

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

APLICAÇÃO DE SOLO EÓLICO PARA CONSTRUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS

**Alegrete
2022**

LUCIÉLE BILHALVA CAMPAGNOLO

APLICAÇÃO DE SOLO EÓLICO PARA CONSTRUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharela em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Coorientador: Prof. Dr. José Gabriel Vieira Neto

**Alegrete
2022**

LUCIÉLE BILHALVA COMPAGNOLO

APLICAÇÃO DE SOLO EÓLICO PARA CONSTRUÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Agrícola.

Trabalho defendido e aprovado em: 15 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Diego Arthur Hartmann
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. José Gabriel Vieira Neto
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos
(UFG)

Assinado eletronicamente por **JOSE GABRIEL VIEIRA NETO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR,**



em 16/03/2022, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/03/2022, às 14:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/03/2022, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Eder Carlos Guedes dos Santos, Usuário Externo**, em 16/03/2022, às 15:13, 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 **0755650** e o código CRC **F83427B7**.

Dedico esse trabalho aos meus familiares, em especial meu amor, meu maior incentivador e companheiro de todas as horas Roberto, minha mãe Fátima e a meu amado pai Luiz (*in memoriam*).....

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pampa, por me proporcionar cursar esta graduação.

Ao meu orientador prof. Wilber, por todo o auxílio nestes anos de pesquisa e, principalmente, por estar sempre disposto a ajudar, não medindo esforços para me auxiliar nesta conquista, por todo o apoio, incentivo, troca de experiências e contribuições que foram valiosas para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico. Obrigada por sempre elogiar meu esforço, saiba que o sr. me inspira e me motiva. Além de tudo, gostaria de reforçar o agradecimento por todos os sábados que foste me ajudar na confecção dos tijolos, serei para sempre grata!

Ao meu companheiro de vida, parceiro de todas as horas Roberto Rezende. Obrigada, mil vezes obrigada por segurar a minha mão, consolar meus choros, me apoiar e me incentivar. Em todos os momentos tu foste muito importante, sem teu apoio eu jamais conseguiria. Obrigada por sempre confiar no meu potencial até quando eu mesma desconfio, sempre me encoraja e me faz ter forças para ser capaz de tudo. Além disso, obrigada por me proporcionar a família que sempre sonhei, com nossos filhos caninos Cacau, Luna e Ted, sempre faço o meu melhor por vocês, pelo carinho, amor e “lambeijos” que recebo de vocês.

À minha mãe Fátima, serei sempre grata por todo o apoio e carinho, por estar sempre torcendo por mim e por não medir esforços para me ajudar, auxiliando até na execução dos ensaios. Obrigada mãe, me inspiro muito em ti minha quase engenheira, tua força me motiva.

Ao meu amado pai Luiz (*in memoriam*), tu foste meu maior exemplo, herdei de ti o amor pela agricultura e, como tu queria, agora serei engenheira, não desisti e te dedico todo meu esforço. No decorrer do curso não foi fácil, muitas matérias me lembravam as coisas que tu gostavas pai, ao término de algumas aulas chorava muito de saudade e, infelizmente, não pude trocar minhas experiências contigo, mas em pensamento, compartilhamos.

Aos técnicos de laboratório da UNIPAMPA, por todo o auxílio durante a execução dos ensaios, em especial ao Cléber Milani, John Pablo Lima Cornélio, Diogo Silveira, Marcelo Dias, Raquel Machado e Juliano Duarte. Também, gostaria de deixar meu agradecimento aos motoristas da UNIPAMPA, em especial, seu Adriel, por nunca medir esforços para ajudar nas coletas de solo.

Aos docentes do curso, obrigada pelas contribuições durante a graduação, carrego os ensinamentos de vocês com muito apreço e carinho, muito obrigada.

Agradeço imensamente a minha amiga, parceira, companheira de todas as horas Luziele de Oliveira, que nunca me deixou sozinha e sempre fez tudo para me ajudar. Obrigada pelo apoio nos momentos em que mais precisei, pelo teu carinho, companheirismo, por ter me

ajudado tanto na vida pessoal quanto na acadêmica. Mil vezes obrigada pela ajuda na confecção do molde e, principalmente, na moldagem dos tijolos, serei eternamente grata, jamais vou me esquecer e espero um dia poder retribuir tudo que tu fizeste por mim.

À Metalúrgica do Zé, seu Zé juntamente com seus funcionários e família, vocês foram essenciais durante a confecção do molde e execução dos ensaios, foram vários e vários sábados sem medir esforços para ajudar.

Aos colegas que me auxiliaram durante o desenvolvimento do trabalho e, principalmente, na execução dos ensaios de laboratório, em especial Luciane Arce, Rafael Azambuja, Filipe Almeida, Marcelo Chuquel, Stefani Refatti e Natália Garcez. Agradecimento especial à minha amiga Renata Severo por sempre estar disposta a me ajudar nas correções de texto e, para a colega Alessandra Machado, por me ajudar muito nas traduções.

À minha família, minhas irmãs Cláudia e Tatiana, meus sobrinhos João Vitor, Maria Eduarda, Endriel e Melissa por todo apoio e carinho durante todos os momentos.

Agradeço a todos os meus amigos(as) que de alguma forma contribuíram, não citarei nomes, mas vocês sabem que estarei sempre aqui para retribuir o carinho.

“N3o deixe que nada seja capaz de destruir seus sonhos.”
Autor desconhecido

RESUMO

O objetivo do trabalho é estudar a melhoria geotécnica de um solo eólico sob adição de cimento e sílica da casca de arroz (SCA), visando a confecção de tijolos maciços. Para isso, inicialmente realizou-se a coleta de amostras do solo eólico e, no laboratório, a execução de ensaios de caracterização geotécnica. Após isso, foi estudada a trabalhabilidade da mistura solo-cimento-SCA, nas proporções 88%-12%-0%, 80%-10%-10%, 80%-12%-8%, 85%-7,5%-7,5% e 80%-8%-12%. Dessa forma, cada uma das proporções da mistura foi submetida a ensaios de compactação dinâmica pelo método Proctor, possibilitando a confecção de corpos-de-prova cilíndricos. Após um tempo de cura foram aplicados nos corpos de prova cilíndricos testes de resistência à compressão simples. A boa adesão na moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos e os resultados de resistência à compressão simples, foram fatores determinantes na escolha de três proporções do solo-cimento-sílica da casca de arroz, a serem utilizadas na confecção de tijolos maciços, sendo de 80%-10%-10%, 80%-12%-8% e 80%-8%-12%. Os tijolos maciços foram confeccionados seguindo as orientações da NBR 8491/12 e sua moldagem ocorreu a partir de um molde metálico confeccionado nas dimensões de tijolo tipo A (20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm), em uma prensa hidráulica uniaxial industrial da marca SIWA, com capacidade de 100 toneladas. Após a moldagem, os tijolos foram alocados em local úmido, à sombra e com ciclos de molhagens para manter a umidade por um período de cura de 28 dias. Finalmente, com o intuito de certificar o aproveitamento técnico conforme exigência de normas nacionais ABNT NBR 8491/12 e 8492/12, os tijolos foram submetidos a testes de controle, tais como resistência à compressão simples e absorção de água. As três proporções (80%-10%-10%, 80%-12%-8% e 80%-8%-12%) da mistura utilizada na confecção dos tijolos maciços, atenderam as exigências das normativas supracitadas, apresentando resistência à compressão simples média maior do que 2,0 MPa e absorção de água abaixo de 20%.

