,15% | 9,0% | 2,04 g/cm ³ |

Legenda: CIM: Cimento Portland; SCA: Sílica da casca de arroz; SF: Sem fibra.

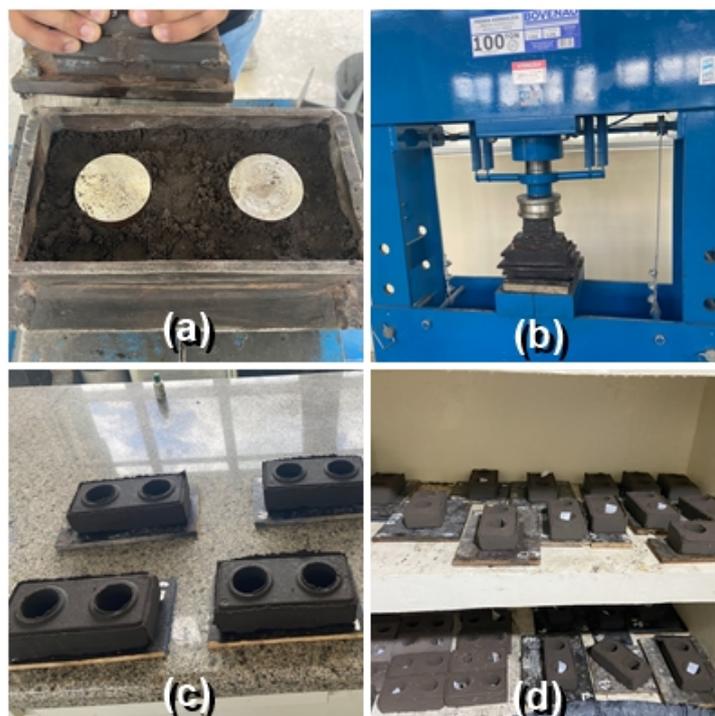
Fonte: A autora, 2024.

A moldagem dos tijolos ecológicos vazados começou com a mistura manual dos materiais secos (solo eólico, cimento, SCA e fibras) até a completa homogeneização. Em seguida, foi adicionado a cada dosagem o teor de água estabelecido na etapa preliminar realizada com corpos de prova cilíndricos. Cada formulação foi preparada com a umidade específica determinada, garantindo que todos os tijolos de uma mesma dosagem (lote) fossem fabricados com o mesmo teor de umidade. A umidade real de cada tijolo foi verificada por meio de amostras retiradas da bandeja após a mistura completa dos materiais.

A quantidade de massa úmida a ser alocada no molde foi calculada com base na massa específica aparente seca de cada dosagem, definida na etapa de testes com corpos de prova cilíndricos e fundamentada no melhor desempenho em compressão, visando garantir a qualidade e consistência dos tijolos produzidos. Após a massa úmida ser alocada no molde, realizou-se a prensagem manual em uma prensa hidráulica, aplicando uma carga de 40 toneladas para todos os tijolos fabricados. Em seguida, os tijolos foram desmoldados e colocados em uma câmara úmida para um período de cura de 7 ou 28 dias.

A Figura 20 mostra as etapas de preenchimento do molde (a), prensagem (b), desmoldagem (c) e cura (d) dos tijolos ecológicos vazados.

Figura 20 – Etapas de fabricação dos tijolos ecológicos vazados: preenchimento do molde (a), prensagem (b), desmoldagem (c) e cura em câmara úmida (d).



Fonte: A autora, 2024.

Após a cura, os tijolos ecológicos vazados, tanto com a incorporação de fibras vegetais quanto sem, foram avaliados quanto ao acabamento superficial e a variação diametral, para garantir a uniformidade dos lotes fabricados. Na etapa de avaliação do acabamento superficial, fotografias de alta resolução foram tiradas para documentar o estado final de ambos os tipos de tijolos vazados (com e sem fibras vegetais). Posteriormente, os tijolos foram submetidos aos ensaios laboratoriais.

3.2.4 Ensaios laboratoriais realizados em tijolos ecológicos vazados

Os ensaios laboratoriais foram realizados para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos tijolos ecológicos vazados. A Tabela 8 apresenta cada ensaio, o tempo de cura e o número de tijolos ensaiados em cada dosagem final (lote).

Tabela 8 – Ensaios laboratoriais realizados para avaliação das propriedades dos tijolos ecológicos vazados

| Propriedade | Tempo de cura | Nº de tijolos** |
|--|---------------|-----------------|
| Absorção de água | 28 dias | 3 |
| Resistência à compressão | 28 dias | 7 |
| Resistência à tração na flexão em 3 pontos | 28 dias | 7 |
| Durabilidade por ciclos de imersão e secagem | 7 dias | 3 |
| Resistência à compressão após durabilidade* | 28 dias | 3 |
| Total de tijolos ensaiados por dosagem | | 20 |

Legenda: *Ensaio realizado para os mesmos tijolos que passaram pelos ciclos de imersão e secagem; ** Nº de tijolos ensaiados por lote.

Fonte: A autora, 2024.

Para todos os ensaios, os resultados foram organizados em tabelas e gráficos a fim de facilitar a visualização e discussão. Para esse propósito, o *software* Microsoft Excel foi empregado.

A análise estatística dos dados incluiu o cálculo do desvio padrão (DP), o coeficiente de variação (CV), a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey para comparações múltiplas entre todas as médias. Essas análises foram realizadas com o auxílio do *software* R, versão 4.3.2 (R Core Team, 2023).

3.2.4.1 Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água, foi seguida a metodologia descrita na norma ABNT NBR 8492 (2012). O procedimento envolveu a utilização de 3 (três) tijolos de cada dosagem, com 28 dias de cura. Inicialmente, os tijolos foram colocados em uma estufa a aproximadamente 105°C por 24 horas. Após a remoção da estufa e resfriamento até a temperatura ambiente, os tijolos foram pesados em uma balança com resolução de 0,01 g para determinar sua massa seca (ms). Em seguida, foram submersos em água por 24 horas. Após esse período, os tijolos foram pesados novamente para determinar a massa saturada (mu). A Figura 21 ilustra as etapas do ensaio de absorção.

Figura 21 – Ensaio de absorção de água: (a) imersão em água e (b) secagem em estufa.



Fonte: A autora, 2024.

Para determinar a absorção de água, foi utilizada a Equação 3.1 descrita na normativa ABNT NBR 8492 (2012).

$$A = \frac{mu - ms}{ms} * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

A - Absorção de água (%);

mu - Massa úmida saturada (g);

ms - Massa seca (g).

Após a obtenção dos resultados individuais, foram calculadas as médias dos valores obtidos nas três repetições para cada dosagem fabricada e testada aos 28 dias de cura.

3.2.4.2 Resistência à compressão

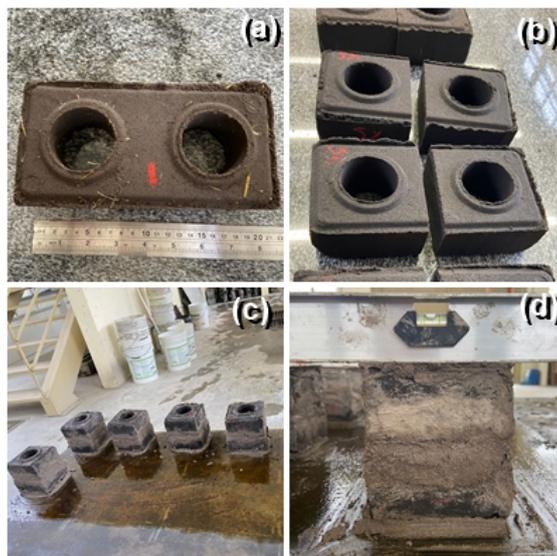
O ensaio de resistência à compressão foi conduzido conforme as orientações da norma ABNT NBR 8492 (2012). Para os tijolos vazados das dosagens preliminares, foram testados quatro tijolos com 7 dias de cura. Para as dosagens finais, foram ensaiados sete tijolos com 28 dias de cura.

O ensaio foi realizado após a análise dimensional dos tijolos. Inicialmente, os tijolos foram cortados ao meio no comprimento, e, em seguida, foi realizado o processo de capeamento, que consiste na união das faces e retificação das superfícies com uma camada de até 3 mm de argamassa (composta por cimento Portland e areia na proporção 1:1). Após a argamassa endurecer, foi verificada e anotada as dimensões das faces para posterior cálculo da resistência. Sequencialmente, os tijolos testados com 28 dias de cura receberam pintura estocástica, com aplicação de tinta branca fosca e spray preto fosco em uma das faces (Figura 23). Conforme alguns autores (JANK, 2021; MENDONÇA,

2022; MEICHTRY, 2023), a pintura estocástica permite realizar a correlação de imagens para a análise da superfície de ruptura e do modo de falha de materiais compósitos.

Seguidamente, 6 horas antes do ensaio, os tijolos foram submersos em água para serem rompidos na condição saturada, conforme orienta a ABNT NBR 8491 (2012). A Figura 22 mostra a execução das etapas de corte e capeamento nos tijolos ecológicos vazados.

Figura 22 – Execução das etapas de corte e capeamento nos tijolos vazados: (a) marcação na metade do comprimento para o corte, (b) tijolos cortados, (c) capeamento sendo executado, (d) capeamento finalizado e nivelado.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 23 – Pintura estocástica aplicada aos tijolos ecológicos vazados com 28 dias de cura.



Fonte: A autora, 2024.

Para realização do ensaio, foi utilizado uma prensa hidráulica universal (EMIC® DL 20000) de capacidade máxima de 200 kN. A movimentação da carga ocorreu com uma velocidade de rompimento constante de 0,5 mm/min e, o ensaio foi cessado quando o valor da carga máxima começou a diminuir, apresentando fissuras visíveis nos tijolos. Durante o ensaio, para os tijolos com 28 dias de cura, o processo foi monitorado por meio da gravação de vídeo, utilizando a câmera traseira de um celular com resolução de 12 MP, abertura f/1.8, estabilização óptica e gravação em 4K a 60 quadros por segundo. Para verificar a ruptura e o modo de falha dos tijolos, a gravação foi posteriormente transformada em imagens e analisada no *software* GOM Correlate®. A Figura 24 mostra a execução do ensaio de resistência à compressão.

Figura 24 – Execução do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: A autora, 2024.

Para determinar a resistência à compressão, foi utilizada a Equação 3.2 descrita na normativa da ABNT NBR 8492 (2012).

$$RC = \frac{F}{S} \quad (3.2)$$

Onde:

RC - Resistência à compressão (MPa);

F - Carga máxima de ruptura do tijolo (N);

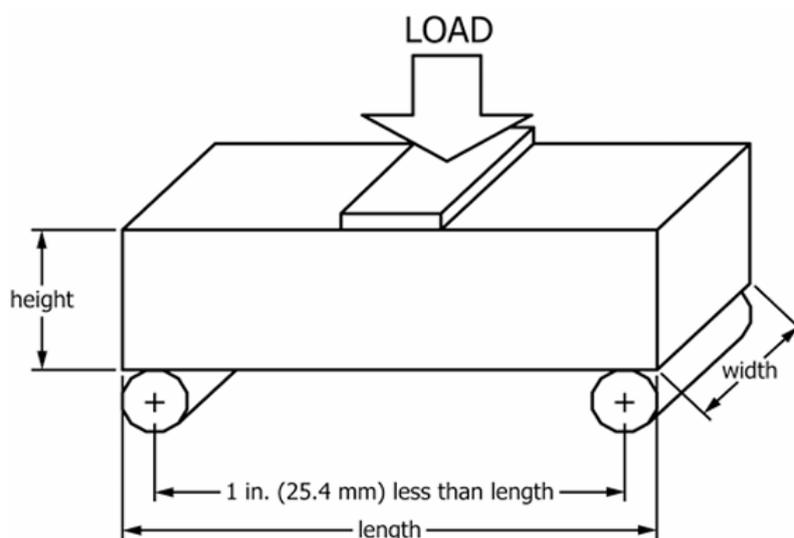
S - Área de aplicação da carga (mm²).

Após obter os resultados, foram calculadas as médias para cada composição, levando em consideração a condução do ensaio e a idade do teste correspondente.

3.2.4.3 Resistência à tração na flexão em três pontos

O ensaio de tração na flexão em 3 pontos foi conduzido para sete tijolos ecológicos vazados de cada dosagem fabricada (T80-5-15 SF, T80-10-10 SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5 SF e T79,85-15-5-0,15F) aos 28 dias de cura, de acordo com as especificações da ASTM C67 (2014). A Figura 25 ilustra o esquema de configuração do ensaio conforme especificado pela referida normativa.

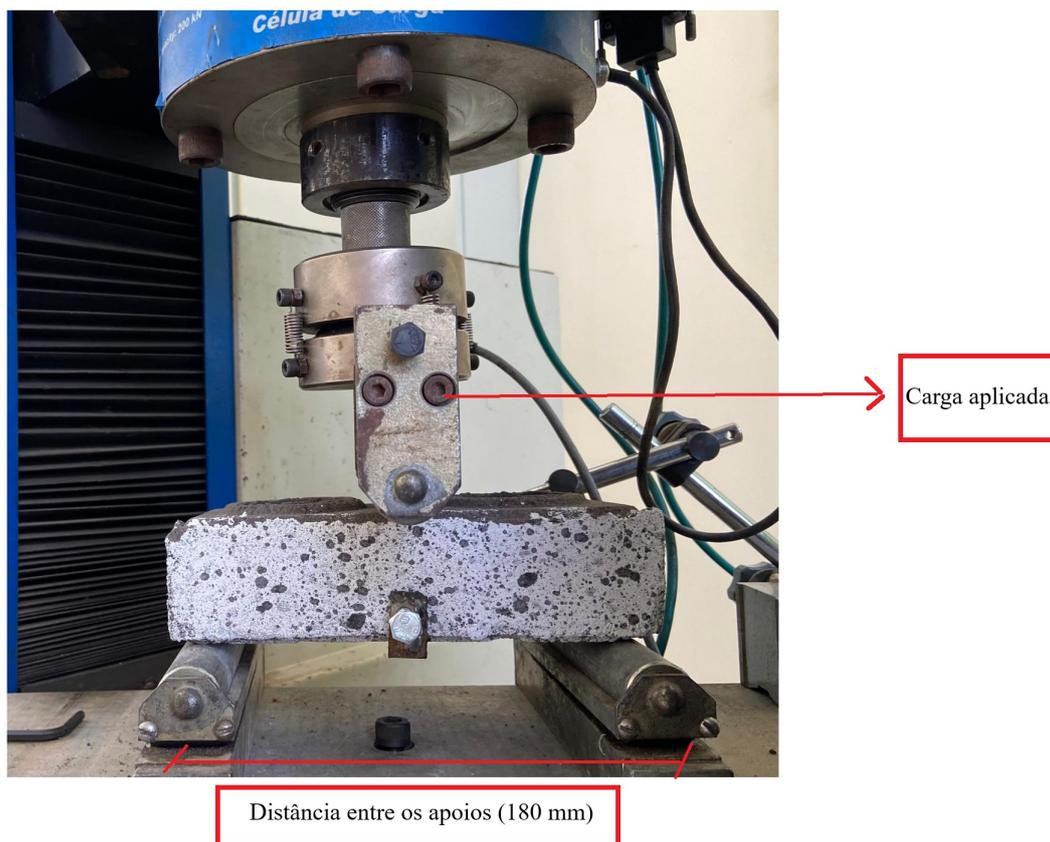
Figura 25 – Esquema de execução do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos em tijolos ecológicos.



Legenda: Height: altura; Width: largura; Length: comprimento; Load: carga aplicada; Fonte: ASTM C67, 2014.

Considerando a configuração de execução do ensaio estabelecida na Figura 25, o ensaio para os tijolos ecológicos vazados foi realizado com adaptações permitidas pela normativa, devido ao tamanho e formato dos tijolos. A norma especifica que a distância entre os apoios deve ser cerca de 1 polegada (25,4 mm) menor do que o comprimento dos tijolos. Neste estudo, com tijolos de 200 mm de comprimento, foi adotada uma distância entre os apoios de 180 mm, correspondendo a uma redução de aproximadamente 1 polegada do comprimento (20 mm), para posicionar os apoios. A carga pontual foi posicionada na metade do comprimento entre os furos dos tijolos ecológicos vazados. A configuração do ensaio está representada na Figura 26.

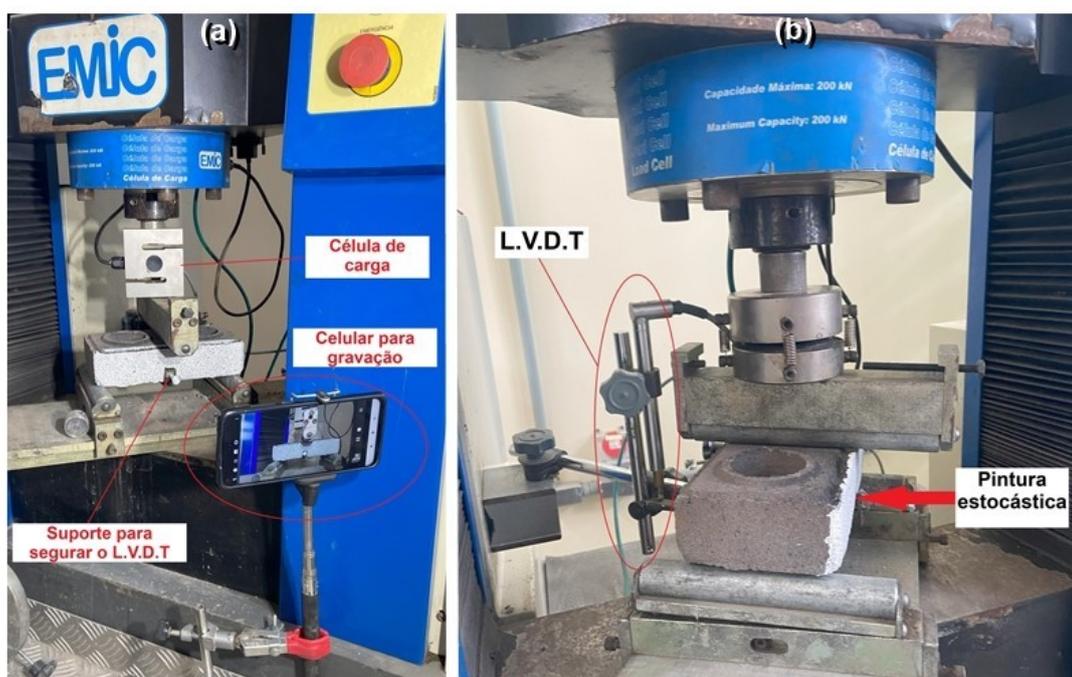
Figura 26 – Configuração do ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos.



Fonte: A autora, 2024.

Os tijolos ensaiados também receberam pintura estocástica com tinta branca fosca e spray preto fosco, permitindo a análise do modo de ruptura por meio da correlação de imagens no *software* GOM Correlate®. O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica universal de ensaios EMIC® DL 20000, operando a 0,15 mm/min. Durante o ensaio, foi utilizado um sensor LVDT para monitorar e registrar o deslocamento obtido, possibilitando a análise da tensão de tração na flexão (MPa) em função do deslocamento (mm). Para análise do modo de ruptura por meio da correlação de imagem, o ensaio foi monitorado por meio de gravação de vídeo, utilizando a câmera traseira de um celular com resolução de 12 MP, abertura f/1.8, estabilização óptica e gravação em 4K a 60 quadros por segundo. A execução do ensaio está demonstrada na Figura 27.

Figura 27 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos: (a) visualização frontal do ensaio e (b) visualização lateral e traseira do ensaio.



Fonte: A autora, 2024.

Após o ensaio, a superfície de fratura dos tijolos, com e sem a incorporação de fibras, foi analisada em um microscópio estereoscópico trinocular com ampliação de 160x. Essa análise foi realizada com o objetivo de visualizar a superfície dos tijolos e compreender como as fibras atuaram durante o rompimento do material.

Para determinação dos valores de resistência à tração na flexão de três pontos foi utilizada a Equação 3.3, especificada pela norma ASTM C67 (2014).

$$RF = \frac{3FL}{2ab^2} \quad (3.3)$$

Onde:

RF - Resistência à tração na flexão em três pontos (MPa);

F - Carga atingida no momento da ruptura (N);

L - Distância entre os apoios (mm);

a - Largura do tijolo (mm);

b - Altura do tijolo (mm).

Após a obtenção dos resultados, foram calculadas as médias de cada dosagem. Em seguida, foram realizadas análises estatísticas e elaborados gráficos relacionando a tensão de tração na flexão com o deslocamento. Os gráficos permitem analisar detalhadamente o comportamento do material sob carga, mostrando como cada dosagem responde à

tração e indicando as propriedades mecânicas específicas, como a resistência máxima e a deformação dos tijolos (DONKOR; OBONYO, 2015).

3.2.4.4 Durabilidade por ciclos de imersão e secagem

Para a execução do ensaio de durabilidade, foram retirados aleatoriamente três tijolos de cada lote. O ensaio teve início aos 7 dias de cura e seguiu as recomendações da ABNT NBR 13554 (2012). O método, originalmente desenvolvido para aplicação em estradas rodoviárias, implica uma condição extrema de desgaste por abrasão, que provavelmente não seria enfrentada por tijolos na construção civil (GRANDE, 2003). Apesar disso, o ensaio foi executado conforme prescrito pela normativa, com seis ciclos de 5 horas de molhagem seguidas por 42 horas de secagem em uma estufa a uma temperatura de $71 \pm 2^\circ\text{C}$, incluindo a etapa de escovação entre os ciclos.

Após o ensaio, foi calculada a perda de massa (P), expressa em porcentagem (%), determinada pela Equação 3.4. Nesta equação, M_{si} representa a massa seca inicial das amostras em gramas (g), calculada após a moldagem, e M_{sf} indica a massa seca final em gramas (g), obtida após as amostras passarem pelos ciclos de molhagem e secagem.

$$P = \frac{M_{si} - M_{sf}}{M_{si}} * 100 \quad (3.4)$$

Após a obtenção dos resultados, foram calculadas as médias das triplicatas para cada composição. Em seguida, os mesmos tijolos que passaram pelos ciclos de imersão e secagem foram submetidos ao ensaio de compressão.

3.2.4.5 Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade

Os mesmos três tijolos de cada lote que passaram pelos ciclos de molhagem-secagem foram submetidos a testes de compressão 28 dias após a moldagem.

O ensaio de compressão foi conduzido de acordo com a metodologia descrita anteriormente na subseção 3.2.4.2. Foram seguidas as etapas de corte ao meio do comprimento dos tijolos, capeamento e rompimento em prensa hidráulica com capacidade de 200 kN na condição saturada, após a imersão em água por 6h. Nesta etapa, a pintura estocástica não foi aplicada nos tijolos, devido ao ensaio ser conduzido de forma experimental e complementar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na caracterização dos materiais, nos testes preliminares para definição das dosagens aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados e nos ensaios laboratoriais para controle das propriedades físico-mecânicas e de durabilidade dos tijolos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Caracterização do solo eólico, cimento Portland e sílica da casca de arroz (SCA)

Os resultados da caracterização geotécnica, massa específica dos grãos e classificação SUCS do solo eólico estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Caracterização geotécnica, massa específica dos grãos e classificação do solo eólico de Alegrete-RS.

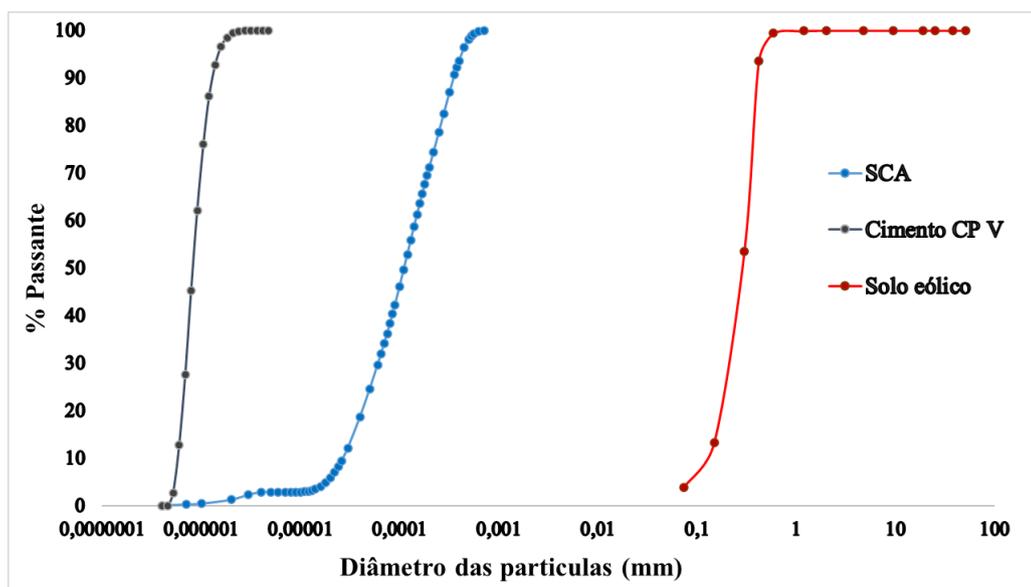
| Propriedades | Resultados |
|---|------------|
| Coefficiente de uniformidade (Cu) | 2,67 |
| Coefficiente de curvatura (Cc) | 1,04 |
| Areia (%) | 96,0 |
| Fração fina do solo (%) | 4,0 |
| Massa específica dos grãos (g/cm ³) | 2,68 |
| Limite de liquidez (%) | - |
| Limite de plasticidade (%) | - |
| Classificação SUCS | SP |

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados dos testes de caracterização geotécnica indicaram que o solo eólico (Tabela 9) contém predominantemente 96% de areia e apenas 4% de finos. Devido à baixa proporção de finos (partículas que passam a peneira de abertura 0,075 mm), o solo eólico não apresenta características plásticas, como evidenciado pela ausência de limites de liquidez e plasticidade. A média obtida para a massa específica dos grãos do solo foi de 2,68 g/cm³, o que se aproxima dos valores encontrados na literatura, que variam entre 2,54 g/cm³ e 2,74 g/cm³, em estudos sobre as propriedades geotécnicas de solos eólicos (SHALABI et al., 2024; SHOOSH PASHA; SHIRVANI, 2015; TIWARI; SHARMA; YADAV, 2016; ABU SEIF; SONBUL, 2019; GHRIEB; MITICHE-KETTAB; BALI, 2012). De acordo com a classificação SUCS (ASTM D-2487, 2017), o solo é classificado como areia mal graduada (SP).

Na Figura 28, são apresentadas as distribuições granulométrica dos materiais: solo eólico, cimento Portland (CP V ARI) e sílica da casca de arroz (SCA).

Figura 28 – Distribuição granulométrica dos materiais: Solo eólico, cimento e sílica da casca de arroz (SCA).



Fonte: A autora, 2024.

Conforme pode ser observado na Figura 28, o solo eólico apresenta partículas bastante uniformes, com coeficiente de uniformidade (C_u) inferior a 5. A maior parte da sua composição granulométrica está concentrada entre 2,0 mm e 0,075 mm, sendo constituída por 96% de areia e apenas 4% de finos (partículas menores que 0,075 mm). O solo eólico apresentou aproximadamente 61% da granulometria na faixa entre 0,2 mm e 0,6 mm, caracterizando-o como areia média. A sílica da casca de arroz (SCA) apresentou a maior parte das partículas na faixa de $0,1 \times 10^{-2}$ a $0,1 \times 10^{-4}$ mm, somente cerca de aproximadamente 5% da sua granulometria apresenta partículas ainda mais finas entre $0,1 \times 10^{-4}$ a $0,1 \times 10^{-5}$ mm. Já o cimento Portland (CP V) obteve sua granulometria compreendida na faixa de $0,1 \times 10^{-5}$ a $0,1 \times 10^{-6}$ mm.

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos na análise FRX do solo eólico.

Tabela 10 – Composição química do solo eólico por Fluorescência de Raios X (FRX)

| Elemento | Concentração (%) |
|---|-------------------------|
| Dióxido de Silício (SiO ₂) | 86,64 |
| Óxido de Magnésio (MgO) | 3,63 |
| Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃) | 8,53 |
| Pentóxido de Fósforo (P ₂ O ₅) | - |
| Óxido de Potássio (K ₂ O) | - |
| Óxido de Cálcio (CaO) | 0,04 |
| Enxofre (S) | 0,06 |
| Cloro (Cl) | 0,10 |
| Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃) | 0,57 |
| Ródio (Rh) | 0,29 |

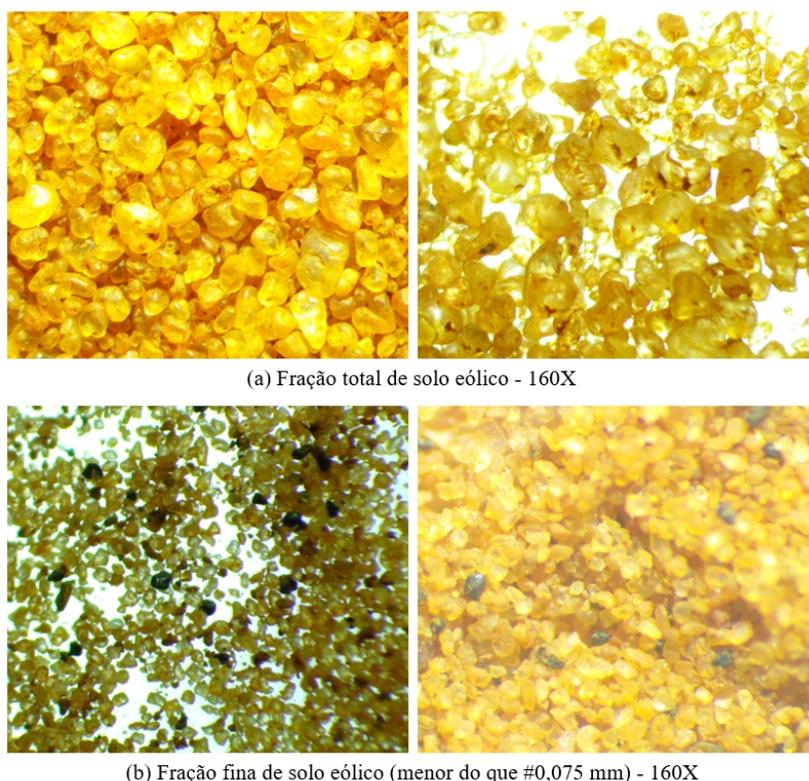
Fonte: A autora, 2024.

Na análise da composição química do solo eólico, apresentada na Tabela 10, observa-se a predominância de dióxido de silício (SiO₂ – 86,64%), o que indica uma elevada presença de quartzo, acompanhado de um menor percentual de óxido de alumínio (Al₂O₃ – 8,53%), caracterizando o solo como arenoso. Valores similares foram encontrados na literatura (SOUZA et al., 2022; VILELA et al., 2020), reforçando que essas concentrações confirmam a predominância de quartzo em solos arenosos.

Além disso, na análise da composição química (Tabela 10), verificou-se a ausência de Pentóxido de Fósforo (P₂O₅) e Óxido de Potássio (K₂O) sugerindo baixos níveis de nutrientes, sem impacto direto nas propriedades geotécnicas, mas indicando baixa fertilidade do solo eólico. A baixa concentração de Óxido de Cálcio (CaO) à 0,04%, do Enxofre (S) a 0,06% e do Cloro (Cl) a 0,10% não impactam a composição do solo. A presença de Óxido de Ferro (Fe₂O₃) a 0,57% sugere a presença de minerais ferrosos, que podem afetar a cor do solo. Por fim, o Ródio (Rh) a 0,29% não tem impacto nas propriedades geotécnicas.

Para confirmar a presença significativa de quartzo no solo eólico, foi realizada uma análise complementar da mineralogia visual em duas amostras: uma da fração total do solo (Figura 29 a) e outra da fração fina (Figura 29 b). A análise foi conduzida no laboratório da engenharia agrícola da UNIPAMPA utilizando microscopia estereoscópica com ampliação de 160X.

Figura 29 – Análise mineralógica visual das amostras de solo eólico: (a) Fração Total e (b) Fração Fina

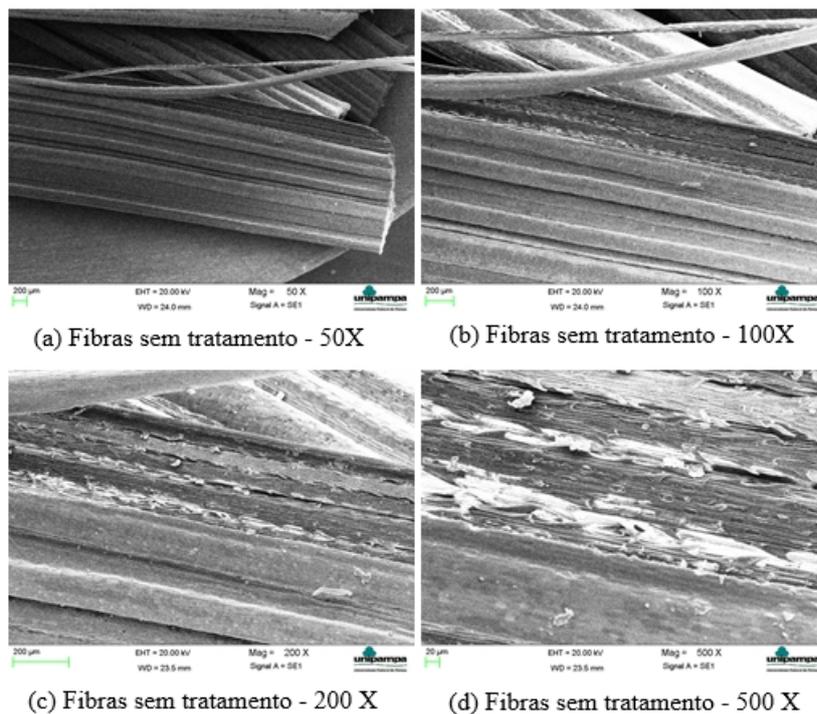


Conforme mostrado na Figura 29 (a), o solo eólico é predominantemente composto por quartzo, com grãos de formato arredondado, resultado da erosão eólica, corroborando com resultados da literatura em solos eólicos de arenização (SHALABI et al., 2024). Na fração fina do solo (Figura 29 b), o quartzo continua sendo o mineral predominante, embora sejam observados minerais escuros em menor proporção. Durante a análise, ao aplicar o ácido clorídrico (HCl), não foi observada a efervescência que indicaria a presença de carbonatos, confirmando a ausência desses compostos no solo.

4.1.2 Caracterização das fibras vegetais de capimannoni

Os resultados das análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliações de 50X, 100X, 200X e 500X, e por microscopia estereoscópica trinocular, com ampliação de 160X, estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 30 e 31 para as fibras vegetais de capimannoni sem tratamento, nas Figuras 32 e 33 para as fibras tratadas com sílica da casca de arroz, e nas Figuras 34 e 35 para as fibras tratadas com soda cáustica.

Figura 30 – MEV das fibras vegetais de capimannoni sem tratamento.



Fonte: A autora, 2024.

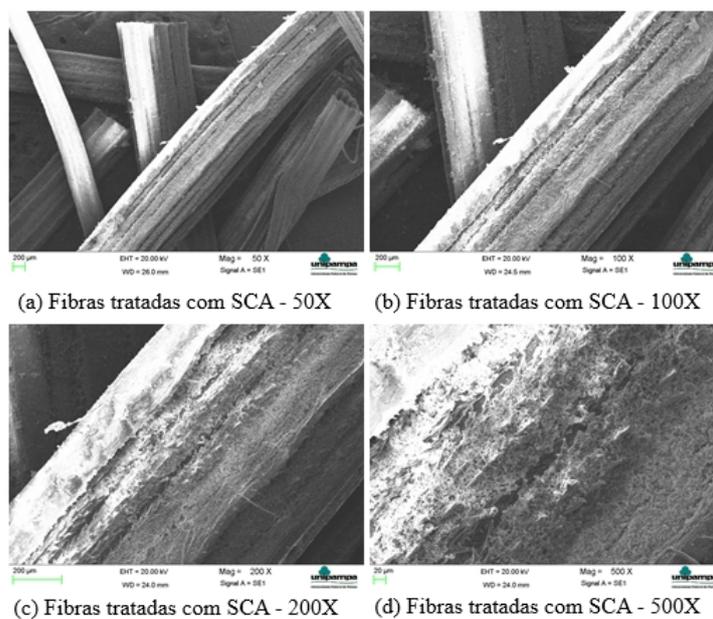
Figura 31 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni sem tratamento.



Legenda: Demarcação da presença de ranhuras nas fibras.

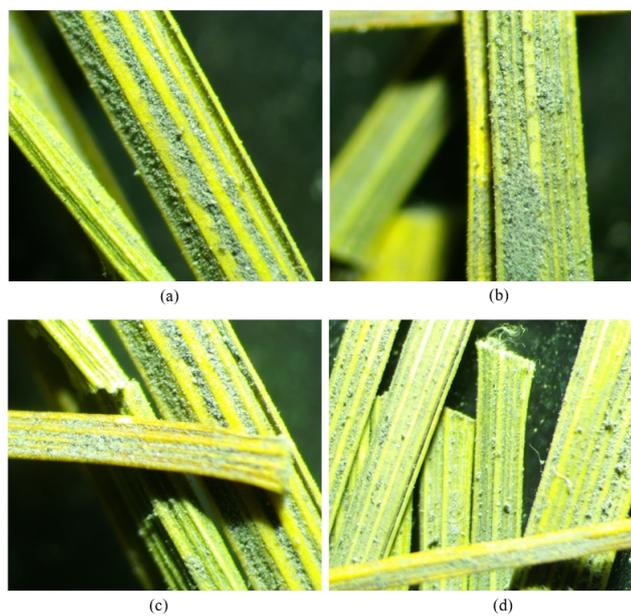
Fonte: A autora, 2024.

Figura 32 – MEV das fibras vegetais de capimannoni tratadas com SCA.



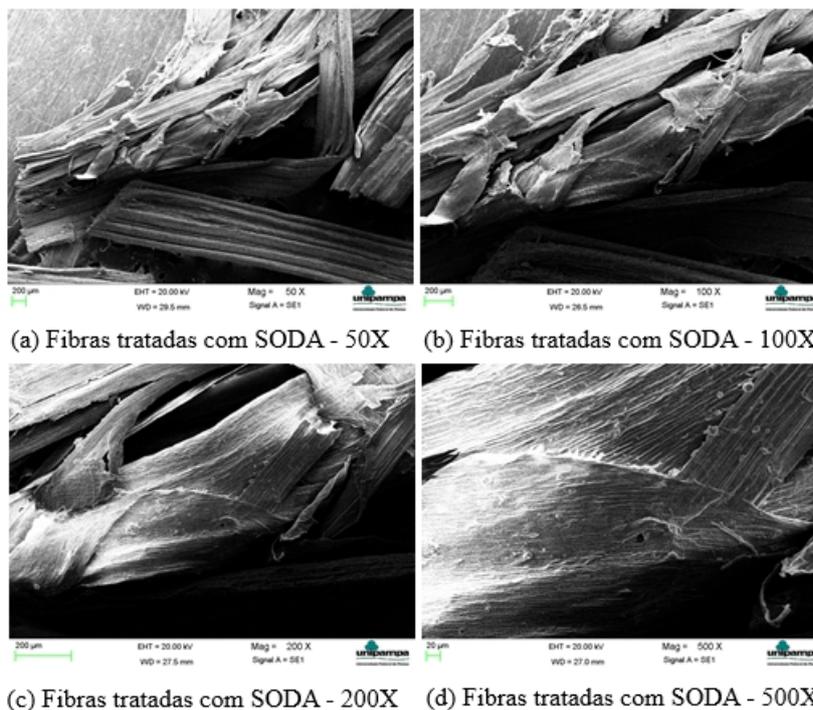
Fonte: A autora, 2024.

Figura 33 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni tratadas com SCA.



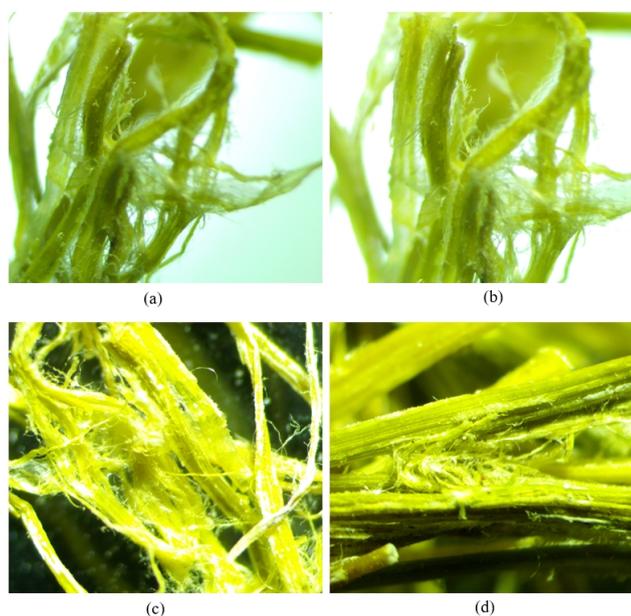
Fonte: A autora, 2024.

Figura 34 – MEV das fibras vegetais de capimannoni tratadas com soda cáustica.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 35 – Microscopia estereoscópica com ampliação de 160X das fibras vegetais de capimannoni tratadas com soda cáustica.



Fonte: A autora, 2024.

A partir da análise das Figuras 30 e 31, é possível observar que as superfícies

das fibras de capimannoni sem tratamento apresentam uma estrutura relativamente uniforme, com pouca variação na textura. Além disso, há a presença de ranhuras causadas pela etapa de desfibramento com escova de aço. Embora a escovação tenha provocado essas ranhuras nas fibras, a estrutura geral das mesmas não foi modificada.

Conforme observado nas Figuras 32 e 33, o tratamento superficial com sílica da casca de arroz aplicado às fibras de capimannoni não alterou significativamente sua estrutura geral, que permanece uniforme. Além disso, é possível identificar a impregnação de sílica entre as ranhuras e na estrutura das fibras. Dessa forma, embora o tratamento possa ser benéfico para a impermeabilização das fibras, ele não é eficiente na modificação da estrutura para melhorar a ancoragem e a aderência das fibras à matriz (solo-cimento-SCA).

As fibras tratadas com soda cáustica exibem uma superfície rugosa e áspera, com sua estrutura significativamente modificada e desuniforme após o tratamento, conforme mostrado nas Figuras 34 e 35. Essa modificação estrutural sugere que o tratamento com soda cáustica (em concentração de 6%) pode favorecer a ancoragem e aderência das fibras à matriz. Poletanovic et al. (2021) também verificou em seu estudo que o tratamento com soda cáustica (NaOH) separou os feixes das fibras e aumentou a rugosidade.