Palavras-chave: Solo-cimento. Sílica da casca de arroz. Resistência à compressão simples.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the geotechnical improvement of a aeolian soil with incorporation of cement and rice husk silica (RHS), for the manufacture of solid bricks. To do this, samples of the aeolian soil were initially collected and geotechnical characterization tests were performed in the laboratory. After that, tests was carried out to evaluate the soil-cement-RHS mixture, in the proportions 88%-12%-0%, 80%-10%-10%, 80%-12%-8%, 85%-7.5%-7.5% and 80%-8%-12%. Thus, each of the proportions of the mixture was subjected to compaction tests by the Proctor method, enabling the confection of cylindrical specimens. After a curing time, compressive strength tests were applied to the cylindrical specimens. The adherence adhesion capacity in the molding of the cylindrical specimens and the results of compressive strength were determining factors in the choice of three proportions of soil-cement-silica rice husk, to be used in the manufacture of solid bricks, being 80%-10%-10%, 80%-12%-8% and 80%-8%-12%. The soils bricks were made to accordance NBR 8491/12 and their molding occurred with using a metal mold of dimensions of brick type A (20.0 cm x 10.0 cm x 5.0 cm), in an industrial hydraulic uniaxial press of SIWA, with a capacity of 100 tonnes. After, the bricks were placed in a humid place, in the shadow and with wetting cycles to maintain humidity for a curing period of 28 days. Finally, in order to evaluate the quality of the bricks as required by national standards ABNT NBR 8491/12 and 8492/12, theses were submitted to control tests, such as compressive strength tests and water absorption tests. The three proportions (80%-10%-10%, 80%-12%-8% and 80%-8%-12%) of the mixture used in the manufacture of solid bricks, met the requirements of the aforementioned standards, with an average compressive strength greater than 2.0 MPa and water absorption below 20%.

Keywords: Soil-cement. Silica of rice husk. Simple compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ocorrência de areais nos municípios do Sudoeste do Rio Grande do Sul.	20
Figura 2. Vistas parciais de três areais na região Sudoeste do Rio Grande do Sul: (A) São João (Alegrete-RS); (B) Durasnal (Alegrete-RS); (C) Manoel Viana-RS.....	21
Figura 3. Prensa manual para moldagem de tijolos maciços.....	28
Figura 4. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico (<i>Dune Sands</i>) e das amostras de agregado fino triturado (<i>Crushed Fine Aggregates</i>).....	29
Figura 5. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico de Rio Grande-RS.....	29
Figura 6. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico da Argélia.....	30
Figura 7. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico do Iraque.	31
Figura 8. Imagem de satélite da área de coleta de amostras de solo eólico.....	34
Figura 9. Vista panorâmica <i>in-situ</i> da área de coleta de amostras.....	35
Figura 10. Sílica da casca de arroz. (A): Embalagem do material; (B): Característica visual do material.	36
Figura 11. Coleta de amostras deformadas de solo eólico.	37
Figura 12. Preparo (quarteamento) das amostras de solo eólico para ensaios de caracterização.	37
Figura 13. Ensaios de caracterização geotécnica e <i>pH</i> nas amostras de solo eólico. (A): Análise granulométrica; (B): Limite de liquidez; (C) Limite de plasticidade; (D) Massa específica dos grãos; (E) Ensaio de <i>pH</i>	38
Figura 14. Mistura de solo eólico-cimento-SCA: (A) Bandejas com os materiais utilizados na mistura; (B) Mistura manual dos três materiais.....	40
Figura 15. Execução do ensaio de compactação dinâmica (com energia de Proctor Normal).41	
Figura 16. Etapas após o ensaio de compactação. (A): Extração; (B): Corpo-de-prova extraído; (C): Corpos-de-prova envoltos por papel filme.....	41
Figura 17. Ensaio de resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos.	42
Figura 18. Curva granulométrica do solo eólico estudado.	43
Figura 19. Curvas de compactação dos tratamentos T88-12, T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12.	45
Figura 20. Valores de resistência à compressão simples nos corpos-de-prova cilíndricos, correspondente aos parâmetros de compactação de cada tratamento, moldado com energia Proctor Normal (EN) e Modificada (EM).	48
Figura 21. Comportamento das curvas de resistência à compressão simples e de compactação	

Proctor Modificado para os tratamentos T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12.	49
Figura 22. Comportamento das curvas de resistência à compressão simples e de compactação Proctor Normal para os tratamentos T88-12, T80-10-10 e T80-8-12.	50
Figura 23. Molde de aço para confecção e moldagem de tijolos maciços. (A): Parte superior, forma e fundo. (B) Fundo falso; (C) e (D) Forma de moldagem com viga I; (E): Cabeçote metálico.	53
Figura 24. Prensa uniaxial industrial com capacidade de 100 toneladas utilizada para prensagem dos tijolos maciços.....	54
Figura 25. Confecção dos tijolos maciços com molde metálico no momento de prensagem. .	55
Figura 26. Estrutura para cura dos tijolos maciços. (A): Estrutura fechada, parte externa; (B): Estrutura aberta, parte interna.....	56
Figura 27. Execução do ensaio de absorção de água no laboratório: (A) Tijolos em estufa à 105 ± 2 °C; (B) Pesagem em balança de precisão; (C) Tijolos imersos em água para saturação.	57
Figura 28. Análise dimensional dos tijolos maciços.	57
Figura 29. Etapas do ensaio de resistência à compressão simples no laboratório: (A) Corte; (B) Capeamento; (C) Espessura do capeamento de até 3mm; (D) Capeamento finalizado; (E) Processo de cura; (F) Compressão simples.	58
Figura 30. Valores médios da análise de resistência à compressão simples dos tijolos correspondentes aos tratamentos T80-12-8, T80-10-10 e T80-8-12.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Requisitos do solo adequado para fabricação de elementos de solo-cimento	25
Tabela 2. Requisitos para controle da qualidade de tijolos de solo-cimento.....	26
Tabela 3. Ensaio de caracterização geotécnica, <i>pH</i> e Classificação do solo eólico.....	44
Tabela 4. Parâmetros de compactação respectivo à cada tratamento e a devida energia de compactação utilizada.....	46
Tabela 5. Valores máximos, mínimos e valores correspondentes aos parâmetros de compactação de resistência à compressão simples dos tratamentos da mistura solo eólico + cimento + sílica de casca de arroz (SCA)	47
Tabela 6. Absorção de água em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.	59
Tabela 7. Média da absorção de água em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.	60
Tabela 8. Resistência à compressão simples em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Proporções das misturas de solo eólico com estabilizantes.....	39
--	----

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

EM – Energia de compactação Proctor Modificado

EN – Energia de compactação Proctor Normal

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MPa – Mega Pascal

pH – Potencial hidrogeniônico

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

w – Teor de umidade

$w_{ót}$ – Teor de umidade ótimo

ρ_d – Massa específica seca compactada

$\rho_d \text{ máx}$ – Massa específica seca máxima compactada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo geral	17
1.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Justificativa e importância do trabalho.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Processo de arenização na região da Campanha do Rio Grande do Sul.....	19
2.2 Aproveitamento de solos eólicos em edificações	21
2.3 Confeção de tijolos ecológicos de solo-cimento.....	24
2.4 Ensaio laboratoriais.....	28
2.4.1 – Testes de caracterização em solos eólicos.....	28
2.4.2 – Testes realizados em tijolos confeccionados.....	31
3 CARACTERIZAÇÃO E MELHORIA GEOTÉCNICA EM SOLO EÓLICO SOB ADIÇÃO DE CIMENTO E SÍLICA DA CASCA DE ARROZ.....	34
3.1 Materiais utilizados.....	34
3.1.1 Solo.....	34
3.1.2 Cimento	35
3.1.3 Água.....	35
3.1.4 Sílica da casca de arroz.....	35
3.2 Coleta de amostras de solo eólico e preparação para ensaios de caracterização	36
3.2.1 Ensaio de caracterização geotécnica	37
3.2.2 Melhoramento geotécnico do solo eólico.....	39
3.2.3 Confeção e testes de resistência em corpos-de-prova cilíndricos.....	40
3.3 Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e de resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos	42
4. CONFEÇÃO DE TIJOLOS MACIÇOS DE SOLO EÓLICO-CIMENTO-SCA	52
4.1 Ensaio de absorção de água e de resistência à compressão simples	56
4.2 Resultados dos ensaios de absorção de água e resistência a compressão simples nos tijolos maciços	59
5 CONCLUSÃO.....	64
6 SUGESTÕES	66
REFERÊNCIAS.....	67

APÊNDICES	73
APÊNDICE A1 – Detalhamento digital do molde completo utilizado na confecção dos tijolos maciços.	74
APÊNDICE A2 – Detalhamento digital das laterais do molde utilizado na confecção dos tijolos maciços.	75
APÊNDICE A3 – Detalhamento digital das peças durante a moldagem do molde utilizado na confecção dos tijolos maciços.	76

1 INTRODUÇÃO

Segundo Vieira e Verdum (2015), o processo de arenização eólica tem sua ocorrência verificada na região sudoeste do Rio Grande do Sul, gerando areais sem vegetação e sem capacidade de utilização na agricultura, motivado principalmente por fatores naturais como o vento, a topografia, o clima, o relevo e intensificado pelo uso e manejo inadequado dos solos da região. Conforme destacado por Mósena (2008), pode-se dizer que os efeitos das áreas afetadas pela arenização, extrapolam os limites do ambientalismo, transformando-se em problemas socioeconômicos, implicando perdas em produção e produtividade agropecuária. Sabendo que, o setor agrícola tem importância relevante para a economia da região, ressalta-se a relevância de estudar alternativas que minimizem os efeitos negativos das áreas arenizadas.