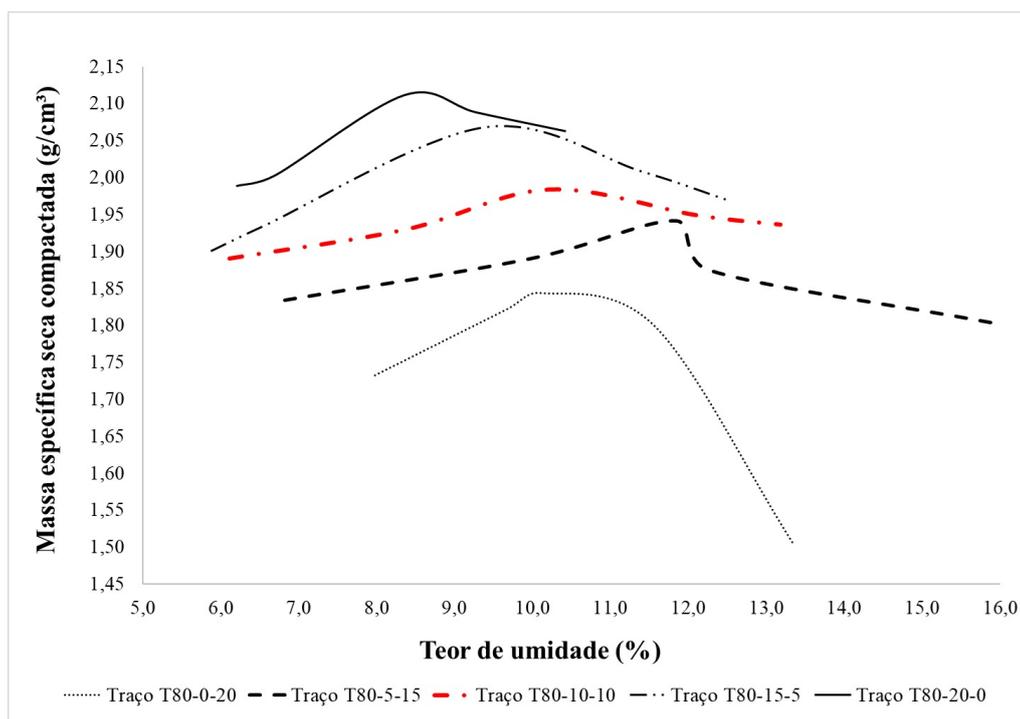
Os resultados das análises microscópicas permitiram avaliar os diferentes tratamentos superficiais aplicados às fibras vegetais de capimannoni, a fim de identificar aquele que provocou a maior modificação estrutural para uso na fabricação de tijolos ecológicos vazados. Dentre os tratamentos testados, o uso de soda cáustica (NaOH) diluída em concentração de 6% foi o mais adequado, pois resultou na maior alteração na estrutura das fibras, favorecendo a aderência e ancoragem à matriz (solo eólico, cimento e SCA).

4.2 TESTES PRELIMINARES

4.2.1 Testes em CP's cilíndricos para definição das dosagens de solo eólico-cimento-SCA-água

A Figura 36 apresenta as curvas de compactação das diferentes dosagens de solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz (T80-0-20, T80-5-15, T80-10-10, T80-15-5 e T80-20-0), compactadas sob energia Proctor normal.

Figura 36 – Curvas de compactação proctor normal das dosagens de solo eólico-cimento-SCA.

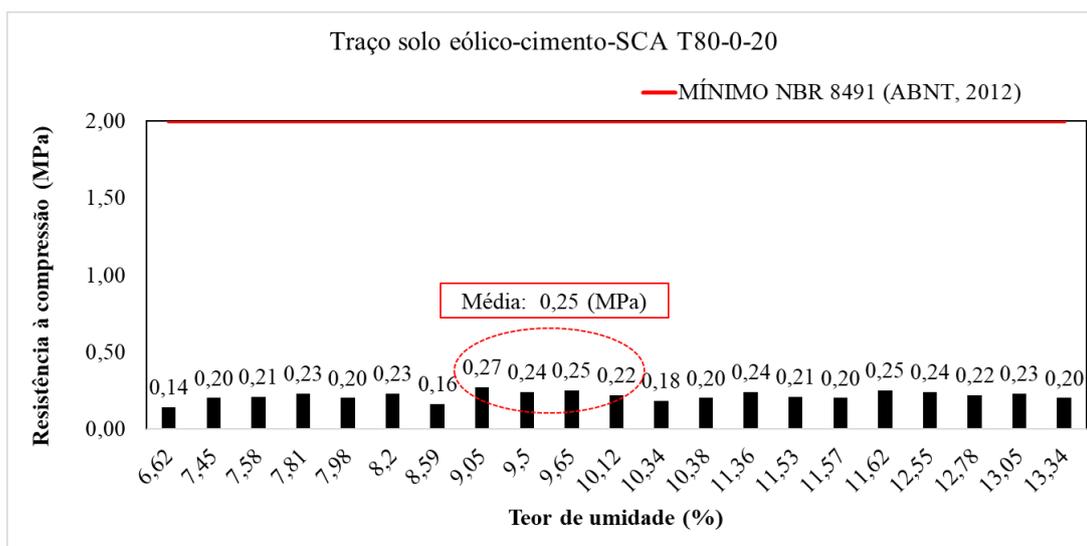


Fonte: A autora, 2024.

Analisando as curvas de compactação na Figura 36, observa-se o efeito do teor de cimento nas misturas em relação ao aumento da massa específica seca compactada. O traço T80-0-20, sem cimento, apresentou a menor massa específica seca máxima, em torno de $1,80 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótimo de $11,0\%$. O traço T80-5-15, com 5% de cimento, atingiu aproximadamente $1,90 \text{ g/cm}^3$ e um teor de umidade ótimo de 12% . O traço T80-10-10, compactado sob energia Proctor normal, resultou em uma massa específica seca de cerca de $1,95 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótimo de $10,2\%$. Já o traço T80-15-5, com 15% de cimento, apresentou uma massa específica seca máxima de aproximadamente $2,05 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótimo de $9,5\%$. Por fim, o traço T80-20-0, composto apenas de solo e cimento, alcançou a maior massa específica seca, superior a $2,10 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótimo de $8,5\%$.

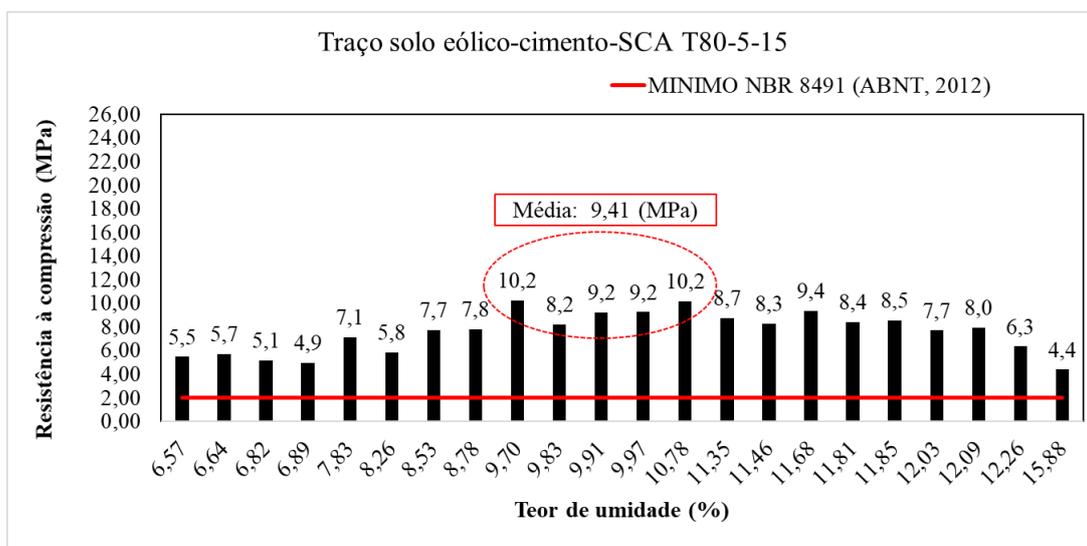
As Figuras 37, 38, 39, 40 e 41, apresentam os gráficos de resistência à compressão em função do teor de umidade para todas as dosagens de solo eólico-cimento-SCA (T80-0-20, T80-5-15, T80-10-10, T80-15-5 e T80-20-0).

Figura 37 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-0-20.



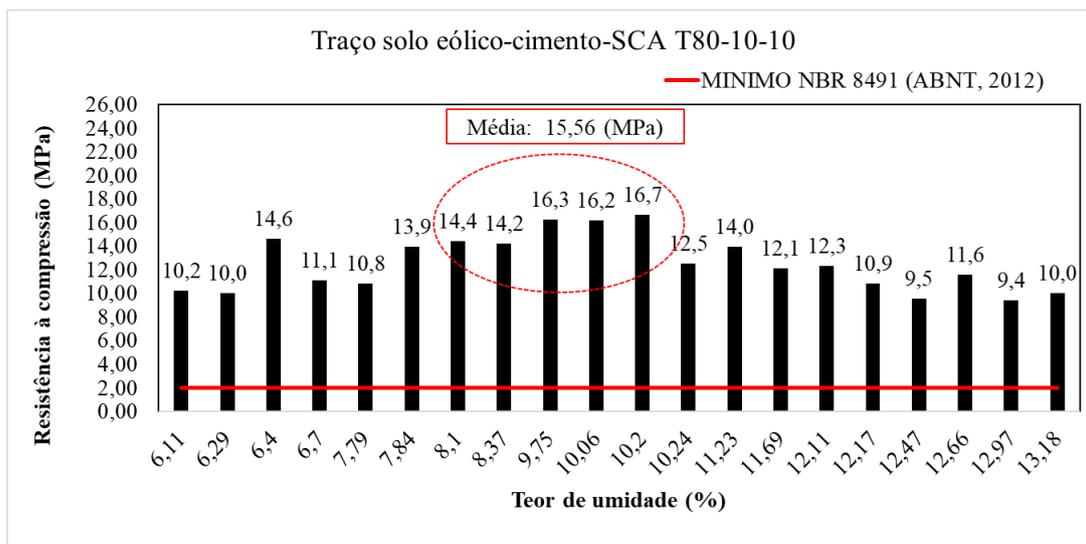
Fonte: A autora, 2024.

Figura 38 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-5-15.



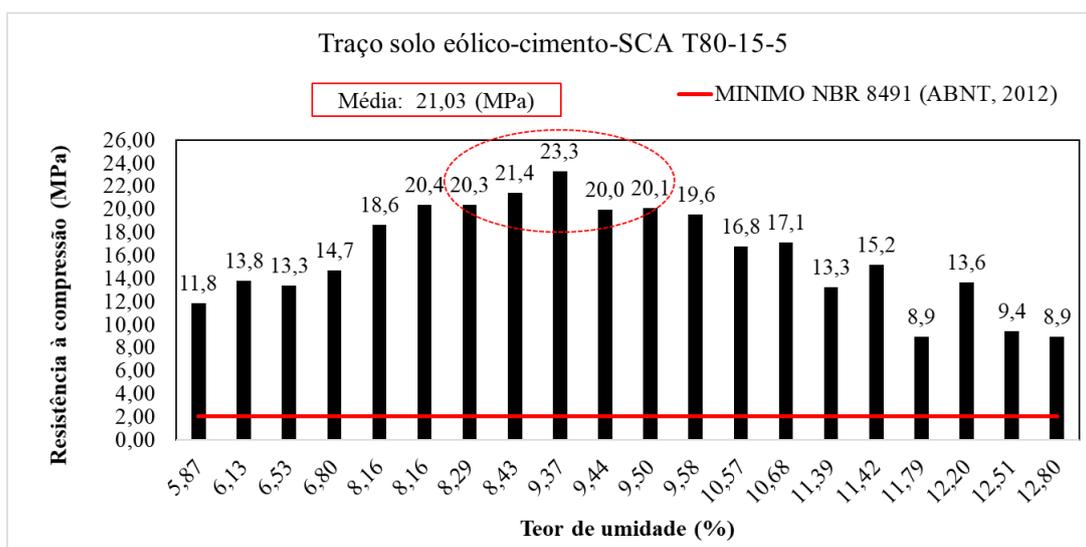
Fonte: A autora, 2024.

Figura 39 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-10-10.



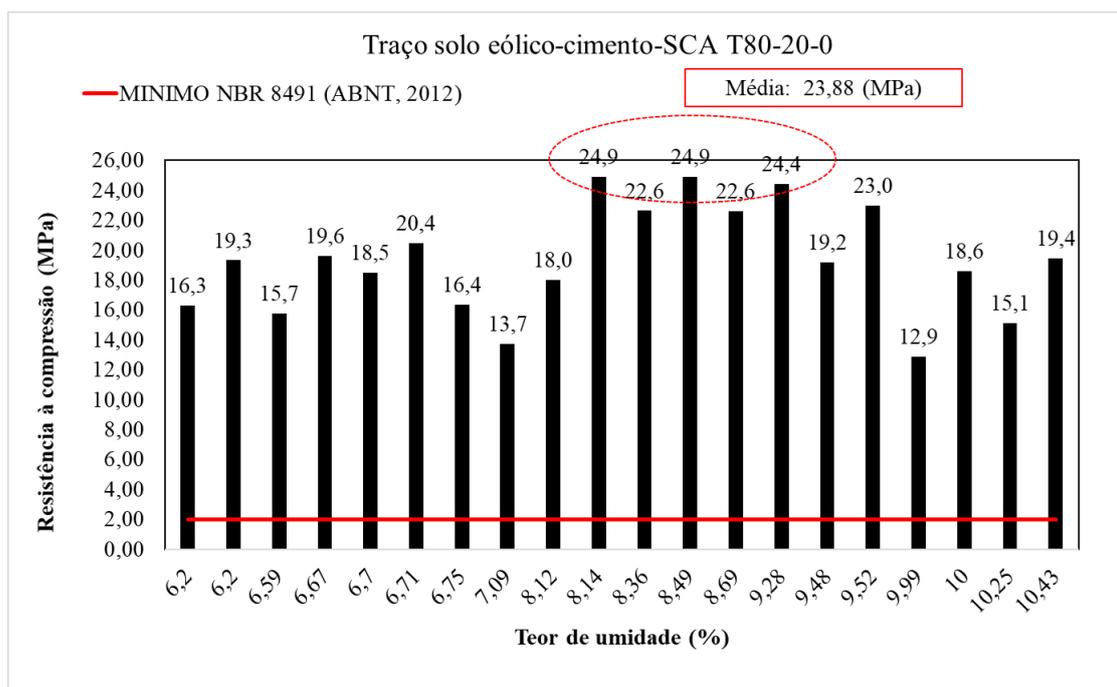
Fonte: A autora, 2024.

Figura 40 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-15-5.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 41 – Análise da resistência à compressão em função do teor de umidade da mistura de solo eólico-cimento-SCA referente ao traço T80-20-0.



Fonte: A autora, 2024.

Com base nos resultados obtidos, a dosagem T80-0-20 apresentou valores de resistência à compressão inferiores a 2,0 MPa, abaixo do mínimo exigido pela norma ABNT NBR 8491 (2012). Em contraste, as demais dosagens T80-5-15, T80-10-10, T80-15-5 e T80-20-0 mostraram valores de resistência à compressão que superaram os requisitos normativos, com todas as amostras atingindo valores acima de 2,0 MPa.

Para todas as dosagens estudadas, foi realizada uma análise da resistência à compressão média correspondente à faixa de umidade com melhor desempenho no ensaio. Observou-se que os valores médios de resistência aumentaram à medida que a quantidade de cimento na mistura se elevava. A dosagem T80-0-20 (Figura 37) apresentou um valor médio de 0,24 MPa, correspondente à faixa de umidade entre 9,05% e 10,12%, localizada no ramo seco da curva de compactação. Na dosagem T80-5-15 (Figura 38), a resistência média foi de 9,41 MPa, correspondente à faixa de umidade entre 9,7% e 10,78%, também no ramo seco da curva de compactação. Para a dosagem T80-10-10 (Figura 39), a resistência média foi de 15,56 MPa na faixa de umidade entre 8,1% e 10,2%, situada entre o ramo seco e o teor de umidade ótimo. A dosagem T80-15-5 (Figura 40) apresentou uma resistência média de 21,03 MPa na faixa de umidade entre 8,29% e 9,5%, também localizada entre o ramo seco e o teor de umidade ótimo da curva de compactação. Por fim, a dosagem T80-20-0 (Figura 41) registrou uma resistência média de 23,88 MPa na faixa de umidade entre 8,14% e 9,28%, próxima ao teor de umidade ótimo na

curva de compactação. Com isso, conclui-se que a análise foi essencial para demonstrar que utilizar o teor de umidade ótimo como parâmetro pode ser inadequado quando se busca o melhor desempenho de resistência à compressão nas dosagens testadas, já que praticamente todas (exceto a dosagem T80-20-0) apresentaram o melhor desempenho de compressão no ramo seco da curva de compactação.

A Tabela 11 apresenta os valores médios do teor de água e da massa específica aparente seca correspondente ao melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão após 28 dias para cada dosagem testada em corpos de prova cilíndricos (T80-0-20, T80-5-15, T80-10-10, T80-15-5 e T80-20-0).

Tabela 11 – Teor de água e massa específica aparente seca correspondente ao melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão em CP's cilíndricos

| Dosagens | Teor de água (%) | ρ seca (g/cm ³) |
|-----------|------------------|----------------------------------|
| T80-0-20 | 9,6 | 1,80 |
| T80-5-15 | 10,0 | 1,90 |
| T80-10-10 | 9,3 | 1,96 |
| T80-15-5 | 9,0 | 2,04 |
| T80-20-0 | 8,6 | 2,10 |

Legenda: ρ seca: massa específica aparente seca; Composição das dosagens: Traço solo-cimento-SCA.

Fonte: A autora, 2024.

Considerando os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, todas as dosagens testadas podem ser utilizadas em edificações geotécnicas, dependendo do objetivo de resistência do projeto. Entretanto, focando na aplicação em tijolos ecológicos vazados, algumas dosagens foram descartadas. A dosagem T80-0-20 foi excluída devido aos valores abaixo do mínimo de 2,0 MPa na resistência à compressão. A dosagem T80-20-0 também foi descartada por seu elevado teor de cimento e pela ausência de sílica de casca de arroz (SCA) em sua composição, o que contraria o objetivo de promover o reaproveitamento sustentável desse subproduto da indústria do arroz. As dosagens T80-5-15, T80-10-10 e T80-15-5, foram selecionadas para aplicação na fabricação de tijolos ecológicos vazados, juntamente com os respectivos teores de água e massas específicas aparentes secas associadas, conforme valores descritos na Tabela 11.

4.2.2 Testes para avaliar o efeito da incorporação de fibras vegetais em tijolos ecológicos maciços

A Tabela 12 apresenta os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação (CV) da resistência à compressão dos tijolos ecológicos maciços com fibras vegetais após 14 dias de cura. Com base na mistura de Campagnolo (2022), composta por 80% de

solo eólico, 10% de cimento e 10% de SCA, foram testados diferentes teores de fibra (0,25% e 0,50%, em substituição ao solo), tamanhos de fibra (1,5 cm, 2,5 cm e 3,0 cm) e tratamentos superficiais (sílica de casca de arroz, soda cáustica e sem tratamento). A tabela também inclui os resultados da mistura base original sem fibras para fins de comparação.

Tabela 12 – Valores médios de resistência à compressão em tijolos maciços com fibras vegetais de capimannoni sob diferentes tamanhos, tratamentos e teores.

| TRAÇO | Resistência à Compressão MÉDIA (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
|-------------------|---|-----------------|---------------|
| T025-SCA-1,5 | 2,65 | 0,35 | 13,2 |
| T050-SCA-1,5 | 2,95 | 0,60 | 20,2 |
| T025-SCA-2,5 | 2,86 | 0,42 | 14,8 |
| T050-SCA-2,5 | 2,84 | 0,85 | 29,9 |
| T025-SCA-3,0 | 2,47 | 0,27 | 10,7 |
| T050-SCA-3,0 | 2,69 | 0,32 | 11,8 |
| T025-SODA-2,5 | 3,28 | 0,74 | 22,4 |
| T050-SODA-2,5 | 3,03 | 1,10 | 36,3 |
| T025-TEST-2,5 | 2,18 | 0,32 | 14,8 |
| T050-TEST-2,5 | 2,15 | 0,18 | 8,51 |
| CAMPAGNOLO (2022) | 9,74 | | |

Composição do traço: Teor de fibra (T025 ou T050) - tratamento da fibra (SCA, SODA ou TEST) - tamanho da fibra (1,5 cm, 2,5 cm ou 3,0 cm); SCA: Sílica da casca de arroz; SODA: soda cáustica; TEST: Testemunha (fibras sem tratamento); DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: A autora, 2024.

Na Tabela 12, observa-se que os tijolos ecológicos maciços sem fibra de Campagnolo (2022) apresentaram um valor médio de resistência à compressão significativamente superior em comparação aos tijolos maciços fabricados com fibras de capimannoni. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que a presença das fibras tende a criar pontos de fraqueza ou descontinuidade na matriz dos tijolos, reduzindo assim a capacidade de suportar cargas compressivas. No entanto, as fibras vegetais são uma alternativa de baixo custo que podem contribuir significativamente para a melhoria de outras propriedades dos materiais como a resistência à tração e da ductilidade.