Uma das alternativas sustentáveis que poderia reduzir os impactos negativos dos solos eólicos é viabilizar o seu aproveitamento na confecção de tijolos maciços. Conforme destaca Buriol (2002), os tijolos de solo-cimento podem ser uma alternativa econômica para uso em edificações rurais. Para isso, os solos eólicos precisam ser estabilizados, através de métodos de compactação, correção granulométrica e adição de estabilizante químico (Senço, 2001).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2000) a utilização de cimento como aditivo é a mais indicada para a estabilização de solos arenosos, pois os mesmos são estabilizados com menores quantidades de cimento. As misturas de solo-cimento podem ser complementadas com a adição de sílica da casca de arroz, que além de ter uma alta disponibilidade de extração na Região da Campanha do Rio Grande do Sul, a adição e/ou substituição do cimento Portland pela sílica da casca de arroz pode ser considerada uma solução de grande impacto sustentável (Gomes e Marton, 2015), sendo seus benefícios não somente relacionados ao processo de geração de energia alternativa, mas também à diminuição do consumo de cimento Portland e maior durabilidade dos concretos.

Sendo assim, este trabalho buscou estudar e viabilizar o aproveitamento de um solo eólico para fins de edificações rurais, focando especificamente em sua utilização na confecção de tijolos maciços.

1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo principal estudar a melhoria geotécnica de um solo eólico sob adição de cimento e sílica da casca de arroz, visando a confecção de tijolos maciços.

1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos destaca-se:

- Conhecer as propriedades geotécnicas do solo eólico, com o intuito de viabilizar o seu aproveitamento como material de construção;
- Propor traços de mistura de solo eólico sob adição de cimento e sílica da casca de arroz, objetivando a confecção de tijolos maciços, que atendam às exigências mínimas das normas técnicas da ABNT, especificamente a NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012.

1.3 Justificativa e importância do trabalho

O mérito deste trabalho é destacado pela possibilidade do aproveitamento dos solos eólicos de áreas onde o processo de arenização está avançado, gerando impactos negativos aos proprietários das terras afetadas. Sob essa percepção, o trabalho investigou o uso dos solos de locais de arenização para fins de confecção de tijolos maciços, os quais poderão ser utilizados em distintas edificações rurais. Segundo Makusa (2013), o cimento pode ser utilizado como um aditivo de estabilização química, aplicado a uma ampla variedade de solos. Segundo o autor, a reação do cimento não depende dos minerais do solo, e sim da sua reação com a água. De acordo com os estudos realizados por Ferreira (2003), a estabilização química de solo com cimento foi superior em termos de resistência à compressão simples em solos arenosos, do que em solos argilosos nas mesmas condições do estudo. Além disso, conforme destaca Amaral (2014), as misturas de solo-cimento podem ser complementadas com outros tipos de materiais, visando, assim, minimizar a quantidade de cimento e reduzir custos da construção.

Considerando que na Região da Fronteira Oeste existem indústrias dedicadas à produção e beneficiamento do arroz, podendo gerar como subproduto proveniente da queima da casca de arroz, a sílica da casca de arroz (SCA), neste trabalho, investigou-se a utilização da SCA como um material alternativo na mistura solo-cimento, isso com o intuito de diminuir a quantidade de cimento presente na mistura. Desta forma, o trabalho buscou dar subsídios técnicos para o aproveitamento da mistura de solo eólico-cimento-SCA para a confecção de tijolos maciços.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de arenização na região da Campanha do Rio Grande do Sul

Desde a década de 70, estudos apontam a problemática do processo de arenização que ocorre na região da Campanha Gaúcha, gerando extensas áreas de solo exposto e sem cobertura vegetal, visualmente formando manchas de areias (areais). Também, nessa época, foi explanado pela imprensa e considerando o processo como “desertificação” (Suertegaray, 1987). Para Binda e Verdum (2015) as áreas não devem ser tratadas como desertos nem como em processo de desertificação e, sim, como áreas de arenização, já que as médias de precipitações pluviárias são de 1.500 mm anuais. Porém, Suertegaray (1987) já defendia o termo “processo de arenização” e, explicou que o mesmo consiste no retrabalhamento de depósitos arenosos (pouco ou não consolidados), causando dificuldade de fixação da vegetação nessas áreas, devido à constante mobilidade de sedimentos e, sendo facilmente transportado pelas forças das águas e ventos. Além disso, Suertegaray et al. (2005) comentam que os areais se desenvolvem sobre unidades litomorfológicas frágeis (depósitos arenosos), em áreas com baixas altitudes e declividades.

A origem dos sedimentos arenosos está associada a geomorfologia da região da Campanha Gaúcha, que contribui para a formação dos areais, que são naturais, desenvolvendo-se a partir da degradação das rochas areníticas, através do retrabalhamento de areias derivadas dos arenitos Botucatu e Guará ou de sedimentos inconsolidados (Pedron e Dalmolin, 2019; Suertegaray, 2011).

Segundo Pedron e Dalmolin (2019), a formação Botucatu é oriunda da litificação de arenitos finos e médios de origem eólica, de coloração alternando entre vermelha, rósea e ou amarela, sua estratificação característica é cruzada, com a recorrência de dunas, arenitos aprisionados entre derramamentos vulcânicos. Ainda segundo os autores, a formação Guará é formada por arenitos quartzosos de cores esbranquiçadas devido à caulinação dos feldspatos, a sua litologia compõe-se de rochas sedimentares basicamente arenitos depositados em ambiente continental desértico, com depósitos fluviais e eólicos.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006), os solos que caracterizam as áreas de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul são os Neossolos Quartzarêncios Órticos. Conforme destaca Suertegaray (2011), são solos novos e

frágeis, pouco desenvolvidos, altamente suscetíveis à erosão hídrica e, quando expostos, à erosão eólica.

A cobertura vegetal original é caracterizada de acordo com o bioma pampa, por gramíneas de vegetação rasteira e pequenos arbustos, porém a perda de nutrientes e a mobilidade dos sedimentos, dificultam a continuidade da pedogênese e a fixação da vegetação, resultando em areais. Na Figura 1, é possível verificar a distribuição da ocorrência dos areais no Sudoeste do Rio Grande do Sul (Suertegaray, 2011).

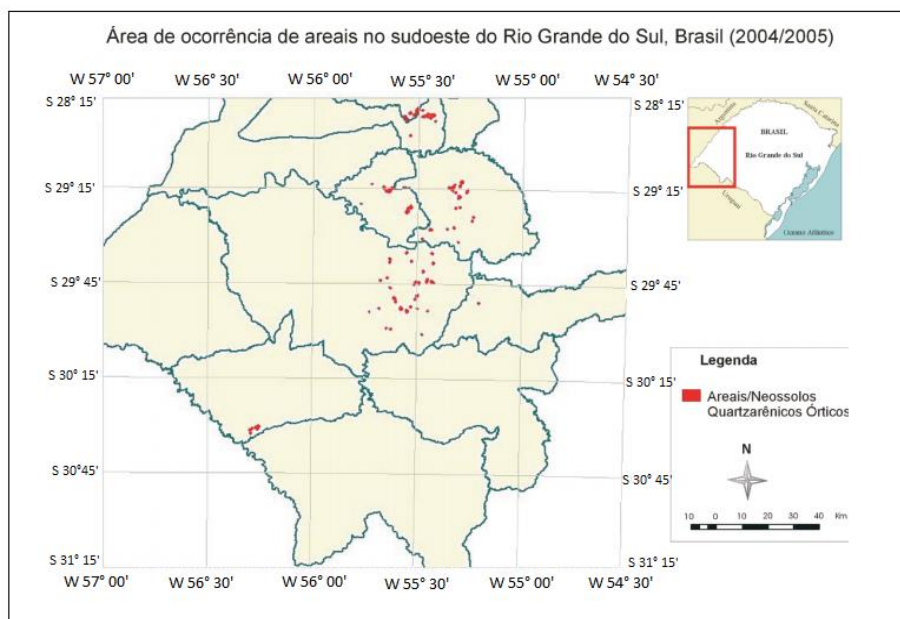


Figura 1. Ocorrência de areais nos municípios do Sudoeste do Rio Grande do Sul.

Fonte – Suertegaray (2011).

Conforme observa-se na Figura 2, os areais tornam-se visíveis na paisagem, formando superfícies totalmente arenosas, com ausência de recobrimento ou cobertura vegetal de forma contínua.



Figura 2. Vistas parciais de três areais na região Sudoeste do Rio Grande do Sul: (A) São João (Alegrete-RS); (B) Durasnal (Alegrete-RS); (C) Manoel Viana-RS.

Fonte – Campagnolo et al. (2018).

Somado ao processo geológico natural, Duarte e Filho (2005) associam ao fenômeno de arenização, às causas antrópicas devido à pecuária, através do super-pastoreio e à agricultura, através da expansão da soja e a sua consequente mecanização.

Segundo Freitas et al. (2007), a busca por soluções técnicas para estas áreas de arenização tem sido intensificada no sentido de selecionar alternativas que permitam, além de recuperar as áreas afetadas, reintegrá-las ao processo produtivo, gerando algum rendimento econômico aos proprietários. Ribeiro e Verдум (2013) comentam que, para os agricultores e pecuaristas da região, os areais dificultam a realização de atividades ligadas ao uso do solo.

2.2 Aproveitamento de solos eólicos em edificações

A literatura apresenta uma série de trabalhos que foram realizados visando a utilização de solos eólicos em edificações, tais como Al-Aghbari e Dutta (2005) que investigaram as melhorias das propriedades geotécnicas dos solos eólicos de Omã, através da estabilização com cimento (em proporções de 2%, 4%, 8%, 10% e 12% em peso seco), constatando que a resistência do solo eólico estabilizado é adequada para uso como base em pavimentos de

rodovias. Al-Aghbari et al. (2009) estudaram o aproveitamento, para uso como solo de fundação e pavimentação, das areias eólicas de Omã através da adição de aglomerantes como o cimento Portland e pó de forno de cimento; nas duas misturas foram utilizadas proporções dos aglomerantes de 2%, 4%, 8%, 10% e 12% em peso seco do solo. Tais autores verificaram que as amostras ensaiadas estavam aptas, após 28 dias de cura, para uso como suporte à edifícios de pequeno à médio porte e, quando estabilizadas com mais de 8% de cimento, como base ou sub-base de pavimentos.

Al-Karni e Elkholy (2012) estudaram o efeito da adição de cimento na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento, de solo eólico da Arábia Saudita, utilizando nas misturas diferentes proporções de cimento (5%, 7% e 9% em peso seco do solo). Os autores verificaram que o uso de cimento melhorou a resistência das areias eólicas, possibilitando a sua utilização para uso em estradas e como material de fundação. Ghrieb et al. (2012) estudaram a estabilização de um solo eólico da Argélia, por meio de um ligante hidráulico (cimento) e um corretor granular (areia de enchimento). O estudo revelou que é possível obter desempenho suficiente para utilização do solo eólico em camadas de fundação de estradas, a partir dos ensaios de resistência à compressão e à tração com a utilização de misturas que possuem 8% e 10% de cimento e, 10% a 20% de areia de enchimento.

Buscando métodos para melhoramento das propriedades geotécnicas de um solo eólico da Índia, com foco em proporcionar a utilização em rodovias, Tiwari et al. (2016), conseguiram alcançar significativos ganhos de resistência com o aumento do tempo de cura e, com a adição de cimento e cal nas misturas (solo-cimento e solo-cal). Porém, observou-se melhores desempenhos das misturas com cimento em comparação com as misturas com cal. Além disso, os autores adicionaram fibras as misturas de solo-cimento e solo-cal (proporções de fibras variando de 0,5%, 1%, 2% e 3% em relação ao peso seco do solo), proporcionando um bom comportamento dúctil, sendo benéfico para o uso em estruturas geotécnicas.

Ruver et al. (2013), avaliaram a estabilização de um solo eólico de Rio Grande/RS, a partir de misturas de solo eólico com agentes aglomerantes, tais como cimento, cal hidratada, cal hidráulica e cinza volante de carvão mineral, para utilização em obras rodoviárias. As misturas utilizadas pelos autores foram solo-cimento (com proporções de cimento de 3%, 6%, 9% e 12% em peso seco), solo-cal hidratada-cinza volante (com proporções de 72% de solo eólico e 28% de cal-cinza, com traço de cal-cinza de 1:2,33) e solo-cal hidráulica-cinza volante (com proporções de 72% de solo eólico e 28% de cal-cinza, com traço de cal-cinza de 1:3). Os resultados indicaram adequada a estabilização do solo eólico para utilização em camadas de

base e/ou sub-base de pavimentos, nas misturas com mais de 10% de cimento (aos 7 dias de cura), com teores de 28% de cinza volante e cal hidratada (aos 28 dias de cura) e cal hidráulica (aos 120 dias de cura).

Com o objetivo de estudar o comportamento geotécnico de um solo eólico, Al-Taie et al. (2013) coletaram amostras do solo de Baiji, no Iraque. Foram realizados no laboratório diversos testes, tais como ensaios físicos e químicos, análise de difração de raios-X, teste de permeabilidade, compactação, compressibilidade e colapsibilidade, além de testes de resistência ao cisalhamento. Com base nos resultados dos testes, os autores concluíram que o solo de Baiji poderia ser considerado adequado para uso em construções geotécnicas, principalmente, se fossem compactados através de vibração, mostrando-se mais eficiente nesses solos do que os métodos de compactação à percussão.

Shooshpasha e Shirvani (2015) estudaram os efeitos da estabilização com cimento nas propriedades geotécnicas de um solo eólico. Para isso, foi utilizado um solo eólico da cidade de Mahmoud-Abad, localizada ao norte do Irã, com adição de porcentagens de cimento de 2,5%, 5% e 7,5% em peso seco do solo, analisando o comportamento mecânico do mesmo. A partir da moldagem de corpos-de-prova cilíndricos (38 mm × 84 mm) e cúbicos (60 mm × 60 mm × 20 mm), preparados sob teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima, pelo método de compactação Proctor Normal, após 7, 14 e 28 dias de cura, foram submetidos aos ensaios de compressão simples e ensaios de cisalhamento direto. Finalmente, os autores concluíram que a adição de cimento aumentou os parâmetros de resistência, fazendo com que o solo tivesse um acréscimo de forma linear na resistência à compressão simples com o aumento do teor de cimento, além disso, com o tempo de cura de 28 dias também se obteve melhores resultados de resistência. No estudo conseguiu-se reduzir o deslocamento na ruptura e, alterar o comportamento mecânico do solo, tornando-o assim, mais resistente com as dosagens de cimento, mesmo que em pequenas quantidades.

Abu Seif e Sonbul (2019) realizaram estudos envolvendo a utilização de amostras de solo eólico em mistura com agregado granular fino-cimento-água, sob várias proporções, visando a confecção e produção de tijolos maciços e argamassas. Para isso, foram coletadas amostras de um solo eólico da cidade de Jeddah-Al-Lith (Arábia Saudita). O solo eólico se mostrou adequado para fins de construção devido à sua granulometria, baixo teor de finos, não plasticidade e alta permeabilidade. Porém, os autores destacam que algumas dificuldades podem surgir, devido ao tamanho e arredondamento dos grãos do solo eólico, que podem ser resolvidas pela mistura com agregado fino triturado (areia triturada bem graduada – SW). Para

a confecção dos tijolos, os autores utilizaram o traço constante de 1: 2: 3 (cimento: água: solo eólico-agregado granular fino), sendo que a adição do agregado fino triturado no solo eólico variou de 0% a 90% do volume. Durante a pesquisa, os autores estudaram as características físicas dos materiais, tais como: i) tamanho dos grãos, ii) massa específica, iii) textura, iv) composição mineral, v) trabalhabilidade e vi) resistência à compressão. Os resultados obtidos mostraram que o solo eólico estudado seria adequado para a confecção de tijolos e argamassas, desde que, misturado com agregados finos triturados. Além disso, os resultados de resistência à compressão e trabalhabilidade mostram-se aceitáveis quando a proporção da mistura (solo eólico + agregado fino) não ultrapassou 50% da quantidade total de solo eólico. E, por fim, as características mineralógicas e químicas do agregado fino estudado revelaram-se suficientemente estáveis quando usados como material de construção.