Entre as dosagens que utilizaram fibras, observa-se na Tabela 12 que os tijolos maciços com fibras de capimannoni tratadas com soda cáustica, para ambos os teores (0,25% e 0,50%), apresentaram as maiores médias de resistência à compressão, superiores a 3,0 MPa. Em contraste, os tijolos sem tratamento (testemunha) exibiram as menores médias, para ambos os teores de fibras, com valores próximos ao mínimo de 2,0 MPa exigido pela normativa da ABNT (ABNT NBR 8491, 2012). Por outro lado, os tijolos

com fibras tratadas com sílica da casca de arroz (SCA) exibiram médias de resistência à compressão acima do mínimo de 2,0 MPa, variando entre 2,47 MPa e 2,95 MPa.

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados das análises estatísticas, incluindo ANOVA e o teste de Tukey, ambos realizados com um nível de significância de 95%, com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os diferentes tamanhos das fibras vegetais de capimannoni utilizadas na fabricação dos tijolos ecológicos. Complementarmente, a Figura 42 detalha a influência do tamanho das fibras na resistência à compressão.

Tabela 13 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão nos tijolos maciços com fibras tratadas com SCA.

| FV | GL | SQ | MQ | Valor F | Valor p | Significativo |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|----------------------|
| Tratamentos | 5 | 0,918 | 0,1837 | 0,71 | 0,62 | Não (Valor p > 0,05) |
| Erro | 30 | 7,756 | 0,258 | | | |

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos quadrados;

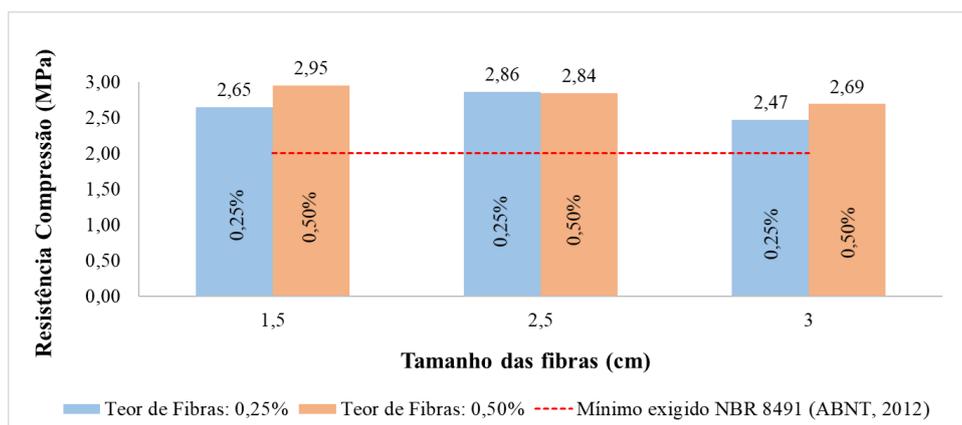
Fonte: A autora, 2024.

Tabela 14 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes tamanhos de fibras de capimannoni tratadas com SCA.

| Comparação | Valor P | Significativo |
|-------------------------------|----------------|----------------------|
| T025-SCA-2,5 vs. T025-SCA-1,5 | 0,9778 | Não (Valor p > 0,05) |
| T025-SCA-3,0 vs. T025-SCA-1,5 | 0,9888 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-1,5 vs. T025-SCA-1,5 | 0,9108 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-2,5 vs. T025-SCA-1,5 | 0,9845 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-3,0 vs. T025-SCA-1,5 | 0,99999 | Não (Valor p > 0,05) |
| T025-SCA-3,0 vs. T025-SCA-2,5 | 0,7609 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-1,5 vs. T025-SCA-2,5 | 0,9997 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-2,5 vs. T025-SCA-2,5 | 0,99999 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-3,0 vs. T025-SCA-2,5 | 0,9909 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-1,5 vs. T025-SCA-3,0 | 0,5865 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-2,5 vs. T025-SCA-3,0 | 0,7917 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-3,0 vs. T025-SCA-3,0 | 0,9738 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-2,5 vs. T050-SCA-1,5 | 0,9993 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-3,0 vs. T050-SCA-1,5 | 0,9484 | Não (Valor p > 0,05) |
| T050-SCA-3,0 vs. T050-SCA-2,5 | 0,9943 | Não (Valor p > 0,05) |

Fonte: A autora, 2024.

Figura 42 – Influência do tamanho das fibras de capimannoni tratadas com SCA na resistência à compressão dos tijolos maciços.



Fonte: A autora, 2024.

A análise ANOVA (Tabela 13), seguida pelo teste de Tukey (Tabela 14), revelou que nenhuma das comparações apresentou diferenças estatisticamente significativas ao nível de 0,05. Isso indica que os diferentes tamanhos de fibras de capimannoni testados não influenciaram a resistência à compressão das misturas testadas.

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados das análises estatísticas, incluindo ANOVA e teste de Tukey, ambos realizados com um nível de significância de 95%, visando avaliar e comparar o efeito dos tratamentos superficiais aplicados nas fibras de capimannoni sobre a resistência à compressão dos tijolos maciços. Adicionalmente, a Figura 43 detalha os resultados obtidos para cada tratamento superficial testado, em ambos os teores de fibras (0,25% e 0,50%) permitindo uma análise complementar da influência desses tratamentos nas fibras.

Tabela 15 – Efeito dos tratamentos superficiais das fibras de capimannoni na resistência à compressão de tijolos maciços: análise de variância (ANOVA).

| FV | GL | SQ | MQ | Valor F | Valor p | Significativo |
|-------------|----|-------|--------|---------|---------|----------------------|
| Tratamentos | 2 | 3,713 | 1,8565 | 6,755 | 0,00809 | Sim (Valor p < 0,05) |
| Erro | 15 | 4,122 | 0,2748 | | | |

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos quadrados;

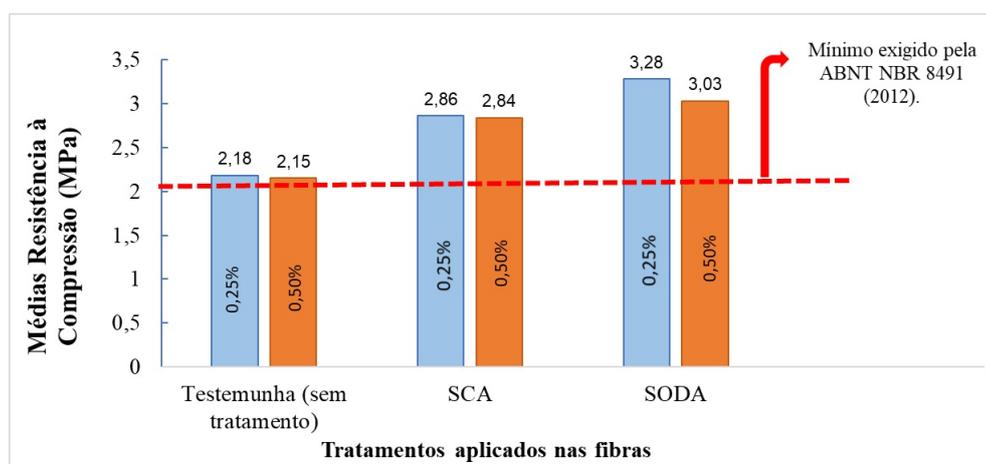
Fonte: A autora, 2024.

Tabela 16 – Resultados do teste de Tukey para comparação do efeito dos tratamentos das fibras de capimannoni na resistência à compressão dos tijolos maciços.

| Comparação | Valor p | Significativo |
|---------------------------------|---------|--------------------------------|
| T025-SODA-2,5 vs. T025-SCA-2,5 | 0,377 | Não (Valor p > 0,05) |
| T025-TEST-2,5 vs. T025-SCA-2,5 | 0,092 | Não (Valor p > 0,05) |
| T025-TEST-2,5 vs. T025-SODA-2,5 | 0,006 | Sim (Valor p < 0,05) |

Fonte: A autora, 2024.

Figura 43 – Influência dos tratamentos superficiais aplicados nas fibras de capimannoni na resistência à compressão dos tijolos maciços.



Fonte: A autora, 2024.

Com base nos resultados da análise de variância (Tabela 15) e do teste de Tukey (Tabela 16), é possível concluir que há uma diferença significativa na resistência à compressão entre os tratamentos aplicados nas fibras de capimannoni. A diferença foi verificada entre o tratamento sem aditivos (testemunha) e o tratamento com soda cáustica. Além disso, no teste foi possível observar que a diferença entre o tratamento com soda cáustica e com SCA não é significativa.

Na Figura 43, observa-se que o tratamento com soda cáustica apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à compressão após 14 dias de cura, tanto para o teor de fibra de 0,25% quanto para o de 0,50%. Esse resultado pode ser atribuído à maior aderência das fibras à matriz (solo eólico-cimento-SCA), decorrente da maior rugosidade superficial das fibras tratadas com soda cáustica, conforme evidenciado nas análises microscópicas (Figuras 34 e 35). Com base nesses resultados, verifica-se que o tratamento com soda cáustica favorece a adesão das fibras e, conseqüentemente, melhora a resistência à compressão.

Visando a aplicação das fibras vegetais de capimannoni na fabricação dos tijolos ecológicos vazados, as fibras sem tratamento (testemunha) foram descartadas devido ao baixo desempenho na resistência à compressão. Optou-se por manter os tratamentos com sílica da casca de arroz (SCA) e soda cáustica, que apresentaram os melhores resultados, para testes em tijolos vazados, considerando a diferença de geometria em relação aos tijolos maciços. Quanto ao teor de fibras, devido ao formato vazado, teores elevados podem comprometer a resistência à compressão, pois o excesso de fibras tende a criar descontinuidades na matriz do material, reduzindo a coesão interna e dificultando a compactação adequada da mistura. Assim, o teor de 0,25% de fibra de capimannoni com comprimento de 2,5 cm foi escolhido, visando uma melhor homogeneidade e compactação da mistura para otimizar o desempenho em compressão. Para validar essa escolha, o teor mais elevado de 0,50% de fibras foi novamente testado em tijolos vazados.

4.2.3 Testes em tijolos ecológicos vazados

A Tabela 17 apresenta os resultados médios de resistência à compressão (MPa), juntamente com o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV), para cada uma das nove formulações preliminarmente testadas em tijolos ecológicos vazados, após 7 dias de cura.

Tabela 17 – Valores médios de resistência à compressão aos 7 dias de cura em tijolos ecológicos vazados.

| TRAÇO | Resistência à Compressão MÉDIA (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
|-----------------------|---|----------|--------|
| T80-5-15-SF | 1,12 | 0,29 | 25,7 |
| T79,75-5-15-025F-SD | 0,98 | 0,29 | 29,4 |
| T79,50-5-15-050F-SD | 0,70 | 0,14 | 25,7 |
| T80-10-10-SF | 1,73 | 0,32 | 18,4 |
| T79,75-10-10-025F-SD | 1,35 | 0,20 | 14,6 |
| T79,75-10-10-025F-SCA | 1,30 | 0,36 | 27,3 |
| T80-15-5-SF | 3,16 | 0,36 | 10,3 |
| T79,85-15-5-015F-SD | 3,04 | 0,26 | 8,51 |
| T79,75-15-5-025F-SD | 2,45 | 0,36 | 14,9 |

Legenda: Composição do traço: T (solo-cimento-SCA-teor de fibras-tratamento das fibras); SF: Sem fibra; SD: Soda cáustica; SCA: Sílica da casca de arroz; DP: Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: A autora, 2024.

Verifica-se na Tabela 17, que os tijolos vazados fabricados com o menor teor de cimento (5%) nas formulações T80-5-15-SF, T79,75-5-15-025F-SD e T79,50-5-15-050F-SD, tanto com fibras vegetais quanto sem, apresentaram médias de resistência muito inferiores ao mínimo exigido pela normativa ABNT NBR 8491 (2012), que é de 2,0

MPa. Mesmo considerando que os testes foram realizados após 7 dias de cura e que o cimento utilizado (CP V ARI) atinge 80% de sua resistência em 7 dias, os resultados foram insatisfatórios. As formulações com 10% de cimento na mistura (T80-10-10-SF, T79,75-10-10-025F-SD e T79,75-10-10-025F-SCA) também não atingiram o valor mínimo estabelecido pela normativa. Em contraste, as formulações com 15% de cimento (T80-15-5-SF, T79,85-15-5-015F-SD e T79,85-15-5-025F-SD) apresentaram resistência acima do requisito mínimo, indicando uma maior eficiência em compressão. Com base nesses resultados, foram selecionados três teores de cimento (5%, 10% e 15%) para aplicar nas dosagens finais dos tijolos ecológicos vazados sem fibra. Embora os teores de 5% e 10% tenham mostrado eficácia limitada na etapa preliminar, foram mantidos para uma avaliação mais aprofundada nos demais ensaios laboratoriais após um período de cura maior (28 dias).

Os resultados apresentados na Tabela 17 indicam que o tratamento com soda cáustica proporcionou as maiores médias de resistência à compressão para o traço T79,75-10-10-025F-SD, superando o tratamento com sílica da casca de arroz no traço T79,75-10-10-025F-SCA de composição similar da matriz (solo-cimento-SCA). Além da resistência, a escolha do tratamento foi embasada em análises preliminares realizadas por microscopia estereoscópica e MEV, que mostraram uma maior rugosidade e modificação na estrutura das fibras de capimannoni tratadas com soda cáustica, favorecendo a ancoragem e a aderência das fibras na matriz. Estudos prévios com fibras vegetais de sisal, coco e cânhamo (SHAH LI JING; KANJANA, 2022; POLETANOVIC et al., 2021) também observaram melhor desempenho em resistência à compressão para fibras tratadas com soda cáustica. Com base nesses resultados, o tratamento com soda cáustica a 6% de concentração foi adotado para as fibras de capimannoni nas formulações definitivas dos tijolos vazados.

Em relação ao teor de fibras, os resultados apresentados na Tabela 17 indicam que a resistência à compressão aumenta com a redução do teor de fibras e o aumento do teor de cimento. Dessa forma, visando atender aos requisitos mínimos de 2,0 MPa estabelecidos pela norma ABNT NBR 8491 (2012), optou-se por descartar a adição de fibras nas formulações com menor teor de cimento (5% nas misturas T79,75-5-15-025F-SD e T79,50-5-15-050F-SD), pois o desempenho dessas amostras ficaram significativamente abaixo do exigido. Em relação aos teores de 0,15% e 0,25% de fibras testados na mistura com 15% de cimento (T79,85-15-5-015F-SD e T79,75-15-5-025F-SD), o teor de 0,15% demonstrou um aumento de 24% na resistência à compressão em comparação ao teor de 0,25%, resultado que era esperado devido à geometria do tijolo vazado. Com base nesses resultados, o teor de 0,15% de fibras vegetais de capimannoni foi definido para ser utilizado nas dosagens definitivas para a fabricação dos tijolos ecológicos vazados, especificamente nas formulações contendo 10% e 15% de cimento.

Para detalhar as dosagens definidas nesta etapa, a Tabela 18 apresenta as formulações escolhidas para a fabricação dos lotes definitivos de tijolos ecológicos vazados, tanto sem fibra quanto com fibras de capimannoni tratadas com soda cáustica.

Tabela 18 – Dosagens definitivas dos materiais para fabricação dos tijolos ecológicos vazados.

| TRAÇO | SOLO | CIM | SCA | TEOR DE FIBRAS |
|--------------------|-------------|------------|------------|-----------------------|
| T80-5-15-SF | 80% | 5% | 15% | 0% (SF) |
| T80-10-10-SF | 80% | 10% | 10% | 0% (SF) |
| T79,85-10-10-0,15F | 79,85% | 10% | 10% | 0,15% (F) |
| T80-15-5-SF | 80% | 15% | 5% | 0% (SF) |
| T79,85-15-5-0,15F | 79,85% | 15% | 5% | 0,15% (F) |

SOLO: Solo eólico; CIM: Cimento Portland; SCA: Sílica da casca de arroz.

Fonte: A autora, 2024.

4.3 ACABAMENTO SUPERFICIAL DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS VAZADOS

As Figuras 44 e 45 mostram a avaliação do acabamento superficial dos tijolos ecológicos vazados. As fotografias de alta resolução foram tiradas após 28 dias de cura, correspondendo às dosagens definitivas.

Figura 44 – Tijolo ecológico vazado sem fibras vegetais de capimannoni do traço T80-10-10-SF: (a) vista superior e, (b) vista lateral.



(a)



(b)

Fonte: A autora, 2024.

Figura 45 – Tijolo ecológico vazado com fibras vegetais de capimannoni do traço T79,85-10-10-0,15F: (a) vista superior e, (b) vista lateral.



(a)



(b)

Fonte: A autora, 2024.

A partir da análise das Figuras 44 e 45, é possível verificar que ambos os tipos de tijolos vazados (com e sem fibras vegetais) exibem um acabamento superficial uniforme. Em alguns tijolos com fibras, foram observadas pequenas fissuras superficiais próximas às fibras expostas na superfície dos tijolos. No entanto, de forma geral, os tijolos vazados não apresentaram danos ou fissuras profundas que comprometessem a integridade dos mesmos.

4.4 ENSAIOS LABORATORIAIS APLICADOS NOS TIJOLOS ECOLÓGICOS VAZADOS

4.4.1 Absorção de água

A Tabela 19 apresenta os valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação (CV%) da absorção de água para cada dosagem definitiva aplicada nos tijolos ecológicos vazados após 28 dias de cura.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção de água nos tijolos ecológicos vazados: médias, desvio padrão e coeficiente de variação (CV).

| Dosagens | Médias (%) | Desvio Padrão | CV (%) |
|----------------------|------------|---------------|--------|
| T80-5-15-SF | 14,63 | 0,26 | 1,80 |
| T80-10-10-SF | 14,48 | 0,75 | 5,17 |
| T79,85-10-10-0,15F | 17,03 | 2,67 | 15,7 |
| T80-15-5-SF | 15,06 | 0,70 | 4,59 |
| T79,85-15-5-0,15F | 15,51 | 0,57 | 3,65 |
| ABNT NBR 8491 (2012) | 20,00 | | |

Legenda: Composição do traço: T (solo-cimento-SCA-teor de fibras).

Fonte: A autora, 2024.

A partir dos resultados obtidos (Tabela 19), observou-se que a adição de fibras vegetais nas dosagens T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F, em comparação com as dosagens sem fibra T80-10-10-SF e T80-15-5-SF, resultou em maior absorção de água. Esse aumento pode ser explicado pela maior porosidade do material, como relatado por TAALLAH e GUETTALA (2016) e BOUCHEFRA et al. (2022), devido à incorporação das fibras vegetais, que criam pequenos canais e vazios na estrutura, facilitando a penetração da água. No entanto, apesar desse aumento, todas as dosagens finais testadas nos tijolos ecológicos vazados apresentaram boa resistência à absorção de água, mantendo-se abaixo do limite máximo de 20% estabelecido pela norma ABNT NBR 8491 (2012).

A Tabela 20 mostra uma comparação entre os resultados deste estudo e os dados de pesquisas anteriores sobre a absorção de água em tijolos ecológicos (SUJATHA; DEVI, 2018; DULAL et al., 2023; ROCHA et al., 2021; SOUZA et al., 2022).

Tabela 20 – Comparação entre dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura para absorção de água em tijolos ecológicos.

| Dosagens / autores | Médias | Teor de Fibras |
|-----------------------|----------|---------------------|
| T80-5-15-SF | 14,63% | - |
| T80-10-10-SF | 14,48% | - |
| T79,85-10-10-0,15F | 17,03% | 0,15% |
| T80-15-5-SF | 15,06% | - |
| T79,85-15-5-0,15F | 15,51% | 0,15% |
| SUJATHA e DEVI (2018) | < 20,00% | entre 0,25% e 1,0%* |
| DULAL et al. (2023) | < 20,00% | - |
| ROCHA et al. (2021) | < 20,00% | - |
| SOUZA et al. (2022) | < 20,00% | - |

Legenda: *Os autores investigaram diferentes teores e tipos de fibras, tanto vegetais quanto sintéticas.

Fonte: A autora, 2024.

No estudo de SUJATHA e DEVI (2018), a incorporação de fibras aumentou a porosidade e a absorção de água nos tijolos ecológicos, com as fibras sintéticas (polipropileno) sendo mais eficazes no controle da absorção do que as fibras vegetais (banana). Apesar disso, todos os valores permaneceram abaixo do limite normativo de 20,00% ABNT NBR 8491 (2012). De forma semelhante, DULAL et al. (2023) e ROCHA et al. (2021) obtiveram absorção inferior a 20,00% em tijolos de solo-cimento e solo-cimento-cinza de arroz, respectivamente. Já SOUZA et al. (2022) verificaram valores de absorção inferiores a 20,00% em tijolos de solo-cimento-cinza de madeira, nas dosagens com até 30% de substituição do cimento e 10% de substituição do solo pela cinza. Dessa forma, as comparações apresentadas na Tabela 20 demonstram que os tijolos ecológicos vazados estão em conformidade com a literatura, atingindo valores de absorção dentro dos limites normativos, o que confirma a viabilidade de seu uso em construções sustentáveis.

A Tabela 21 apresenta os resultados da ANOVA, e a Tabela 22 exhibe os resultados do Teste de Tukey, ambos com um nível de significância de 95%. As análises estatísticas foram conduzidas para identificar possíveis diferenças significativas entre as dosagens estudadas quanto à absorção de água nos tijolos vazados.

Tabela 21 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para absorção de água nos tijolos ecológicos vazados.

| FV | GL | SQ | MQ | Valor F | Valor p | Significativo |
|----------|----|-------|-------|---------|---------|----------------------|
| Dosagens | 4 | 12,58 | 3,144 | 1,836 | 0,199 | Não (Valor p > 0,05) |
| Erro | 10 | 17,13 | 1,713 | | | |

Nível de significância: 95%; FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos quadrados;
 Fonte: A autora, 2024.

Tabela 22 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de absorção de água entre diferentes dosagens.

| Comparação | Valor P | Significativo |
|--|---------|----------------------|
| T79,85-10-10-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,1969 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T80-10-10-SF | 0,9812 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,8677 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-10-10-SF | 0,9998 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,4010 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,6266 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,2409 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-15-5-SF | 0,9923 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-15-5-SF | 0,9941 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-15-5-0,15F | 0,9203 | Não (Valor p > 0,05) |

Fonte: A autora, 2024.

Os resultados da ANOVA indicam que, ao nível de significância de 95%, o valor de p é superior a 0,05, o que implica que as diferenças nas médias de absorção de água entre as dosagens não são estatisticamente significativas. Adicionalmente, os resultados do teste de Tukey, também com 95% de significância, corroboram essa conclusão, pois todos os valores de p das comparações foram superiores a 0,05, indicando que não há diferenças significativas estatisticamente. Portanto, com base nas análises realizadas, pode-se concluir que não há evidências suficientes para afirmar que uma dosagem difere significativamente das demais em termos de absorção de água.

4.4.2 Resistência à compressão

A Tabela 23 apresenta os valores médios de resistência à compressão (MPa), juntamente com os desvios padrão e coeficientes de variação (CV%), para cada dosagem final aplicada aos tijolos ecológicos vazados, após 28 dias de cura.

Tabela 23 – Valores médios de resistência à compressão (MPa), desvios padrão, coeficientes de variação (CV) dos tijolos ecológicos vazados após 28 dias de cura

| Dosagens | Médias (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | CV (%) |
|----------------------|--------------|---------------------|--------|
| T80-5-15-SF | 1,95 | 0,38 | 19,40 |
| T80-10-10-SF | 2,83 | 0,41 | 14,40 |
| T79,85-10-10-0,15F | 2,51 | 0,38 | 15,00 |
| T80-15-5-SF | 3,48 | 0,53 | 15,10 |
| T79,85-15-5-0,15F | 3,20 | 0,42 | 13,00 |
| ABNT NBR 8491 (2012) | 2,00 | | |

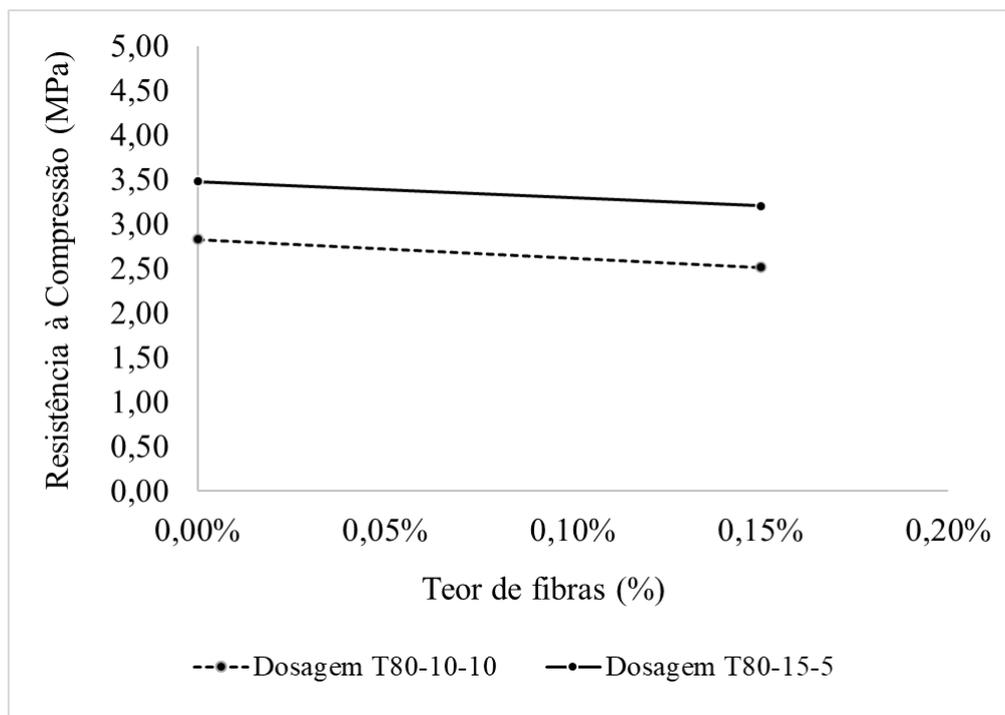
Fonte: A autora, 2024.

Os resultados apresentados na Tabela 23 indicam que a dosagem T80-5-15-SF, composta por 80% de solo eólico, 5% de cimento, 15% de sílica da casca de arroz (SCA) e sem fibras, apesar de ter o menor desvio padrão absoluto, registrou a menor média de resistência à compressão e a maior variabilidade relativa ($CV\% = 19,4\%$), além de apresentar valores médios abaixo do exigido pela normativa ABNT NBR 8491 (2012). Por outro lado, as demais dosagens utilizadas na fabricação dos tijolos vazados (T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F), com ou sem a incorporação de fibras de capimannoni, apresentaram desempenho superior ao mínimo exigido pela referida normativa, alcançando resistência acima de 2,0 MPa.

Com base nos dados apresentados na Tabela 23, observa-se que, entre as dosagens sem fibras, a T80-15-5-SF, composta por 80% de solo eólico, 15% de cimento, 5% de SCA e nenhuma fibra, apresentou a maior resistência à compressão, destacando-se como a mais eficiente em termos de desempenho geral. Já entre as dosagens com fibras, a T79,85-15-5-0,15F, que contém 79,85% de solo eólico, 15% de cimento, 5% de SCA e 0,15% de fibras, mostrou a maior média de resistência à compressão.

A Figura 46, apresenta a comparação da resistência à compressão aos 28 dias de cura em função do teor de fibras de capimannoni nas diferentes dosagens aplicadas nos tijolos ecológicos vazados.

Figura 46 – Comparação da resistência à compressão aos 28 dias dos tijolos em função do teor de fibras de capimannoni nas diferentes dosagens.

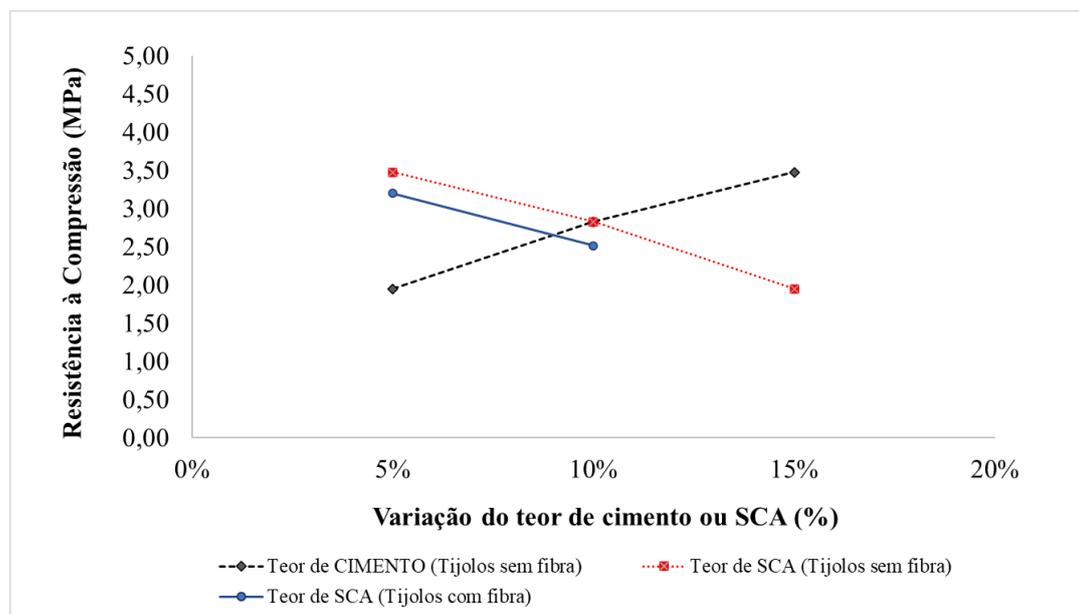


Fonte: A autora, 2024.

De modo geral, a adição de fibras vegetais de capimannoni resultou em uma redução na resistência à compressão, variando de aproximadamente 8,05% nas dosagens com 15% de cimento a 11,32% nas com 10%. Essa queda pode ser atribuída a fatores como a distribuição e a interação das fibras com a matriz do tijolo. A presença de fibras pode introduzir pontos de fraqueza ou comprometer a coesão da mistura, alterando a estrutura interna e afetando as propriedades mecânicas. Estudos na literatura corroboram esses resultados, apontando que a introdução de fibras pode gerar vazios na estrutura dos tijolos, o que contribui para a redução da resistência à compressão (TAALLAH; GUETTALA, 2016; BOUCHEFRA et al., 2022). Dessa forma, apesar da redução na compressão, as fibras demonstraram ser uma adição viável devido ao baixo custo, disponibilidade e ao benefício adicional de melhorar a resistência à tração e reduzir a fratura frágil dos tijolos. Contudo, os valores médios de resistência à compressão se mantiveram acima do mínimo de 2,0 MPa exigido pela norma (ABNT NBR 8491, 2012).

A Figura 47 apresenta uma comparação do comportamento mecânico à compressão dos tijolos ecológicos vazados com idade de controle de 28 dias, destacando a influência do teor de cimento e da sílica da casca de arroz (SCA) nas misturas sem fibra, e a influência do teor de SCA nos tijolos com fibras.

Figura 47 – Análise do comportamento da resistência à compressão dos tijolos vazados aos 28 dias de cura em relação a variação do teor de cimento e de SCA aplicado nas dosagens.



Fonte: A autora, 2024.

Na Figura 47, observa-se que em relação ao teor de cimento nos tijolos, a resistência à compressão dos tijolos aumenta à medida que se eleva o teor de cimento presente nas misturas. Esse comportamento ocorre devido ao cimento agir como um aglomerante, proporcionando maior coesão entre as partículas dos materiais e melhorando a integridade estrutural dos tijolos, o que é consistente com os resultados de outros estudos na literatura (MOUIH et al., 2023; DULAL et al., 2023).

Em relação ao teor de SCA, na Figura 47, observa-se que a resistência à compressão diminuiu à medida que o teor de SCA nas misturas aumentou, confirmando o encontrado na literatura (DINESH et al., 2023). Segundo os autores Andreola et al. (2018), Dinesh et al. (2023), essa redução pode ser explicada pelo fato de a SCA ser um material poroso, que introduz vazios na mistura e compromete a resistência final dos tijolos. A mesma redução é evidenciada para os tijolos com fibras, conforme o teor de SCA presente na mistura aumenta, há um decréscimo na resistência à compressão. Apesar dessa redução, a SCA se destaca como uma alternativa viável para substituir parcialmente o cimento em tijolos ecológicos vazados. A substituição de até 10% do cimento pela SCA pode ser realizada sem comprometer significativamente a resistência à compressão dos tijolos, ao mesmo tempo em que promove o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, tornando uma opção promissora para a fabricação sustentável de tijolos, contribuindo para a redução do impacto ambiental associado ao uso de cimento.

A Tabela 24 mostra uma comparação entre os resultados deste estudo e os dados

de pesquisas anteriores sobre a resistência à compressão de tijolos ecológicos (ROCHA et al., 2021; DULAL et al., 2023; SUJATHA; DEVI, 2018).

Tabela 24 – Comparação entre dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura para resistência à compressão em tijolos ecológicos.

| Referência | Médias | Fibras | Tipo e Dimensões (mm) |
|-----------------------|------------|---------|---------------------------------|
| T80-5-15-SF | 1,95 MPa | - | Tijolo vazado (200 x 100 x 50) |
| T80-10-10-SF | 2,83 MPa | - | Tijolo vazado (200 x 100 x 50) |
| T79,85-10-10-0,15F | 2,51 MPa | 0,15% | Tijolo vazado (200 x 100 x 50) |
| T80-15-5-SF | 3,48 MPa | - | Tijolo vazado (200 x 100 x 50) |
| T79,85-15-5-0,15F | 3,20 MPa | 0,15% | Tijolo vazado (200 x 100 x 50) |
| SUJATHA e DEVI (2018) | 4,00 MPa | 0,25% * | Tijolo maciço (215 x 105 x 65) |
| DULAL et al. (2023) | > 2,00 MPa | - | Tijolo vazado (300 x 150 x 100) |
| ROCHA et al. (2021) | > 5,00 MPa | - | Tijolo vazado (250 x 125 x 75) |

Legenda: Dimensões dos tijolos estão em milímetros e na ordem de comprimento x largura x altura; * fibra de banana;

Fonte: A autora, 2024.

A partir da análise da Tabela 24, verifica-se que os resultados de resistência à compressão obtidos para as dosagens estudadas mostraram-se consistentes com os valores relatados na literatura. No estudo de SUJATHA e DEVI (2018), a resistência à compressão de tijolos maciços com adição de fibras de banana foi de 4,00 MPa, um valor ligeiramente superior ao observado neste trabalho. Essa diferença pode ser explicada pelo tipo de tijolo utilizado, uma vez que os tijolos maciços geralmente apresentam maior resistência em comparação aos tijolos vazados, devido ao seu formato sem a presença de vazios estruturais.

Assim como observado nas dosagens sem fibras com teores de cimento superiores a 10% (T80-10-10-SF e T80-15-5-SF) neste estudo, o estudo de DULAL et al. (2023) também relatou que tijolos vazados sem fibras atingiram uma resistência à compressão superior a 2,0 MPa para dosagens com mais de 10% de cimento. Em contraste, o estudo de ROCHA et al. (2021) revelou desempenho superior de resistência à compressão (acima de 5,0 MPa) para os tijolos vazados com a dosagem de 5% de cimento e 5% de cinza da casca de arroz. Essa variação nos resultados pode ser atribuída às diferenças nas proporções dos componentes, às dimensões dos tijolos e/ou às técnicas de fabricação utilizadas. Apesar das diferenças, os valores obtidos neste trabalho mostram que os tijolos vazados, tanto com a incorporação de fibras de capimannoni quanto sem, apresentam um desempenho mecânico de resistência à compressão satisfatório e em conformidade com estudos anteriores.

Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 25, e os resultados do

teste de Tukey são exibidos na Tabela 26, ambos com um nível de significância de 95%.

Tabela 25 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à compressão nos tijolos ecológicos vazados.

| FV | GL | SQ | MQ | Valor F | Valor p | Significativo |
|----------|----|-------|--------|---------|----------------------|----------------------|
| Dosagens | 4 | 9,989 | 2,4973 | 13,89 | $1,6 \times 10^{-6}$ | Sim (Valor p < 0,05) |
| Erro | 30 | 5,395 | 0,1798 | | | |

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos quadrados;

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 26 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes dosagens.

| Comparação | Valor P | Significativo |
|---|-----------|--------------------------------|
| T79,85-10-10-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,6561 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T80-10-10-SF | 0,0523 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,4741 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-10-10-SF | 0,0046 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,0017 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,0381 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,1155 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-15-5-SF | 0,0738 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-15-5-SF | 0,0000017 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-15-5-0,15F | 0,0000489 | Sim (Valor p < 0,05) |

Fonte: A autora, 2024.

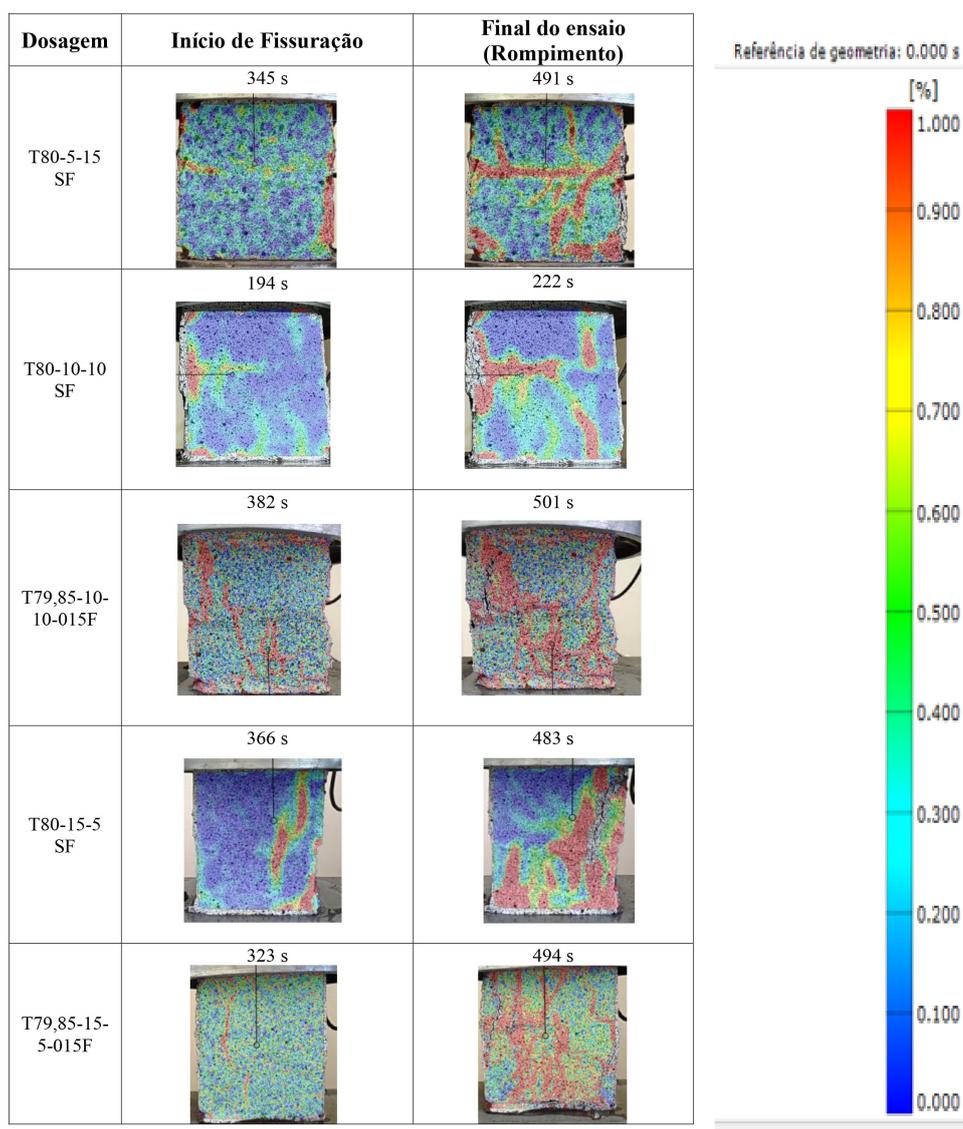
A análise ANOVA (Tabela 25) indicou que há diferenças significativas entre as dosagens dos materiais na resistência à compressão. O teste de Tukey (Tabela 26) permitiu identificar quais pares de tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas. A dosagem T80-5-15-SF mostrou diferenças significativas em várias comparações, sugerindo que sua resistência à compressão é consistentemente diferente em relação as demais dosagens, devido à sua menor resistência média (abaixo de 2,0 MPa).

Em relação à presença de fibras, as comparações realizadas pelo teste de Tukey (Tabela 26), indicaram que a presença de fibras não causou diferenças significativas na resistência à compressão. Isso ficou claro ao comparar dosagens com o mesmo teor de cimento e SCA, mas com e sem fibras: T79,85-10-10-0,15F (com fibra) *versus* T80-10-10-SF (sem fibra) e T79,85-15-5-0,15F (com fibra) *versus* T80-15-5-SF (sem fibra). No entanto, ao comparar as dosagens que contêm fibras, mas com diferentes

teores de cimento e SCA, como T79,85-15-5-0,15F *versus* T79,85-10-10-0,15F, uma diferença significativa foi observada. Essa diferença pode ser atribuída ao maior teor de cimento (15%) na dosagem T79,85-15-5-0,15F, que, estatisticamente, evidenciou um desempenho de compressão distinto e superior em relação à dosagem T79,85-10-10-0,15F com menor teor de cimento (10%).

A Figura 48 mostra a análise do modo de falha e ruptura dos tijolos ecológicos vazados durante o ensaio de resistência à compressão realizado após 28 dias de cura. Os tempos de início de fissuração e rompimento foram determinados com base na média representativa de pelo menos três tijolos para cada formulação, com o objetivo de fornecer uma avaliação confiável do desempenho das dosagens aplicadas aos tijolos em relação à formação de fissuras e ao rompimento.

Figura 48 – Comparação do modo de falha e ruptura na resistência à compressão das diferentes dosagens aplicadas aos tijolos ecológicos vazados.



Fonte: A autora, 2024.

A análise do modo de falha e ruptura dos tijolos ecológicos vazados (Figura 48) revelou que as dosagens com incorporação de fibras de capimannoni (T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F) apresentaram uma maior quantidade de fissuras antes do rompimento, em comparação com as dosagens sem fibras (T80-5-15-SF, T80-10-10-SF e T80-15-5-SF). Esse comportamento pode ser atribuído às fibras de capimannoni atuarem como pontes de transferência de tensões, o que, embora não aumente a resistência à compressão, melhora a ductilidade do material e evita uma falha brusca e frágil.