2.3 Confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento

Os tijolos de solo-cimento ou também conhecidos de tijolos ecológicos, estão em crescente destaque entre os principais materiais inovadores da construção civil, no qual constituem uma alternativa ao desenvolvimento sustentável para as construções, além de desfrutar das técnicas de fabricação solo-cimento normalizadas pela ABNT (Weber et al., 2017).

De acordo com Grande (2003), na confecção dos tijolos ecológicos destaca-se o baixo consumo de energia na extração da matéria-prima, dispensam o processo de queima e reduzem a necessidade de transporte, uma vez que os tijolos podem ser produzidos com solo do próprio local da obra.

Segundo Mota et al. (2010), o tijolo ecológico de solo-cimento possui solo, cimento e água em sua composição e, após um período de cura, a sua resistência à compressão equipara-se à do tijolo convencional. Além disso, pode-se utilizar materiais alternativos como aditivos, a fim de reduzir o consumo de cimento.

Tomando como base as orientações de alguns autores, tais como Grande (2003) e Vessozi (2016), para confeccionar tijolos de solo-cimento, deve-se atender às seguintes normas da ABNT:

- NBR 8491/2012: Tijolo de solo-cimento - Requisitos;

- NBR 8492/2012: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio;
- NBR 10833/2013: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica.

Souza et al. (2008) comentam que os solos mais indicados para a produção de tijolos de solo-cimento são aqueles que apresentam teor de areia entre 45% e 50%. Na Tabela 1, apresentam-se as características dos solos adequados para a fabricação de tijolos solo-cimento, baseado na NBR 10833 (ABNT, 2013).

Tabela 1. Requisitos do solo adequado para fabricação de elementos de solo-cimento

CARACTERÍSTICA	REQUISITO (%)
% que passa na peneira 4,8 mm (nº 4)	100
% que passa na peneira 0,075 mm (nº 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Fonte – Adaptado de ABNT NBR 10833/2013.

Segundo Santos et al. (2009), o tijolo ecológico possui inúmeras vantagens, além de seus baixos índices de poluição, o mesmo não passa pelo processo de queima, apresenta maior resistência mecânica, possui maior isolamento acústico e térmico, combate a umidade e possui menor peso. Com isso, o seu uso pode acarretar uma economia de 30 a 50% do custo total de uma construção.

Conforme as orientações da ABCP (2000), o processo de fabricação dos tijolos deve seguir as seguintes etapas:

- **PREPARO DO SOLO:** consiste em destorroar e peneirar, se necessário, o solo seco. A secagem deve ser feita ao ar. Recomenda-se usar peneira com abertura de malha da ordem de 5 mm;
- **PREPARO DA MISTURA:** adiciona-se o cimento ao solo preparado, na proporção previamente estabelecida. Misturam-se os materiais secos, até se obter uma coloração uniforme; adiciona-se água aos poucos, até que a mistura atinja a umidade adequada para sua prensagem;

- **MOLDAGEM DE TIJOLOS E BLOCOS:** coloca-se a mistura no equipamento e procede-se a prensagem e a extração do tijolo ou do bloco, transportando-o em bandeja e acomodando-o numa superfície plana e lisa, em área protegida do sol, do vento e da chuva;
- **CURA E ARMAZENAMENTO:** após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os tijolos ou blocos devem ser mantidos úmidos por meio de molhagens sucessivas; podendo ser acomodados em pilhas de até 1,5 m de altura.

A mistura adequada deverá atender aos requisitos mínimos de resistência à compressão simples e absorção de água, conforme estabelecidos nas NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Requisitos para controle da qualidade de tijolos de solo-cimento

CARACTERÍSTICAS	Nº de AMOSTRA	EXIGÊNCIAS NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012
Variação dimensional	-	+/- 1 mm
Resistência à compressão simples	7	Valor médio $\geq 2,0$ MPa Valor individual $\geq 1,7$ MPa
Absorção de água	3	Valor médio $\leq 20\%$ Valor individual $\leq 22\%$

Fonte – Adaptado de ABNT NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012.

Da maneira em que foi apresentado na Tabela 2 e conforme orientação da NBR 8492 (ABNT, 2012), para o controle da qualidade de tijolos de solo-cimento, retira-se 10 (dez) tijolos aleatoriamente do lote e utiliza-se 7 (sete) para análise da resistência à compressão simples e 3 (três) para o ensaio de absorção de água.

Grande (2003) confeccionou tijolos vazados através de misturas de solo-cimento e solo-cimento-sílica. Como referência, o autor adotou as misturas de solo-cimento com 10% de cimento, comparando-a com as misturas com 14% de cimento e 7% de cimento. A realização das misturas com a adição de sílica ocorreu em substituição de 10% da massa de cimento, considerando-se as massas específicas dos dois materiais, para que o volume de cimento e sílica fosse igual ao que anteriormente era ocupado somente pelo cimento. A moldagem dos tijolos

de solo-cimento com e sem adição de sílica ocorreu sob metodologia da NBR 10832 (ABNT, 1989), adotando-se o teor de umidade ótimo das misturas na etapa de moldagem. Os equipamentos utilizados pelo autor nessa etapa foram um triturador, com o objetivo de destorroar as misturas e proporcionar melhor homogeneização da umidade, e uma prensa manual para a produção de tijolos com dimensões de 10 cm x 20 cm x 5 cm (largura x comprimento x espessura) e diâmetro dos furos de 5 cm.

Para moldagem e confecção de tijolos vazados, Vessozi (2016) utilizou misturas contendo solo-cimento com proporção de 10% de cimento, solo-cimento com adição de cinza de casca de arroz com proporção de 10% e 8%, respectivamente, e, solo-cimento com substituição de cinza contendo 5,56% de cimento e 4,44% de cinza. A moldagem dos tijolos ocorreu sob metodologia da NBR 10833 (ABNT, 2013), com a adição de água no teor de umidade ótimo das misturas. A homogeneização das amostras ocorreu de forma manual e o equipamento utilizado na moldagem foi uma prensa manual com capacidade de moldar um tijolo por vez.

Milani (2005) utilizou misturas de solo-aglomerante-casca de arroz para a moldagem e confecção de tijolos maciços. Para isso, a pesquisadora usou dois solos (arenoso e argiloso), e como aglomerante utilizou cimento Portland e cal. As proporções das misturas foram estabelecidas em esquema fatorial, variando as combinações de aglomerante e casca. Para ambos os solos, a adição dos materiais (cimento-casca e cal-casca) foram de 8% e 12% sob seu peso seco. Dentro destas duas porcentagem de misturas (8% e 12%), foram subdivididas em proporções de aglomerante (cimento ou cal) com casca (100% aglom-0% de casca, 90% aglom-10% de casca, 80% aglom-20% de casca, 70% aglom-30% de casca, 60% aglom-40% de casca e 50% aglom-50% de casca). A homogeneização dos materiais foi realizada manualmente e, o equipamento para moldagem dos tijolos foi uma máquina com capacidade de fabricação de três tijolos por prensagem, sendo tijolos tipo II (23 cm x 11 cm x 5 cm), seguindo assim a instrução normativa NBR 8491 (ABNT, 1984). Após a moldagem, os tijolos foram alocados em câmara úmida para cura e, posteriormente, submetidos a ensaios de ultrassom, ensaios de resistência à compressão simples e absorção de água.

Valenciano (1999) na moldagem de tijolos maciços, utilizou misturas contendo solo-cimento-fibras de bagaço de cana-de-açúcar e solo-cimento-cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Nessas misturas, a autora acrescentou 3% de cimento em peso, variando o tipo de solo (arenoso e argiloso) e, a quantidade de fibras (teores de 10% e 20% em peso seco) e cinzas (teores de 20% em peso seco). As dimensões dos tijolos moldados foram do tipo II (23 cm x 11 cm x 5

cm), obedecendo a normativa NBR 8491 (ABNT, 1984). A homogeneização das misturas foi realizada manualmente, seguidamente a prensagem dos tijolos ocorreu através de uma prensa manual com capacidade de prensar três tijolos por vez, modelo/marca não especificado pela autora. A Figura 3 mostra a prensa manual utilizada na confecção dos tijolos maciços.



Figura 3. Prensa manual para moldagem de tijolos maciços.

Fonte – Valenciano (1999).

2.4 Ensaios laboratoriais

2.4.1 – Testes de caracterização em solos eólicos

Com o objetivo de viabilizar a utilização de um solo eólico como agregado na produção de tijolos e argamassas, Abu Seif e Sonbul (2019) realizaram testes físicos nas amostras. Foram realizados ensaios de análise granulométrica e massa específica dos grãos. Durante a pesquisa, também foi realizado o ensaio de granulometria nas amostras de agregados finos triturados, utilizados para complementar a granulometria do solo eólico. Com isso, pode-se observar na Figura 4, que ambos os solos apresentam comportamento uniforme. A massa específica média do solo eólico estudado foi de 2,54 g/cm³.

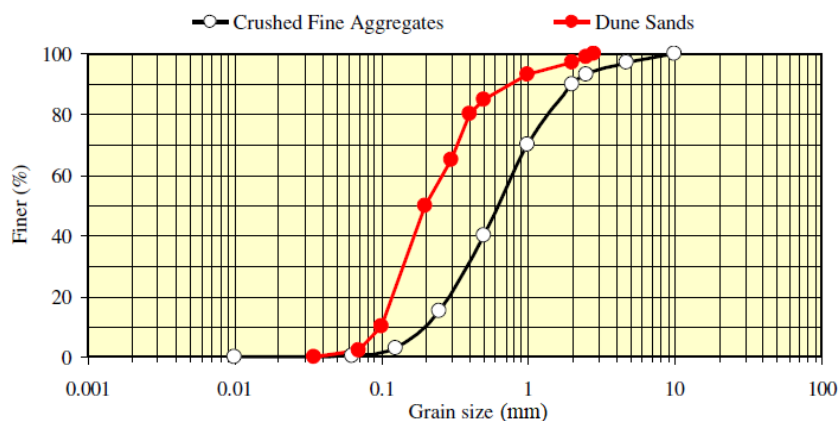


Figura 4. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico (*Dune Sands*) e das amostras de agregado fino triturado (*Crushed Fine Aggregates*).

Fonte – Abu Seif e Sonbul (2019).

Ruver et al. (2013) estudaram a utilização do solo eólico de Rio Grande-RS em obras rodoviárias. Nas amostras de solo coletadas, realizaram ensaios de caracterização geotécnica, tais como a distribuição granulométrica. Com isso, constataram que as amostras de solo eólico denominadas “areias contaminadas” e “areias limpas” mostraram característica uniforme na distribuição granulométrica (Figura 5). Com base na classificação SUCS, as duas amostras apresentaram-se, respectivamente, como SP-SM (areia mal graduada com silte) e SP (areia mal graduada) e, para a classificação TRB ambas se apresentaram como A-3. Embora houvesse uma pequena fração de finos em uma das amostras, essa não conferiu plasticidade suficiente para determinação dos limites de Atterberg.

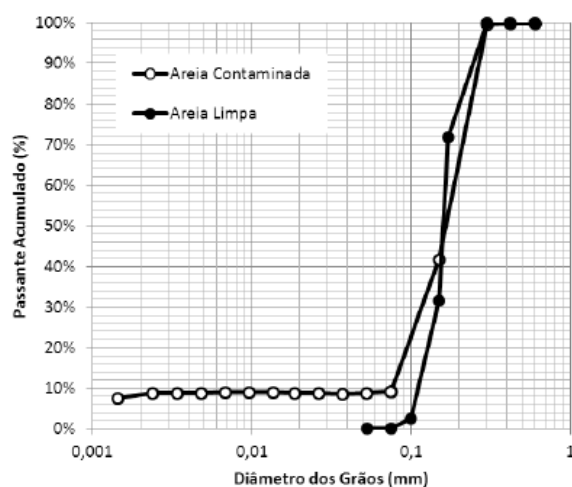


Figura 5. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico de Rio Grande-RS.

Fonte – Ruver et al. (2013).

Ghrieb et al. (2012) analisaram o comportamento geotécnico de um solo eólico através dos ensaios de granulometria e massa específica dos grãos, objetivando a viabilidade da estabilização granular ou química para uso do solo na construção de estradas. As amostras do solo apresentaram comportamento uniforme, conforme mostra a Figura 6. A classificação do solo eólico estudado através da metodologia SUCS foi SP (areia mal graduada). Além disso, todas as amostras apresentaram valores de massa específica dos grãos próximos a $2,60 \text{ g/cm}^3$.

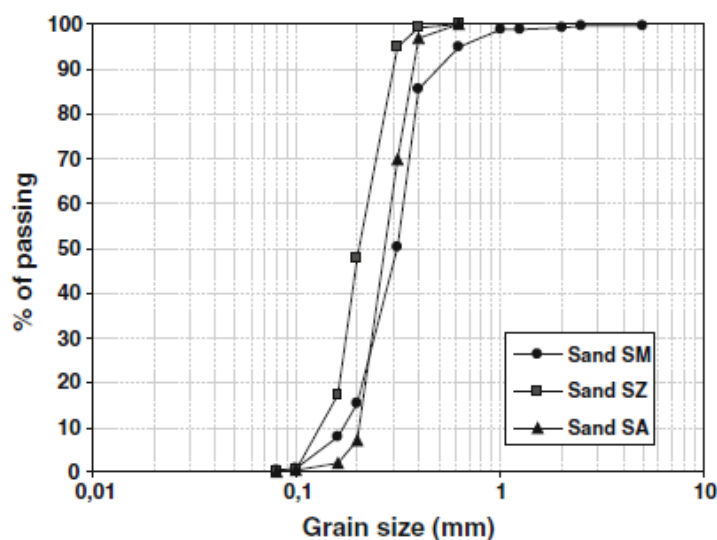


Figura 6. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico da Argélia.

Fonte – Ghrieb et al. (2012).

Shooshpasha e Shirvani (2015) estudaram os efeitos da estabilização química nas propriedades geotécnicas de um solo eólico. Para isso, primeiramente realizaram ensaios de caracterização geotécnica, tais como análise granulométrica e massa específica dos grãos, nas amostras de solo. O solo estudado revelou uma curva de granulometria uniforme, apresentando-se como SP (areia mal graduada), conforme a classificação SUCS. Além disso, obteve um valor de $2,74 \text{ g/cm}^3$ no ensaio de massa específica dos grãos.

Finalmente, Al-Taie et al. (2013) realizaram os testes de caracterização nas amostras do solo eólico, com o objetivo de avaliar o comportamento do mesmo para uso em construções geotécnicas. Esses testes físicos incluíram a distribuição do tamanho dos grãos (granulometria), massa específica dos grãos e limites de Atterberg. A partir dos testes, as curvas de granulometria apresentaram característica uniforme (Figura 7). Além disso, os resultados dos limites de

Atterberg mostraram que este solo não tinha caráter plástico e, o ensaio de massa específica dos grãos apresentou valor de $2,70 \text{ g/cm}^3$. O solo foi classificado como SP, ou seja, areia mal graduada, através da metodologia de classificação SUCS.

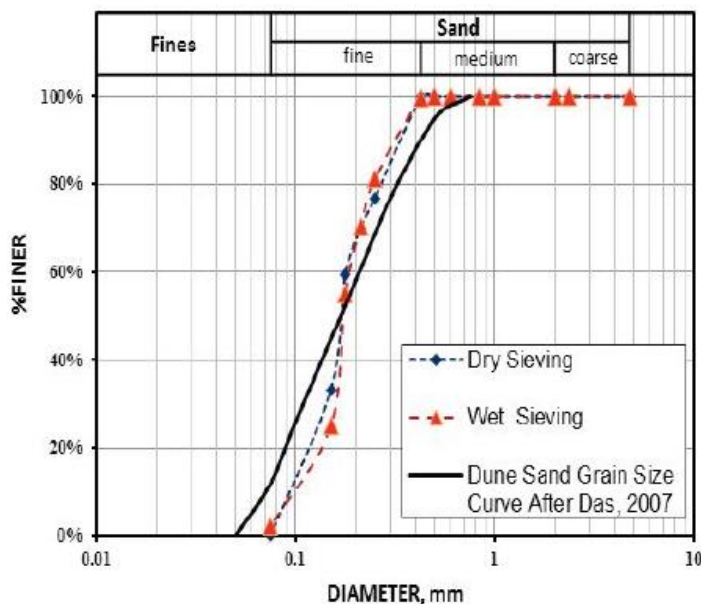


Figura 7. Curvas de granulometria das amostras de solo eólico do Iraque.