4.4.3 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

A Tabela 27 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos dos tijolos ecológicos vazados, realizado após 28 dias de cura. A tabela inclui as médias de resistência para cada dosagem, o desvio padrão (MPa) e o coeficiente de variação (CV%).

Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos: médias, desvio padrão e coeficiente de variação (CV%)

| Dosagens | Médias (MPa) | Desvio Padrão (MPa) | CV (%) |
|--------------------|--------------|---------------------|--------|
| T80-5-15-SF | 0,67 | 0,11 | 16,50 |
| T80-10-10-SF | 1,02 | 0,27 | 26,50 |
| T79,85-10-10-0,15F | 1,14 | 0,25 | 22,00 |
| T80-15-5-SF | 1,31 | 0,11 | 8,54 |
| T79,85-15-5-0,15F | 1,72 | 0,29 | 16,6 |

Fonte: A autora, 2024.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 27, observa-se que os melhores desempenhos de resistência à tração na flexão em três pontos foram obtidos para as dosagens com 15% de cimento. A dosagem T79,85-15-5-0,15F, contendo 0,15% de fibras, apresentou a maior resistência média (1,72 MPa), destacando-se como a de melhor desempenho. Em seguida, a dosagem T80-15-5-SF, sem fibras, obteve a segunda maior resistência média (1,31 MPa). A adição de fibras resultou em um aumento de 31,3% na resistência à tração, indicando que as fibras contribuíram para o reforço da estrutura dos tijolos, ajudando a distribuir as tensões de maneira uniforme e melhorando a capacidade do material de resistir a esforços de tração, o que permite suportar tensões sem ruptura abrupta.

O aumento na resistência à tração também foi observado nas dosagens com 10% de cimento (Tabela 27), onde a resistência foi de 1,02 MPa para a dosagem T80-10-10-SF, sem fibras, enquanto a adição de fibras na dosagem com o mesmo teor de cimento (T79,85-10-10-0,15F) resultou em um ganho de 11,8%, alcançando uma resistência de 1,14 MPa.

Por fim, na Tabela 27, observa-se que a dosagem T80-5-15-SF, que contém 5% de cimento na mistura, obteve a menor média de resistência à tração, de 0,67 MPa. Esse resultado sugere que essa combinação pode não ser adequada para aplicações que exigem maior resistência à tração na flexão, evidenciando a importância da adição de fibras e/ou um teor maior de cimento na mistura.

A Tabela 28 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos neste estudo e aqueles relatados na literatura (DULAL et al., 2023; TAALLAH; GUETTALA, 2016;

LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023) para o ensaio de tração na flexão em três pontos em tijolos ecológicos.

Tabela 28 – Comparação das dosagens estudadas com os resultados encontrados na literatura em tijolos ecológicos.

| Dosagens / Autores | Médias (MPa) |
|----------------------------------|---------------------|
| T80-5-15 SF | 0,67 |
| T80-10-10 SF | 1,02 |
| T79,85-10-10-015F | 1,14 |
| T80-15-5 SF | 1,31 |
| T79,85-15-5-015F | 1,72 |
| DULAL et al. (2023) | 1,00 |
| LATHA, MURUGESAN e THOMAS (2023) | > 1,00 |
| TAALLAH e GUETTALA (2016) | > 1,20 |

Fonte: A autora, 2024.

Os valores médios de resistência à tração na flexão obtidos para os tijolos ecológicos vazados desse estudo (Tabela 28) mostraram-se consistentes com os resultados relatados na literatura (DULAL et al., 2023; TAALLAH; GUETTALA, 2016; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023), apresentando resistência superior a 1,0 MPa nas dosagens com mais de 10% de cimento (T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F). De forma semelhante, o estudo de DULAL et al. (2023) também relatou que tijolos vazados com teores de cimento superiores a 10% exibiram resistência à tração acima de 1,0 MPa.

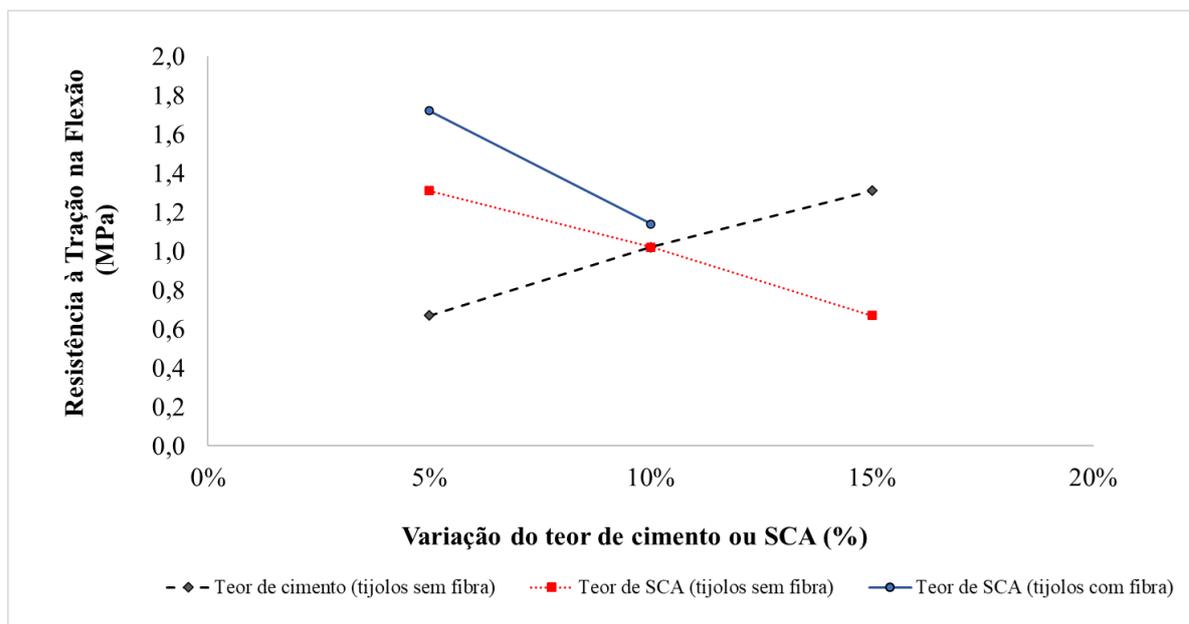
No estudo de LATHA, MURUGESAN e THOMAS (2023), os autores observaram que a adição de fibras vegetais em tijolos ecológicos maciços resultou em um aumento de aproximadamente 40% na resistência à tração na flexão, atingindo valores superiores a 1,00 MPa com a incorporação de 1,0% de fibras de sisal de 30 mm em uma mistura com 10% de cimento. Esse comportamento é semelhante ao observado nas dosagens estudadas, conforme mostrado na Tabela 28. Da mesma forma, TAALLAH e GUETTALA (2016) verificou que tijolos ecológicos reforçados com fibras vegetais de tâmara apresentaram valores médios de resistência à tração na flexão superiores a 1,20 MPa.

Conforme relatado em outros estudos (DANSO BRETT MARTINSON; MANT, 2015; DONKOR; OBONYO, 2015; SUJATHA; MAHALAKSHMI; KANNAN, 2023; LATHA; MURUGESAN; THOMAS, 2023), a presença de fibras melhora o desempenho da resistência à tração, pois as fibras funcionam como pontes de transferência de tensões, contribuindo para uma distribuição mais uniforme das forças e, conseqüentemente, em um aumento na resistência do material.

A Figura 49 apresenta uma comparação do comportamento à tração na flexão

em três pontos dos tijolos ecológicos vazados sem fibras, em relação à variação do teor de cimento e da sílica de casca de arroz (SCA) nas dosagens, além de analisar o impacto do teor de SCA nos tijolos que contêm adição de fibras.

Figura 49 – Análise do comportamento da resistência à tração na flexão dos tijolos vazados aos 28 dias de cura em relação à variação do teor de cimento e de SCA aplicado nas dosagens.



Fonte: A autora, 2024.

Na Figura 49, observa-se que a resistência à tração aumenta com o aumento do teor de cimento nas misturas, comportamento também verificado na resistência à compressão (Figura 47). Esse aumento deve-se à maior coesão e densidade da matriz, que fortalece as ligações entre as partículas de solo e aditivos (cimento e SCA). Embora o incremento de SCA não tenha intensificado as reações pozolânicas, ela atuou como um agente de preenchimento, reduzindo os vazios na matriz, promovendo maior compactação e contribuindo para o aumento de coesão e densidade das misturas.

Com base nos dados obtidos e nas comparações apresentadas na Figura 49, conclui-se que a substituição do cimento pela sílica da casca de arroz (SCA) em até 10% é uma alternativa viável em tijolos ecológicos vazados, pois não compromete de forma significativa o desempenho mecânico de resistência à tração do material.

A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos da ANOVA, enquanto a Tabela 30 a comparação das dosagens entre o teste de tukey, ambos com nível de significância de 95%, buscando verificar se há diferenças significativas entre as médias de resistências à tração nas diferentes dosagens estudadas.

Tabela 29 – Resultados da análise de variância (ANOVA) para resistência à tração na flexão em 3 pontos nos tijolos ecológicos vazados.

| FV | GL | SQ | MQ | Valor F | Valor p | Significativo |
|----------|----|-------|--------|---------|-----------------------|----------------------|
| Dosagens | 4 | 4,158 | 1,039 | 21,39 | $1,98 \times 10^{-8}$ | Sim (Valor p < 0,05) |
| Erro | 30 | 1,458 | 0,0486 | | | |

FV: Fonte de Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; MQ: Média dos quadrados;

Fonte: A autora, 2024.

Tabela 30 – Resultados do teste de Tukey para comparação das médias de resistência à compressão entre diferentes dosagens.

| Comparação | Valor p | Significativo |
|---|---------|--------------------------------|
| T79,85-10-10-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,839 | Não (Valor p > 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T80-10-10-SF | 0,126 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-10-10-SF | 0,0000 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-10-10-SF | 0,0439 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-15-5-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,613 | Não (Valor p > 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,0003 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-10-10-0,15F | 0,0034 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T79,85-15-5-0,15F vs. T80-15-5-SF | 0,0125 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T80-15-5-SF | 0,0001 | Sim (Valor p < 0,05) |
| T80-5-15-SF vs. T79,85-15-5-0,15F | 0,0000 | Sim (Valor p < 0,05) |

Fonte: A autora, 2024.

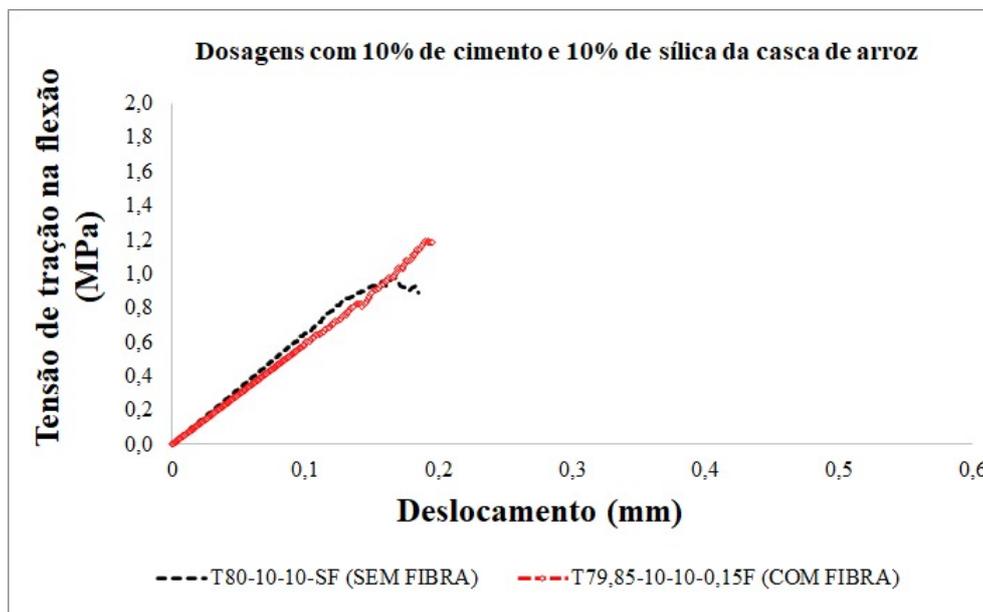
A análise de variância (Tabela 29) indicou diferenças estatisticamente significativas entre as dosagens estudadas, com efeitos distintos sobre a resistência à tração dos tijolos ecológicos vazados. O teste de Tukey (Tabela 30) revelou que a dosagem T79,85-15-5-0,15F, que contém 0,15% de fibras e um teor de cimento elevado (15%), apresentou diferenças significativas em todas as comparações com as demais dosagens (T80-15-5-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F e T80-5-15-SF). Esse comportamento pode ser atribuído à maior resistência média da dosagem T79,85-15-5-0,15F, que superou as demais devido ao maior teor de cimento e à presença das fibras na mistura.

Também, a partir do teste de Tukey (Tabela 30), foi possível verificar que a dosagem T80-5-15-SF, composta pelo menor teor de cimento (5%) e sem fibras, foi significativamente diferente de todas as dosagens (T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF, e T79,85-15-5-0,15F). Essa diferença pode ser explicada pelo desempenho inferior dessa dosagem no ensaio de tração, que pode ser atribuído ao baixo teor de cimento na mistura. Conforme destacado por DULAL et al. (2023), conforme diminui o

teor de cimento, a capacidade de preencher espaços vazios e formar uma rede contínua de suporte é reduzida, resultando em uma estrutura mais fraca e menos capaz de resistir mecânicamente à tração.

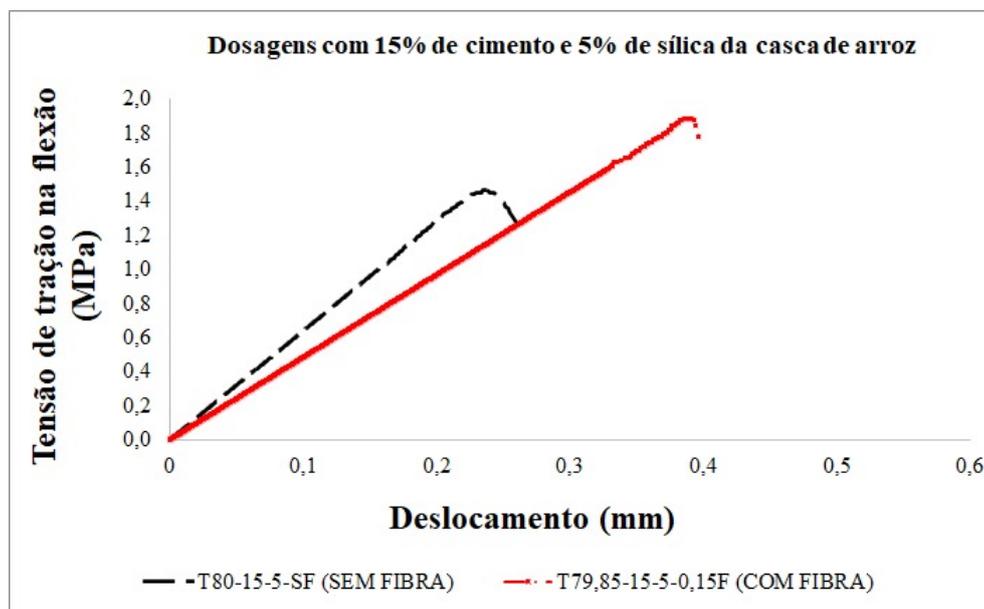
As Figuras 50 e 51 mostram as curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) em função do deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados, comparando as dosagens com e sem fibras vegetais para traços com 10% e 15% de cimento, respectivamente. Complementarmente, a Figura 52 apresenta as curvas correspondentes aos tijolos sem fibras.

Figura 50 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados, com e sem fibras vegetais de capim annoni, nas dosagens contendo 10% de cimento e 10% de SCA na mistura.



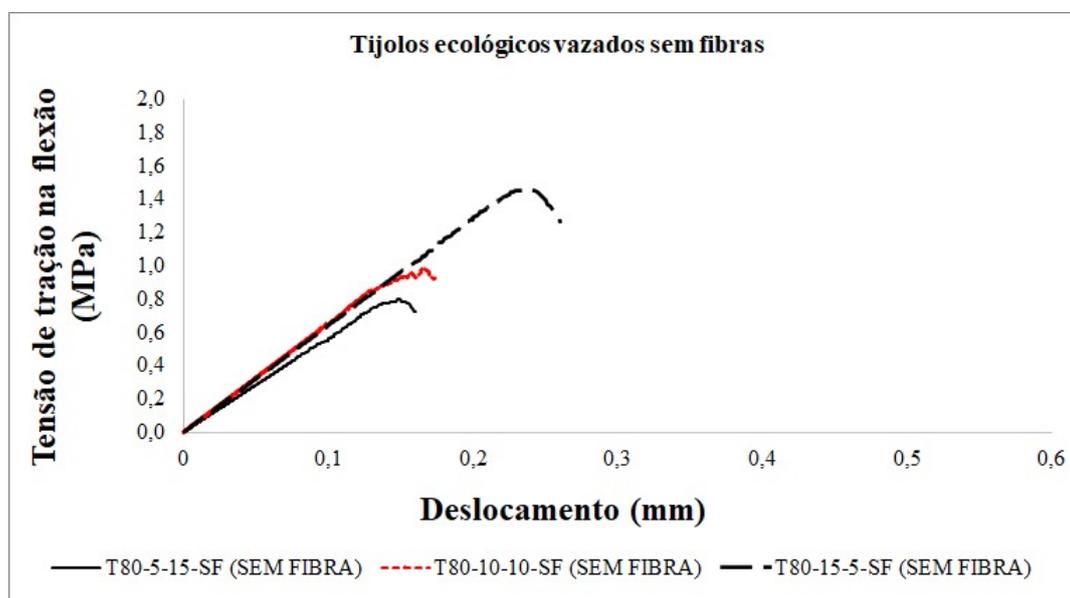
Fonte: A autora, 2024.

Figura 51 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados, com e sem fibras vegetais de capim annoni, nas dosagens contendo 15% de cimento e 5% de SCA na mistura.



Fonte: A autora, 2024.

Figura 52 – Curvas de tensão de tração na flexão em três pontos (MPa) x deslocamento (mm) dos tijolos ecológicos vazados sem fibras.



Fonte: A autora, 2024.

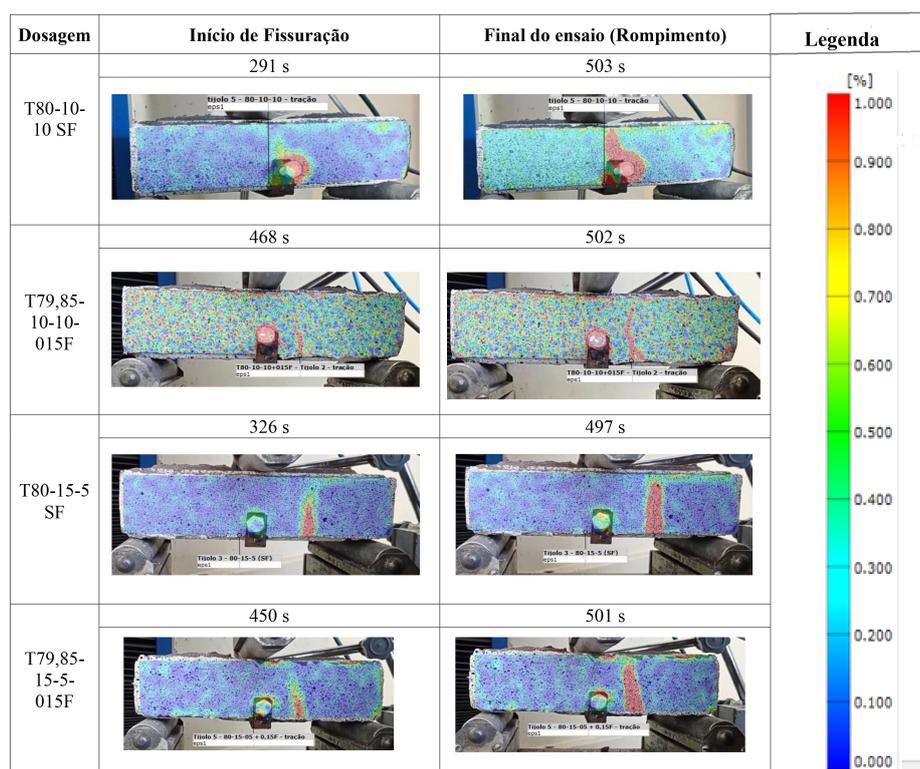
A análise da Figura 50 mostra que a incorporação de fibras vegetais de capim annoni nas dosagens com 10% de cimento (T79,85-10-10-0,15F), em comparação com

a dosagem sem fibras (T80-10-10-SF), aumentou tanto a tensão de tração quanto o deslocamento dos tijolos, melhorando a capacidade de o material se deslocar antes da ruptura. Esse comportamento foi igualmente observado nas dosagens com 15% de cimento, conforme mostrado na Figura 51, onde foi verificado um deslocamento ainda maior, indicando que a presença das fibras tem um impacto positivo na ductilidade do material em diferentes teores de cimento. Esse comportamento também foi relatado na literatura para tijolos ecológicos reforçados com fibras vegetais (DANSO BRETT MARTINSON; MANT, 2015; SUJATHA; MAHALAKSHMI; KANNAN, 2023; STANISLAS et al., 2023), onde os autores observaram que a melhora na ductilidade permite ao material absorver mais energia sob carga, retardando a propagação de fissuras e prevenindo falhas bruscas, o que é vantajoso para aplicações que exigem maior resistência à tração e flexibilidade estrutural. Além disso, as fibras funcionam como reforço, redistribuindo melhor as tensões no material e aprimorando seu desempenho sob esforço mecânico.