Fonte – Al-Taie et al. (2013).

2.4.2 – Testes realizados em tijolos confeccionados

Grande (2003) realizou ensaios laboratoriais nos tijolos de solo-cimento (proporções de cimento de 7%, 10% e 14% em peso seco) e tijolos de solo-cimento-sílica ativa, com substituição parcial de 10% (em peso) por sílica ativa nos três teores de cimento supracitados. Os ensaios laboratoriais executados pelo autor foram: i) resistência à compressão simples, ii) absorção de água e iii) durabilidade. O ensaio de durabilidade consiste em medir a perda de massa e a resistência à compressão de tijolos após serem submetidos a ciclos de molhagem (imersão em água por 24 horas) e secagem (em estufa a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas) conforme a NBR 13554 (ABNT, 1996). O autor concluiu que a porcentagem de cimento que foi adicionada ao solo em todas as misturas proporcionou melhorias nos resultados dos ensaios realizados. Além disso, concluiu que, quanto maior o teor de cimento, maior a resistência à compressão e menor absorção de água, independentemente da adição de sílica. Contudo, a adição de sílica nas misturas foi benéfica e melhorou sua resistência mecânica ao longo do tempo, quando utilizada

a dosagem de 10% em substituição parcial ao cimento. O autor ainda ressaltou o cuidado com o teor de umidade das misturas, sendo esse tão importante quanto a porcentagem de cimento, recomendando utilizar o teor de umidade ótimo nas misturas.

No estudo de Vessozi (2016), são apresentados ensaios de absorção de água e resistência à compressão simples nos tijolos de solo-cimento-cinza de casca de arroz sob proporções de: i) 90%-10%-0%, ii) 82%-10%-8% e iii) 90%-5,56%-4,44%. A partir dos resultados dos ensaios, a autora concluiu que os tijolos artesanais não atingiram a resistência mínima requerida pela norma técnica regulamentadora NBR 8491 (ABNT, 2012), relacionando tal fato a diversos fatores, dentre eles a falta de controle de umidade e temperatura da moldagem, sendo realizada em local aberto, podendo a umidade ter afetado as misturas.

Na pesquisa realizada em tijolos de solo-aglomerante-casca de arroz, Milani (2005) utilizou solos distintos, tais como solo arenoso e solo argiloso, além de utilizar duas combinações de aglomerantes (cimento ou cal) nas misturas. As proporções das misturas foram estabelecidas de acordo com seu peso seco. Primeiramente, as proporções de aglomerante (cimento ou cal) + casca (variando a proporção de casca de 0 a 50%) e, posteriormente, adicionando as proporções dessa mistura (aglomerante + casca) ao solo com teores de 8% e 12%. Na pesquisa, a autora avaliou os tijolos através de métodos destrutivos (resistência à compressão simples) e não destrutivos (absorção de água e ultrassom). Os resultados mostraram que os tijolos constituídos de solo arenoso obtiveram melhores resultados de resistência à compressão simples se comparados com os tijolos de solo argiloso, sendo necessários teores de 8% e 12% das combinações de cimento-casca de arroz para alcançar a resistência de 1,5 MPa em solos arenosos e, 18% das combinações para alcançar a mesma resistência (1,5 MPa) com o solo argiloso. Quanto à absorção de água dos tijolos, os menores valores (até 20%, em média) foram alcançados pelos tratamentos com solo arenoso. Novamente, no ensaio de ultrassom, destacaram-se os solos arenosos, com menor velocidade de propagação da onda ultrassônica. De acordo com a autora, os resultados podem ser explicados pelo fato de o solo argiloso possuir maior quantidade de finos, faltando interação entre a casca e o sistema solo-cimento, levando à alta porosidade dos tijolos.

Valenciano (1999) realizou a análise dimensional, pesagem e cura; além de realizar ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de absorção de água nos tijolos de solo-cimento-fibras (variando proporções de 3% de cimento + 10% e 20% de fibras, em peso seco) e solo-cimento-cinza (com proporções de 3% de cimento + 20% de cinzas), utilizando nas misturas dois tipos de solos, arenoso e argiloso. A partir dos resultados, a autora concluiu que

a adição de 3% de cimento aumentou significativamente a resistência à compressão simples, para tijolos confeccionados com ambos os solos, porém, as fibras afetaram negativamente a resistência nas misturas.

3 CARACTERIZAÇÃO E MELHORIA GEOTÉCNICA EM SOLO EÓLICO SOB ADIÇÃO DE CIMENTO E SÍLICA DA CASCA DE ARROZ.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Solo

A área de coleta de amostras de solo eólico está situada no Sudoeste do Rio Grande do Sul, no município de Alegrete, mais especificamente no subdistrito do Durasnal, nas coordenadas $29^{\circ}54'44.6''\text{S}$ e $55^{\circ}29'11.1''\text{O}$. A Figura 8, apresenta a imagem de satélite da área, enquanto a Figura 9 mostra a vista panorâmica das condições apresentadas *in-situ*.



Figura 8. Imagem de satélite da área de coleta de amostras de solo eólico.

Fonte – Modificado do Google Earth (2020).



Figura 9. Vista panorâmica *in-situ* da área de coleta de amostras.

Fonte – A autora (2022).

3.1.2 Cimento

Para a pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento; primeiramente, as atividades foram iniciadas utilizando o Cimento Portland CP V ARI; porém por não ser comercializado em grande escala na região e, pela falta do mesmo, posteriormente, optou-se pela utilização do Cimento Portland CP IV-32 RS, sendo esse último, amplamente comercializado e muito utilizado nas obras de construção civil da região. Os mesmos foram armazenados cuidadosamente em local seco e livre de agentes que pudessem causar a sua hidratação.

3.1.3 Água

A água utilizada foi a de consumo local, do sistema de abastecimento municipal de Alegrete, disponível na UNIPAMPA.

3.1.4 Sílica da casca de arroz

A sílica utilizada foi disponibilizada pela empresa Geradora de Energia Elétrica de Alegrete (GEEA). Gomes e Marton (2015) destacam o sistema inovador de combustão da

empresa, onde a sílica da casca de arroz é obtida através da combustão controlada em caldeira com leito fluidizado. A Figura 10, ilustra a SCA empregada neste estudo.



Figura 10. Sílica da casca de arroz. (A): Embalagem do material; (B): Característica visual do material.

Fonte – A autora (2022).

3.2 Coleta de amostras de solo eólico e preparação para ensaios de caracterização

A coleta de amostras do solo eólico foi executada seguindo as recomendações da metodologia da NBR 9604 (ABNT, 2016), norma que regulamenta todos os procedimentos de abertura de poços e trincheiras de inspeção de solo com retiradas de amostras deformadas e indeformadas. Para o presente trabalho, as coletas foram realizadas através da abertura de poço com retirada de amostras deformadas, obedecendo a norma técnica, limpando a área superficialmente, conforme apresentado na Figura 11. No laboratório, as amostras seguiram a metodologia da norma NBR 6457 (ABNT, 2016), que regulamenta os procedimentos de preparação para os ensaios de caracterização, consistindo em atividades de homogeneização, quarteramento (Figura 12) e secagem ao ar até atingir umidade higroscópica.



Figura 11. Coleta de amostras deformadas de solo eólico.

Fonte – A autora (2022).



Figura 12. Preparo (quarteamento) das amostras de solo eólico para ensaios de caracterização.

Fonte – A autora (2022).

3.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica

Com o intuito de conhecer as propriedades geotécnicas do solo eólico, no laboratório de solos e pavimentação da UNIPAMPA, foram executados os ensaios de análise granulométrica pelo método do peneiramento, ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e, ensaios de massa específica dos grãos pelo método do picnômetro.