Para as dosagens sem fibra, a Figura 52 mostra um aumento tanto na tensão de tração quanto no deslocamento à medida que o teor de cimento na mistura é elevado. Esse comportamento pode ser explicado pela maior coesão e resistência proporcionadas pelo aumento da matriz cimentícia, o que contribui significativamente para a melhoria das propriedades mecânicas dos tijolos, resultando em um desempenho mais estável sob carga.

Com base na correlação de imagens, foi possível examinar os modos de falha e ruptura durante o ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos para as diferentes dosagens dos tijolos ecológicos vazados. A Figura 53 apresenta uma comparação entre as imagens obtidas dos tijolos com e sem fibras vegetais (para dosagens de traço similares), destacando os efeitos da incorporação das fibras.

Figura 53 – Comparação do modo de falha na resistência à tração na flexão em 3 pontos aplicadas nos tijolos ecológicos vazados sob diferentes dosagens.



Fonte: A autora, 2024.

A análise do modo de falha dos tijolos ecológicos vazados (Figura 53) permitiu verificar que as dosagens com a incorporação de fibras vegetais de capimannoni (T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F) desenvolveram fissuras mais tardiamente ao longo do tempo do ensaio, em comparação com as dosagens sem fibra (T80-10-10-SF e T80-15-5-SF), demonstrando que a presença das fibras retarda a formação de fissuras e evita uma falha brusca e frágil, contribuindo para melhorar a ductilidade do material. Quanto ao local da fissura, verifica-se que a maior parte foi observada nos septos dos tijolos, que são as paredes internas que separam os furos. Os septos, por serem mais finos e conterem menos material do que as outras partes do tijolo, são mais suscetíveis a concentrações de tensão, especialmente durante os ensaios de tração, tornando-os pontos críticos para o início de fissuras e falhas.

A Figura 54 apresenta a análise da superfície de ruptura dos tijolos com e sem a incorporação de fibras vegetais de capimannoni, realizada para compreender as interações interfaciais entre a superfície da fibra e a matriz (solo-cimento-SCA), utilizando microscopia estereoscópica com ampliação de 160 vezes.

Figura 54 – Superfície de fratura dos tijolos ecológicos vazados: (a): Tijolos com fibras; (b) Tijolos sem fibra.



(a) Superfície de fratura dos tijolos com fibra



(b) Superfície de fratura dos tijolos sem fibra

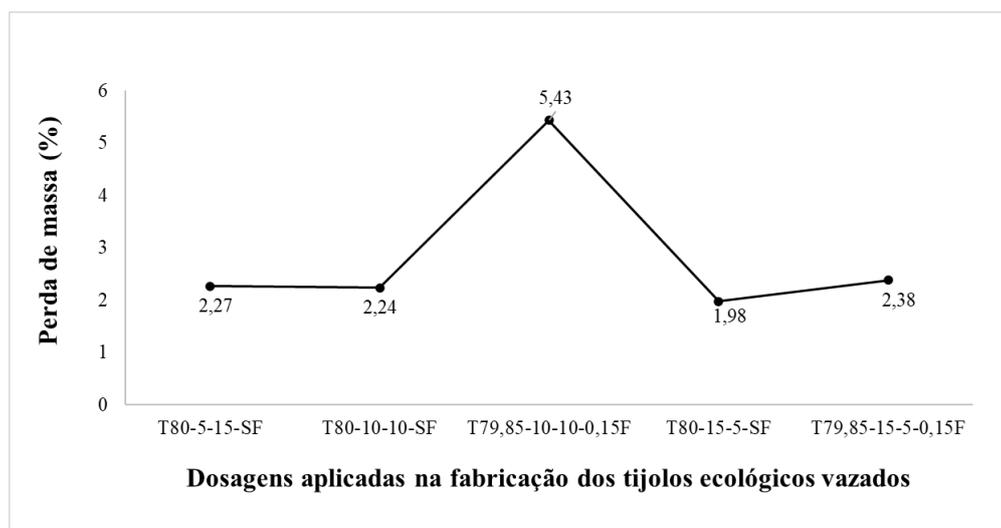
Fonte: A autora, 2024.

A partir da análise da Figura 54 a, foi possível observar que as fibras vegetais sofreram rompimento durante a fratura, evidenciando uma boa aderência à matriz (solo-cimento-SCA) e a contribuição efetiva das fibras para a transferência de tensões na estrutura dos tijolos antes do seu rompimento. Conforme observado por DONKOR e OBONYO (2016), o rompimento das fibras, em vez de seu arrancamento, indica que elas estão bem integradas à matriz, contribuindo significativamente para a resistência à tração do material. Para os tijolos ecológicos fabricados sem a presença de fibras (Figura 54 b), foram observados vazios na estrutura, o que pode ter comprometido a resistência do material, tornando-o mais suscetível a falhas sob carga.

4.4.4 Durabilidade por ciclos de imersão e secagem

A Figura 55 apresenta os resultados da porcentagem média da perda de massa para as diferentes dosagens de tijolos ecológicos vazados que foram submetidos ao ensaio cíclico de durabilidade aos 7 dias de cura.

Figura 55 – Resultados de porcentagem média da perda de massa para as diferentes dosagens dos tijolos ecológicos vazados.



Fonte: A autora, 2024.

As dosagens sem a adição de fibras (SF) apresentam porcentagens médias de perda de massa relativamente baixas e próximas entre si, variando entre 1,98% e 2,27%. No entanto, a introdução de fibras nas dosagens (T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F) tende a aumentar significativamente a perda de massa, especialmente na dosagem T79,85-10-10-0,15F, que apresentou a maior porcentagem de perda, acima de 5%. Durante o ensaio, observou-se que os tijolos com fibras expostas na superfície apresentaram desprendimento dessas fibras ao longo dos ciclos de molhagem e secagem, o que provavelmente contribuiu para o aumento da perda de massa. Esse aumento pode ainda ser atribuído ao incremento da porosidade do material, provocado pela presença das fibras, conforme observado por (TAALLAH; GUETTALA, 2016) em seu estudo.

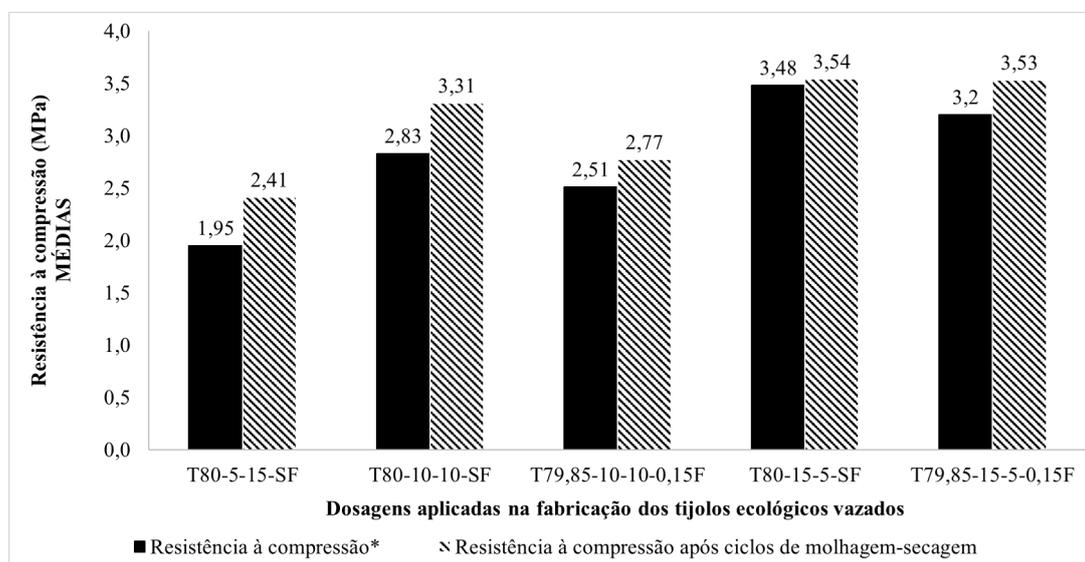
SOUZA et al. (2022) estudou a perda de massa em tijolos ecológicos vazados de solo-cimento-cinza de madeira, relatando que a perda de massa foi abaixo de 10% em todas as dosagens analisadas. FRANÇA et al. (2018) investigou a perda de massa em tijolos vazados de solo-cimento com a incorporação de resíduos de calcário e também verificou valores abaixo de 10% de perda de massa. Em comparação com esses estudos, os resultados apresentados na Figura 55 estão em conformidade com a literatura, apresentando porcentagens inferiores a 6% para as dosagens utilizadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados.

4.4.5 Resistência à compressão após o ensaio de durabilidade

A Figura 56 apresenta os valores médios de resistência à compressão para todas as dosagens utilizadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados. Os resultados obtidos

foram comparados com os valores dos tijolos que não foram submetidos aos ciclos de molhagem e secagem, visando uma comparação entre os tijolos ecológicos vazados submetidos aos ciclos de molhagem-secagem que foram rompidos aos 28 dias, com aqueles que não foram submetidos aos ciclos com o mesmo tempo de cura.

Figura 56 – Resultados médios de resistência à compressão dos tijolos ecológicos vazados antes e após os ciclos de molhagem-secagem.



* Tijolos ecológicos vazados que não passaram pelo ensaio de durabilidade por ciclos de molhagem-secagem.

Fonte: A autora, 2024.

A análise da Figura 56 mostra que todas as dosagens avaliadas apresentaram um aumento na resistência à compressão após o ensaio de durabilidade. A dosagem T80-5-15-SF mostrou o maior incremento, com um aumento de 23,6% na resistência. A dosagem T80-10-10-SF teve um ganho de 16,96%, enquanto a dosagem T79,85-10-10-0,15F melhorou em 10,36%. A dosagem T80-15-5-SF apresentou o menor aumento, de apenas 1,70%, e a dosagem T79,85-15-5-0,15F registrou um aumento de 10,30% na resistência à compressão.

Os resultados obtidos são consistentes com os estudos de FRANÇA et al. (2018), SOUZA et al. (2021) e THENNARASAN LATHA e MURUGESAN (2024). Esses autores também observaram que a resistência à compressão dos tijolos ecológicos aumentou após os ciclos de molhagem e secagem, em comparação com amostras que não passaram por esses ciclos. De acordo com FRANÇA et al. (2018), a exposição repetida à umidade durante o ensaio de durabilidade promove a hidratação das partículas de cimento que ainda não haviam se hidratado, acelerando as reações cimentícias e, conseqüentemente, aumentando a resistência do material. Além disso, SOUZA et al. (2021) complementa que a exposição das amostras a uma temperatura de $71 \pm 2^\circ\text{C}$ em estufa por 42

horas em cada ciclo, simulando a irradiação solar acelerada, contribui para o rápido desenvolvimento das reações pozolânicas, que geralmente são mais lentas, resultando em uma maior formação de produtos de hidratação cimentícia. Os autores explicam que, nas amostras submetidas ao processo cíclico de molhagem e secagem, o hidróxido de cálcio (CH) gerado pela hidratação do cimento reage com a sílica e a alumina presentes no solo, resultando na formação de hidratos adicionais de silicato de cálcio (CSH) e silicato de aluminato de cálcio (CASH), que são compostos cimentícios mais fortes que o CH e responsáveis pelo aumento da resistência mecânica.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou o aproveitamento de materiais alternativos, como solo eólico, sílica de casca de arroz (SCA) e fibras vegetais de capimannoni, com a adição de cimento como estabilizante na mistura, para a fabricação de tijolos ecológicos vazados. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões são apresentadas:

- O solo eólico apresenta uma granulometria muito uniforme, com um coeficiente de uniformidade de 2,67. Pela classificação SUCS, o mesmo é definido como uma areia média mal graduada (SP). Além disso, o solo possui um elevado teor de quartzo, caracterizado por conter 86,6% de dióxido de silício (SiO₂). Diante dessas características, conclui-se que o solo eólico exibe propriedades típicas de areia, tornando-o adequado para aplicação na fabricação de tijolos ecológicos vazados.
- Dentre as dosagens da mistura de solo eólico, cimento e sílica da casca de arroz (SCA) compactadas em corpos de prova cilíndricos sob energia Proctor Normal (T80-0-20, T80-5-15, T80-10-10, T80-15-5 e T80-20-0), a exceção da dosagem T80-0-20 (composta por 80% de solo eólico, 0% de cimento e 20% de SCA), as demais apresentaram resistência à compressão superior a 2,0 MPa. Em relação ao teor de umidade, a maior parte das dosagens demonstraram desempenhos de resistência mais elevados na margem do ramo seco, próximo ao ápice da curva de compactação. Diante dos resultados obtidos, as dosagens T80-0-20 e T80-20-0 foram descartadas pois a primeira não atendeu o requisito mínimo de resistência à compressão, e a segunda apresentou elevado teor de cimento na mistura. Com isso, as dosagens T80-5-15, T80-10-10 e T80-15-5 foram selecionadas para a confecção de tijolos ecológicos vazados, juntamente com os seus respectivos teores de umidade que apresentaram melhores desempenhos de resistência à compressão.
- Após a análise do teor e do comprimento das fibras vegetais de capimannoni, verificou-se que a adição de 0,15% em peso com comprimento de 2,5 cm, garantiram a homogeneidade e a compactação adequada na mistura solo eólico-cimento-sílica de casca de arroz-fibra de capimannoni, resultado essencial para otimizar o desempenho mecânico dos tijolos. É importante ressaltar que, em virtude do formato vazado dos tijolos, a utilização de teores elevados de fibras pode comprometer a resistência à compressão, podendo gerar descontinuidades na matriz do material, reduzindo a coesão interna e dificultando a compactação eficaz da mistura.
- As análises de microscopia estereoscópica e eletrônica de varredura, juntamente com os testes de resistência à compressão simples aplicados aos tijolos vazados,

demonstraram que o tratamento com soda cáustica (NaOH) sob concentração diluída em 6%, resultou nas maiores modificações e aumento da rugosidade na estrutura das fibras, o que favoreceu significativamente o ganho de resistência à compressão dos tijolos vazados, isso, devido à ancoragem e à aderência exercidas pelas fibras à matriz de solo eólico-cimento-SCA.

- O molde projetado e confeccionado para a fabricação de tijolos ecológicos vazados, demonstrou ser eficiente e funcional, além de possibilitar a produção de lotes de tijolos uniformes e de boa qualidade estética.
- Os testes de absorção de água aplicados aos tijolos que continham fibras vegetais de capimannoni mostraram valores superiores, quando comparados aos tijolos que não continham fibras. Essa diferença pode ser atribuída ao aumento da porosidade do material, que é uma consequência direta da adição das fibras. Apesar desse aumento na absorção de água, é importante ressaltar que todas as dosagens aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados, incluindo T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F, apresentaram valores de absorção de água abaixo do limite máximo estabelecido pela norma ABNT NBR 8491 (2012), que permite uma absorção média de água de até 20%.
- Entre as dosagens finais aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados, que incluem T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F, apenas a dosagem T80-5-15-SF não atingiu a média de resistência à compressão mínima de 2,0 MPa, conforme exigido pela normativa ABNT NBR 8491 (2012). As demais dosagens apresentaram médias de resistência superiores a esse limite, com nenhum valor individual abaixo de 1,7 MPa. O melhor desempenho no ensaio de compressão foi registrado para a dosagem T80-15-5-SF, que consiste em 80% de solo eólico, 15% de cimento, 5% de sílica da casca de arroz e não contém fibras, alcançando uma média de 3,48 MPa.
- O melhor desempenho observado no ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos foi alcançado pelos tijolos vazados da dosagem T79,85-15-5-0,15F, constituído pelos componentes sólidos de 79,85% de solo eólico, 15% de cimento, 5% de sílica da casca de arroz (SCA) e 0,15% de fibras de capimannoni, resultando em uma resistência média de 1,72 MPa. Além disso, as dosagens T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F e T80-15-5-SF, se comparadas aos resultados obtidos por outros autores, também apresentaram valores médios de resistência à tração superiores a 1,0 MPa, evidenciando um desempenho satisfatório. Em contraste, a dosagem T80-5-15-SF apresentou um valor médio inferior, com resistência à tração de 0,67 MPa.

- As fibras vegetais de capim *annoni* contribuíram para a melhoria da ductilidade dos tijolos vazados. Essa melhoria, se comparada com os tijolos sem fibra, foi evidenciada pelo aumento da tensão de tração e pelo maior deslocamento observado durante a ruptura dos tijolos. Além disso, os tijolos com adição de fibras (T79,85-10-10-0,15F e T79,85-15-5-0,15F) desenvolveram fissuras de maneira mais tardia ao longo do tempo do ensaio, em comparação com as que não continham fibras (T80-10-10-SF e T80-15-5-SF). Essa característica é crucial, pois evita falhas bruscas e frágeis, contribuindo assim para uma maior ductilidade do material.
- A utilização da sílica da casca de arroz (SCA) permitiu reduzir o consumo de cimento nas misturas com solo eólico testadas em corpos de prova cilíndricos e em tijolos vazados. Embora a SCA não tenha proporcionado um aumento na resistência à compressão, ela apresentou bom desempenho como material alternativo na fabricação de tijolos ecológicos vazados, podendo ser utilizada em até 10% da proporção em peso da mistura total como substituto ao cimento, sem comprometer significativamente o desempenho mecânico.
- Para todas as dosagens aplicadas na fabricação dos tijolos ecológicos vazados (T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F), a perda de massa após o ensaio de durabilidade foi inferior a 6%. Esse resultado indica uma boa resistência à ação de ciclos de umidade, refletindo positivamente na durabilidade desses materiais em condições ambientais variáveis. Portanto, devido à capacidade de manter a integridade estrutural sob tais condições, sugere-se que os tijolos ecológicos vazados, com e sem a adição de fibras vegetais de capim *annoni*, são adequados para aplicações em ambientes sujeitos a variações de umidade.
- Todas as dosagens aplicadas aos tijolos vazados (T80-5-15-SF, T80-10-10-SF, T79,85-10-10-0,15F, T80-15-5-SF e T79,85-15-5-0,15F) analisadas no ensaio de resistência à compressão, após serem submetidas aos ciclos de molhagem e secagem, mostraram um aumento na resistência em relação aos tijolos que não passaram por esses ciclos. Esse resultado indica que o processo de cura por imersão em água, seguido de secagem em estufa, promoveu um envelhecimento acelerado dos tijolos, intensificando as reações de hidratação do cimento e, conseqüentemente, favorecendo o ganho de resistência, resultando em tijolos com melhor desempenho mecânico.
- Com base nos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão em três pontos, os tijolos vazados da mistura solo eólico-cimento-sílica de casca de arroz-fibras de capim *annoni*, que apresentaram melhores desempenhos mecânicos foram aqueles constituídos pelas dosagens T79,85-15-5-0,15F e T80-15-5-SF. Diante desses

resultados, conclui-se que essas dosagens são recomendadas para a fabricação de tijolos ecológicos vazados.

- Os tijolos ecológicos vazados com adição de fibras vegetais de capimannoni mostram-se adequados para uso em edificações unifamiliares, tanto em áreas rurais quanto urbanas. Sua aplicação é especialmente recomendada como parte das estruturas nas áreas de verga e contra-verga, onde, ao utilizar tijolos nessa região, é necessário que eles sejam capazes de suportar os esforços de tração e transferir esses esforços para as paredes, evitando a formação de fissuras de assentamento nas extremidades das esquadrias, garantindo assim a integridade estrutural das construções.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através das análises dos resultados dessa pesquisa, seguem algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Realizar análises do comportamento mecânico dos tijolos ecológicos vazados, com e sem a incorporação de fibras vegetais de capimannoni, em idades de cura mais avançadas, visando verificar o desempenho dos tijolos ao longo do tempo.
- Avaliar outros teores de fibras vegetais de capimannoni aos 28 dias de cura, visto que os teores de 0,25% e 0,50% não apresentaram desempenho satisfatório de resistência à compressão aos 7 dias de cura; entretanto, seria adequado verificar o desempenho desses teores ao longo do tempo.
- Analisar a incorporação de teores mais elevados de fibras vegetais de capimannoni (0,25% e 0,50%) na resistência à tração na flexão em 3 pontos e comparar os resultados obtidos com os resultados deste trabalho.
- Examinar a incorporação de fibras vegetais de capimannoni em substituição ao percentual de cimento Portland e comparar os resultados com os obtidos neste trabalho.
- Avaliar outro método de cura nos tijolos ecológicos vazados, como o método por imersão-secagem, e comparar com os resultados obtidos.
- Verificar a incorporação de 0,15% de fibras vegetais de capimannoni na dosagem T80-5-15-SF e analisar o desempenho no ensaio de tração na flexão em 3 pontos.
- Avaliar a durabilidade dos tijolos ao longo do tempo, com métodos que simulem a aplicação real dos tijolos, por meio de protótipos de edificações.
- Examinar o efeito da condutividade térmica dos tijolos ecológicos vazados e comparar os resultados em relação à presença ou ausência de fibras de capimannoni, buscando analisar o desempenho térmico das edificações.

Referências

- ABIIOGLI, H.; HAMIDI, A. A constitutive model for evaluation of mechanical behavior of fiber-reinforced cemented sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 11, n. 2, p. 349–360, 2019. ISSN 1674-7755. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518302269>.
- ABNT NBR 10833. *Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento*. [S.l.], 2012.
- ABNT NBR 12023. *Solo-cimento – Ensaio de compactação*. [S.l.], 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 12025. *Solo-cimento – Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio*. [S.l.], 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 12253. *Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento – Procedimento*. [S.l.], 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 13554. *Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio*. [S.l.], 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4, 8 mm-determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. *Rio de Janeiro, RJ*, 2016.
- ABNT NBR 6459. *Solo – Determinação do limite de liquidez*. [S.l.], 2016.
- ABNT NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. [S.l.], 2016.
- ABNT NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. [S.l.], 2016.
- ABNT NBR 7182. *Solo – Ensaio de compactação*. [S.l.], 2016. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT NBR 8491. *Tijolo de solo-cimento - Requisitos*. *Rio de Janeiro*. [S.l.], 2012. 0–8 p.
- ABNT NBR 8492. *Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio*. *Rio de Janeiro*. [S.l.], 2012.
- ABU SEIF, E. S. S.; SONBUL, A. R. Geotechnical performance of sandy bricks made with fine aggregates of sand dunes, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, *Arabian Journal of Geosciences*, v. 12, n. 5, 2019. ISSN 18667538.
- ABU SEIF, E.-S. S. et al. Experimental study on the utilization of dune sands as a construction material in the area between jeddah and mecca, western saudi arabia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer, v. 75, p. 1007–1022, 2016.

AL-AGHBARI, M. Y.; DUTTA, R. K. Suitability of desert sand cement mixes for base courses in highway pavements. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 10 D, 2005. ISSN 10893032.

AL-TAIE, A. J.; AL-SHAKARCHI, Y. J.; MOHAMMED, A. A. Investigation of Geotechnical Specifications of Sand Dune Soil: a Case Study Around Baiji in Iraq. *IJUM Engineering Journal*, v. 14, n. 2, 2013. ISSN 1511-788X.

ALKARNI, A.; ELKHOLY, S. M. Improving Geotechnical Properties of Dune Sands through Cement Stabilization. *Journal of Engineering and Computer Sciences*, v. 5, n. 1, p. 1–19, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285884574>.

ALSHUHAIL, K. et al. Enhancing the performance of compressed soil bricks with natural additives: Wood chips and date palm fibers. *Construction and Building Materials*, v. 295, p. 123611, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821013714>.

ALVAREZ, V. A.; VÁZQUEZ, A. Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of materbi-y/sisal fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 37, n. 10, p. 1672–1680, 2006. ISSN 1359-835X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X05003921>.

AMADO, J. L. M.; REIS, M. E. d. P. Análise do comportamento mecânico de compósito reforçado com fibra de piaçava. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

AMARAL, M. C.; HOLANDA, J. N. F. de. Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento. *Conhecendo Online*, v. 1, n. 1, 2014.

ANDREOLA, F. et al. Rice husk ash (rha) recycling in brick manufacture: effects on physical and microstructural properties. *Waste and Biomass Valorization*, Springer, v. 9, p. 2529–2539, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Guia básico de utilização do Cimento Portland*. [S.l.], 2002.

ASTM C67. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*. 2014.

ASTM D-2487. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. [S.l.], 2017. ASTM International.

AYMERICH, F. et al. Fracture behaviour of a fibre reinforced earthen material under static and impact flexural loading. *Construction and Building Materials*, v. 109, p. 109–119, 2016. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816300460>.

AZEVEDO, A. R. de et al. Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. *Journal of Building Engineering*, v. 33, p. 101675, 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220307841>.

AZOLIM, G. E. *Influência do lodo de estação de tratamento de água nas propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias fabricadas com cinza da casca de arroz*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Pampa, 2022.

BARMAN, D.; DASH, S. K. Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 4, p. 1319–1342, 2022. ISSN 1674-7755. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522000658>.

BOLDRINI. A flora dos campos do rio grande do sul. *Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade*, Ministério do Meio Ambiente, p. 63–77, 2009.

BOUCHEFRA, I. et al. Mechanical and thermophysical properties of compressed earth brick reinforced by raw and treated doum fibers. *Construction and Building Materials*, v. 318, p. 126031, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821037636>.

CAMPAGNOLO, L. B. *Aplicação de solo eólico para construção de tijolos maciços*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pampa, 2022.

CAMPOS, R. F. F.; WEBER, E.; BORGA, T. Análise da eficiência do tijolo ecológico solo-cimento na construção civil. *IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação*, 2017.

CARDOSO, C. V. *Estudo da utilização de tratamento polimérico com sílica de casca de arroz no comportamento à tração direta e aderência da fibra de sisal em compósitos cimentícios*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pampa, 2017.

CARVALHO, R. S. d. S. et al. Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2019.

CELESTINO, A. C. et al. Análise da influência da adição de fibra de coco nas características físicas do solo. *Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE*, v. 8, n. 1, p. 38–56, 2023.

CHAO-LUNG, H.; ANH-TUAN, B. L.; CHUN-TSUN, C. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 9, p. 3768–3772, 2011. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811001498>.

COCCO, G. et al. Estudo de aderência da fibra do capimannoni tratada quimicamente como reforço para compósitos cimentícios. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 9, n. 2, 2017.

Companhia Riograndense de Saneamento. *Manual de Qualidade da Água Distribuída - Alegrete-RS*. [S.l.], 2023. Informações internas da empresa. Disponível em: [⟨https://www.corsan.com.br/indicadores-de-qualidade-da-agua-distribuida⟩](https://www.corsan.com.br/indicadores-de-qualidade-da-agua-distribuida).

CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. *Materials and structures*, Springer, v. 42, p. 983–992, 2009.

DANSO BRETT MARTINSON, M. A. H.; MANT, C. Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review. *Building Research & Information*, Routledge, v. 43, n. 2, p. 253–262, 2015. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1080/09613218.2014.933293⟩](https://doi.org/10.1080/09613218.2014.933293).

DAS, S. K. et al. Characterization and utilization of rice husk ash (rha) in fly ash – blast furnace slag based geopolymer concrete for sustainable future. *Materials Today: Proceedings*, v. 33, p. 5162–5167, 2020. ISSN 2214-7853. 2nd International Conference on Processing and Characterization of Materials. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320316606⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320316606).

DINESH, A. et al. Evaluation of the readiness of clay bricks with partially replaced rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323037781⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323037781).

DONKOR, P.; OBONYO, E. Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers. *Materials Design*, v. 83, p. 813–819, 2015. ISSN 0264-1275. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515003676⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515003676).

DONKOR, P.; OBONYO, E. Compressed soil blocks: Influence of fibers on flexural properties and failure mechanism. *Construction and Building Materials*, v. 121, p. 25–33, 2016. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816308959⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816308959).

DULAL, P. et al. Engineering properties of cement-stabilized compressed earth bricks. *Journal of Building Engineering*, v. 77, p. 107453, 2023. ISSN 2352-7102. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223016339⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223016339).

FARIAS, N. M. et al. O aproveitamento da casca de arroz para a produção de cinza e sua contribuição para um meio mais sustentável. *Revista Master-Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 9, n. 17, 2024.

FERREIRA, T. D. T. E. *DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO E PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE TIJOLOS E MINI-PAINÉIS DE TERRA CRUA TRATADA COM ADITIVOS QUÍMICOS*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2003.

FRANÇA, B. R. et al. Durability of soil-cement blocks with the incorporation of limestone residues from the processing of marble. *Materials Research*, ABM, ABC, ABPol, v. 21, p. e20171118, 2018. ISSN 1516-1439. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1118⟩](https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1118).

GARCEZ, N. D. N. et al. ESTUDO DE IMPERMEABILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CAPIM ANNONI VISANDO A SUA APLICABILIDADE COMO MATERIAL DE REFORÇO EM EDIFICAÇÕES RURAIS. 2022.

GHRIEB, A.; MITICHE-KETTAB, R.; BALI, A. Stabilization and utilization of dune sand in road engineering. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 39, n. 3, p. 1517–1529, 2012. ISSN 21914281.

GOMES, C. M.; MARTON, L. F. Concreto de Cimento Portland Tipo III e Sílica Da Casca Do Arroz (SCA). *Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto*, n. 1, p. 1–10, 2015.

GONZÁLEZ, Y. V. Influência da biomineralização nas propriedades físico-mecânicas de um perfil de solo tropical afetado. *Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental*, 2011.

GRANDE, F. M. Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa. p. 148, 2003. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-07072003-160408/pt-br.php>.

GUALBERTO, S. L. et al. Tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato para aprimoramento das propriedades dos compósitos de fibrocimento. Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

HE, J. et al. Recent development on optimization of bio-cementation for soil stabilization and wind erosion control. p. 100022, 2023. ISSN 2949-9291. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949929123000220>.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: Pearson Educación, 2010.

HOSSAIN, S. S.; ROY, P. Waste rice husk ash derived sol: A potential binder in high alumina refractory castables as a replacement of hydraulic binder. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 817, p. 152806, 2020. ISSN 0925-8388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838819340526>.

JANK, D. d. M. *Correlação de imagens digitais em ensaios de prismas de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos de paredes maciças*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pampa, 2021.

JUNGES, L. B. et al. Análise da adição de fibras vegetais de capim annoni em misturas asfálticas. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 6, p. e7948–e7948, 2024.

KETOV, A. et al. Recycling of rice husks ash for the preparation of resistant, lightweight and environment-friendly fired bricks. *Construction and Building Materials*, v. 302, p. 124385, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821021437>.

KONGKAJUN, N. et al. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. *Case Studies in Construction Materials*, v. 13, p. e00448, 2020. ISSN 2214-5095. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509520301200>.

LATHA, A. T.; MURUGESAN, B.; THOMAS, B. S. Compressed earth block reinforced with sisal fiber and stabilized with cement: Manual compaction procedure and influence of addition on mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323022745>.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 664–669, 2015. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815301823>.

LIMA, R.; NEVES, G.; CARVALHO, J. Durability of soil-cement bricks produced with granite cutting waste. *Revista Eletronica de Materiais e Processos*, v. 5, n. 2, p. 24–31, 2010.

LOPES, W. G. R. *Solo-cimento reforçado com bambu: características físico mecânicas*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia . . . , 2002.

LOPEZ-QUEROL, S. et al. Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand. *Construction and Building Materials*, v. 153, p. 374–384, 2017. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817314666>.

LUO, F. J. et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 131–137, 2013. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813003930>.

MAKUSA, G. P. Soil stabilization methods and materials in engineering practice : State of the art review. In: . [S.l.: s.n.], 2013.

MARANGON, E. et al. Mortars produced with an environmentally sustainable rice husk silica: Rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, p. 125561, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620356079>.

MARANGON, E. et al. Pozzolanic Activity of Rice Husk Silica Produced By Combustion in Fluidized Bed. *Annals of the 55th Brazilian congress of concrete CBC2013.*, n. 1, p. 1–10, 2013.

MEDEIROS, R. B.; FOCHT, T. Invasão, prevenção, controle e utilização do capim-annoni-2 (eragrostis plana nees) no rio grande do sul, brasil. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v. 13, n. 1/2, p. 105–114, 2007.

MEICHTRY, R. S. *Avaliação da resistência de aderência ao cisalhamento de prismas de tijolos cerâmicos maciços moldados com argamassa “eco-friendly” com adição de fibras de polipropileno*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pampa, 2023.

MENDONÇA, L. C. *Estudo da resistência de aderência de argamassas com substituição parcial de Cimento Portland por sílica da casca de arroz em prismas de tijolos maciços*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Pampa, 2022.

MILANI, A. P. d. S. Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz. *Campinas, SP: UNICAMP [sn]*, 2005.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. *Engenharia Agrícola*, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p. 1–10, Jan 2006. ISSN 0100-6916. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100001⟩](https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100001).

MILANI, D. M. et al. Aplicabilidade da dosagem físico-química na estabilização de misturas solo-cimento para diferentes solos. 2020.

MOREL, J.; PKLA, A. A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the ‘3 points bending test’. *Construction and Building Materials*, v. 16, n. 5, p. 303–310, 2002. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000235⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000235).

MOSTAFA, M.; UDDIN, N. Effect of banana fibers on the compressive and flexural strength of compressed earth blocks. *Buildings*, v. 5, n. 1, p. 282–296, 2015. ISSN 2075-5309. Disponível em: [⟨https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/282⟩](https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/282).

MOTA, J. D. et al. Utilização do resíduo proveniente do desdobramento de rochas ornamentais na confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento. *2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólido*. João Pessoa, 2010.

MOTTA, J. C. S. S. et al. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. *e-xacta*, v. 7, n. 1, p. 13–26, 2014.

MOUIH, K. et al. Valorization of phosphate waste rocks for the production of compressed stabilized earth bricks using cement stabilizer. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532301266X⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532301266X).

MOURÃO, A. B. et al. Utilização de sílica de casca de arroz em argamassas em substituição parcial do cimento portland. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 2, n. 1, 2024.

MSINJILI, N. S. et al. Performance of rice husk ash blended cementitious systems with added superplasticizers. *Cement and Concrete Composites*, v. 83, p. 202–208, 2017. ISSN 0958-9465. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516304589⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516304589).

MURMU, A. L.; PATEL, A. Towards sustainable bricks production: An overview. *Construction and Building Materials*, v. 165, p. 112–125, 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300382⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818300382).

NAIR, D. G. et al. A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes. *Cement and Concrete Research*, v. 38, n. 6, p. 861–869, 2008. ISSN 0008-8846. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607002797>.

NASCIMENTO, E. S. S. et al. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. *Journal of Cleaner Production*, v. 321, p. 129002, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621031929>.

NEVES, C. O uso do solo-cimento em edificações. *A experiência do CEPED-Centro de Pesquisas e Desenvolvimento*. Disponível em: <http://www.cricyt.edu.ar/secprensa/siacot/cdenlinea/ponencias/comision4/Neves>, v. 2, 2003.

NIYOMUKIZA, J. B. et al. Enhancing properties of unfired clay bricks using palm fronds and palm seeds. *Results in Engineering*, v. 16, p. 100632, 2022. ISSN 2590-1230. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022003024>.

OJO, E. B. et al. Effects of fibre reinforcements on properties of extruded alkali activated earthen building materials. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116778, 2019. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819321968>.

OLIVEIRA, L. L. d. Estudo da fibra natural do capimannoni como elemento de reforço em matriz cimentícia. Universidade Federal do Pampa, 2016.

OLIVEIRA, R. F. V. d. Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos. 2011.

PADMALOSAN, P. et al. An investigation on the use of waste materials from industrial processes in clay brick production. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323003280>.

PADOIN, D. G. et al. Sílica proveniente da queima da casca de arroz utilizada como substituto parcial do cimento no concreto autoadensável. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 11, n. 3, p. 195–214, 2022.

PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. *Solos arenosos do Bioma Pampa brasileiro*. [S.l.]: Editora UFSM, 2019.

PEREIRA, H. L. B. *Análise da frente de carbonatação natural em concretos à base de cimentos Portland CP IV-32 RS e CP V-ARI RS*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

PEREIRA, K. L. d. A. *Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

POLETANOVIC, B. et al. Influence of the naoh-treated hemp fibres on the properties of fly-ash based alkali-activated mortars prior and after wet/dry cycles. *Construction and Building Materials*, v. 309, p. 125072, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821028178>.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*, v. 1652, n. 1, p. 215–227, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1652-28>.

PUPPALA, A. J. Advances in ground modification with chemical additives: From theory to practice. *Transportation Geotechnics*, v. 9, p. 123–138, 2016. ISSN 2214-3912. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221439121630040X>.

R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RABELLO, L. G. et al. Produção de tijolos ecológicos contendo vermiculita e poliuretano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 15., 2019, BENTO GONÇALVES, RS. ANAIS [...]. [S.l.], 2019.

REBELLO, N.; DEEKSHITHA, K.; SHETTY, S. Hydraulically manufactured cement and fly ash stabilized compressed soil block. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323024094>.

RIBEIRO, D.; NÉRI, R.; CARDOSO, R. Influence of water content in the ucs of soil-cement mixtures for different cement dosages. *Procedia Engineering*, v. 143, p. 59–66, 2016. ISSN 1877-7058. Advances in Transportation Geotechnics III. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816304465>.

ROCHA, J. H. A. et al. Physical-mechanical assessment for soil-cement blocks including rice husk ash. *Case Studies in Construction Materials*, v. 14, p. e00548, 2021. ISSN 2214-5095. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521000632>.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (eta) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. *Cerâmica*, Associação Brasileira de Cerâmica, v. 59, n. 352, p. 551–556, Oct 2013. ISSN 0366-6913. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000400010>.

RODRIGUES, V. T. et al. Estudo preliminar sobre o uso da casca de arroz na construção civil: Preliminary study on the use of rice hunk in civil construction. *Brazilian Journal of Business*, v. 6, n. 1, p. 390–399, 2024.

ROMERO, A. B. C.; FRANCISCA, F. M.; GIOMI, I. Hygrothermal properties of soil-cement construction materials. *Construction and Building Materials*, v. 313, p. 125518, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821032566>.

SANTOS, A. D. et al. Utilização de resíduos da construção civil em tijolos ecológicos. *Trabalho Interdisciplinar, Administração da Produção II. Associação do Vale do Itajaí Mirim*, 2009.

SEGANTINI, A. A. da S. *Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira-SP*. Tese (Doutorado) — [sn], 2000.

SHAH LI JING, Z. M. F. Y. S. Y. M. U. F. I.; KANJANA, N. A review on chemical modification by using sodium hydroxide (naoh) to investigate the mechanical properties of sisal, coir and hemp fiber reinforced concrete composites. *Journal of Natural Fibers*, Taylor & Francis, v. 19, n. 13, p. 5133–5151, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1875359>.

SHALABI, F. I. et al. Evaluating the effect of cement and arg fiber on the mechanical and microstructural properties of dune sand. *Advances in Civil Engineering*, v. 2024, n. 1, p. 5538831, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2024/5538831>.

SHOOSH PASHA, I.; SHIRVANI, R. A. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. *Geomechanics and Engineering*, v. 8, n. 1, p. 17–31, 2015. ISSN 20926219.

SILVEIRA, M. V. *Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio . . . , 2018.

SOUZA, J. M. de et al. Mechanical and durability properties of compressed stabilized earth brick produced with cassava wastewater. *Journal of Building Engineering*, v. 44, p. 103290, 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221011487>.

SOUZA, M. I.; SEGANTINI, A. A.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 12, p. 205–212, 2008.

SOUZA, P. C. et al. Study for the incorporation of wood ash in soil-cement brick. *Cerâmica*, Associação Brasileira de Cerâmica, v. 68, n. 385, p. 38–45, Jan 2022. ISSN 0366-6913. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853052>.

STANISLAS, T. T. et al. Multivariate regression approaches to predict the flexural performance of cellulose fibre reinforced extruded earth bricks for sustainable buildings. *Cleaner Materials*, v. 7, p. 100180, 2023. ISSN 2772-3976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397623000138>.

STOCHERO, N. et al. Development of refractory ceramics from residual silica derived from rice husk ash and steel fibres. *Ceramics International*, v. 43, n. 16, p. 13875–13880, 2017. ISSN 0272-8842. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884217315419>.

SUERTEGARAY, D. M. A. Erosão nos campos sulinos: arenização no sudoeste do rio grande do sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2011.

- SUJATHA, E. R.; DEVI, S. S. Reinforced soil blocks: Viable option for low cost building units. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 1124–1133, 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818322554⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818322554).
- SUJATHA, E. R.; MAHALAKSHMI, S.; KANNAN, G. Potential of fibre reinforced and cement stabilized fibre reinforced soil blocks as sustainable building units. *Journal of Building Engineering*, v. 78, p. 107733, 2023. ISSN 2352-7102. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223019137⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223019137).
- TAALLAH, B.; GUETTALA, A. The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, v. 104, p. 52–62, 2016. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306802⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815306802).
- TAYEH, B. A. et al. Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 312, p. 127734, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621019521⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621019521).
- TEIXEIRA, F. P. et al. Propriedades tecnológicas do tijolo solo-cimento vazado de 2 furos. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, ABM-Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 18, p. 0–0, 2021.
- THANUSHAN, K.; SATHIPARAN, N. Mechanical performance and durability of banana fibre and coconut coir reinforced cement stabilized soil blocks. *Materialia*, v. 21, p. 101309, 2022. ISSN 2589-1529. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152921003112⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152921003112).
- THENNARASAN LATHA, A.; MURUGESAN, B. Compressed stabilised earth block synergistically valorising municipal solid waste incinerator bottom ash and sisal fiber: Strength, durability and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, v. 441, p. 137514, 2024. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824026564⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061824026564).
- TIWARI; SHARMA; YADAV, U. Behaviour of dune sand and its stabilization techniques. *Pdfs.Semanticscholar.Org*, n. February, 2016. Disponível em: [⟨https://pdfs.semanticscholar.org/cead/8301a8fd2d389465660d43899cee9b979d64.pdf⟩](https://pdfs.semanticscholar.org/cead/8301a8fd2d389465660d43899cee9b979d64.pdf).
- TUAN, N. V. et al. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 25, n. 4, p. 2030–2035, 2011.
- VILELA, A. P. et al. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. *Construction and Building Materials*, v. 262, p. 120883, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820328889⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820328889).
- WALKER, P. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, v. 17, n. 4, p. 301–310, 1995. ISSN 0958-9465. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946595000199⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946595000199).

XIAO, Y. et al. Experimental studies on compressive and tensile strength of cement-stabilized soil reinforced with rice husks and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, v. 344, p. 128242, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822019055⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822019055).

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials – a review. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 643–655, 2013. ISSN 0950-0618. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813004418⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813004418).