O ensaio de análise granulométrica foi realizado seguindo as orientações da NBR 7181 (ABNT, 2016), através do método do peneiramento, utilizando as seguintes peneiras: 4,76 mm, 2,00 mm, 1,19 mm, 0,59 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,149 mm e 0,074 mm de abertura. Os ensaios de limite de liquidez foram executados conforme a norma NBR 6459 (ABNT, 2016) pelo método de Casagrande; enquanto os ensaios de limite de plasticidade seguiram a norma NBR 7180 (ABNT, 2016). Os ensaios de massa específica dos grãos foram executados pelo método do picnômetro e, os procedimentos aplicados na execução do ensaio seguiram as orientações da ASTM D 854 (2014).

Para as amostras do solo eólico estudado, além dos ensaios de caracterização geotécnica, no laboratório de solos do Instituto Federal Farroupilha, Campus Alegrete, foi realizada uma análise físico-química através do ensaio do potencial hidrogeniônico (pH), sendo utilizadas, para isso, as orientações do Manual de Análise de Solo–Embrapa (2017).

A Figura 13, apresentada imagens dos ensaios de caracterização geotécnica e do ensaio de pH , executados nas amostras de solo eólico estudado.

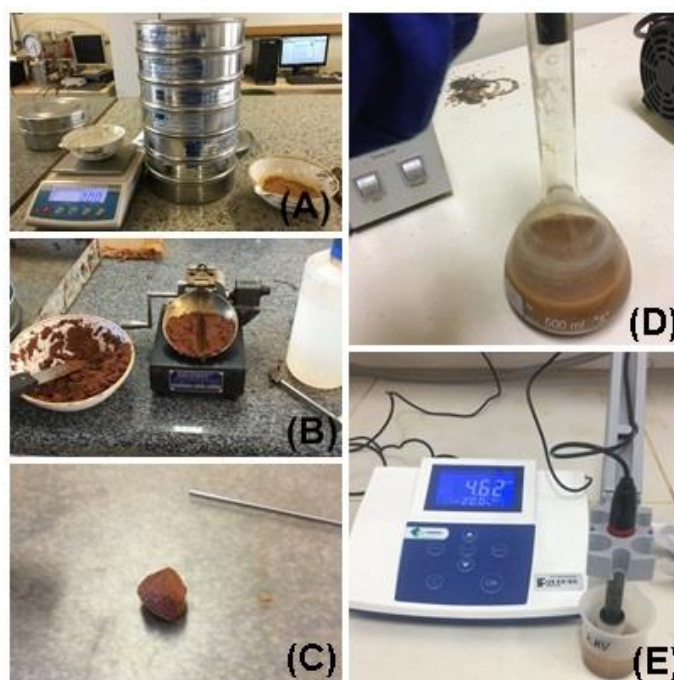


Figura 13. Ensaios de caracterização geotécnica e pH nas amostras de solo eólico. (A): Análise granulométrica; (B): Limite de liquidez; (C) Limite de plasticidade; (D) Massa específica dos grãos; (E) Ensaio de pH .

Fonte – A autora (2022).

3.2.2 Melhoramento geotécnico do solo eólico

Tomando como referência os estudos realizados por Valenciano (1999), Grande (2003) e Milani (2005), para este trabalho, com o intuito de viabilizar a confecção de tijolos maciços, optou-se por estudar materiais alternativos tais como o cimento e a sílica de casca de arroz, a ser adicionados ao solo eólico nas proporções compreendidas entre 12% e 20% do peso seco. Além disso, definiu-se que antes da confecção dos tijolos, as misturas (solo-cimento-SCA) teriam que ser testadas em corpos-de-prova cilíndricos, com a moldagem através da compactação dinâmica e, a partir dos resultados de resistência à compressão simples dos corpos-de-prova cilíndricos, as melhores proporções da mistura solo eólico-cimento-sílica de casca de arroz seriam utilizadas para a confecção dos tijolos.

Está apresentado no Quadro 1 as proporções testadas da mistura solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz. No decorrer do trabalho, as diferentes proporções da mistura serão denominadas como tratamentos e representados pelas simbologias também apresentadas no Quadro 1. A Figura 14 apresenta os materiais utilizados na mistura de solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz.

Quadro 1. Proporções das misturas de solo eólico com estabilizantes

TRATAMENTOS	MISTURAS	PROPORÇÕES
T88-12	Solo eólico + cimento	88% - 12%
T80-10-10	Solo eólico + cimento + SCA	80% - 10% - 10%
T80-12-8	Solo eólico + cimento + SCA	80% - 12% - 8%
T85-7,5-7,5	Solo eólico + cimento + SCA	85% - 7,5% - 7,5%
T80-8-12	Solo eólico + cimento + SCA	80% - 8% - 12%

Fonte – A autora (2022).



Figura 14. Mistura de solo eólico-cimento-SCA: (A) Bandejas com os materiais utilizados na mistura; (B) Mistura manual dos três materiais.

Fonte – A autora (2022).

3.2.3 Confeção e testes de resistência em corpos-de-prova cilíndricos

Para cada tratamento da mistura solo eólico + cimento + SCA foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura, sob diferentes teores de umidade. Para isso, tomaram-se como referências as metodologias das normas NBR 12023 (ABNT, 2012) e NBR 7182 (ABNT, 2016), as quais adotam o processo de compactação dinâmica na confecção de corpos-de-prova (Figura 15). Além disso, salienta-se a utilização da energia de compactação Proctor Normal para os tratamentos T88-12, T80-10-10 e T80-8-12 e, a energia Proctor Modificado para os tratamentos T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12. Com os resultados obtidos de cada corpo-de-prova compactado, tais como de massa específica seca e teor de umidade, foi possível desenhar as curvas de compactação para cada tratamento.



Figura 15. Execução do ensaio de compactação dinâmica (com energia de Proctor Normal).

Fonte – A autora (2022).

Após a compactação, os corpos-de-prova foram extraídos dos moldes com o auxílio de um macaco hidráulico, envoltos por papel filme e alocados em local climatizado (temperatura constante) por um período de cura de 7 e 28 dias. A Figura 16, ilustra as etapas após a compactação dinâmica.

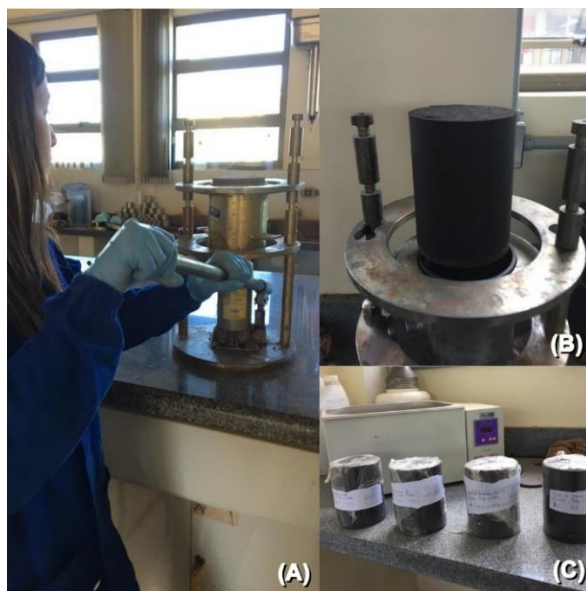


Figura 16. Etapas após o ensaio de compactação. (A): Extração; (B): Corpo-de-prova extraído; (C): Corpos-de-prova envoltos por papel filme.

Fonte – A autora (2022).

Ocorridos o tempo de cura, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, sob metodologia da norma NBR 12025 (ABNT, 2012). O ensaio de resistência à compressão simples foi aplicado após um processo de cura de 7 dias para o tratamento T80-12-8 com energia de compactação Modificada e, após 28 dias para os demais tratamentos.

Para realização do ensaio, foi utilizada uma prensa hidráulica do Laboratório de Materiais da UNIPAMPA (Figura 17). A aplicação e movimentação do carregamento ocorreu até atingir a carga máxima, que foi anotada como carga de ruptura do corpo-de-prova.



Figura 17. Ensaio de resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos.

Fonte – A autora (2022).

3.3 Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e de resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos

A partir do ensaio de análise granulométrica, foi possível confeccionar a curva da distribuição granulométrica do solo eólico (Figura 18).

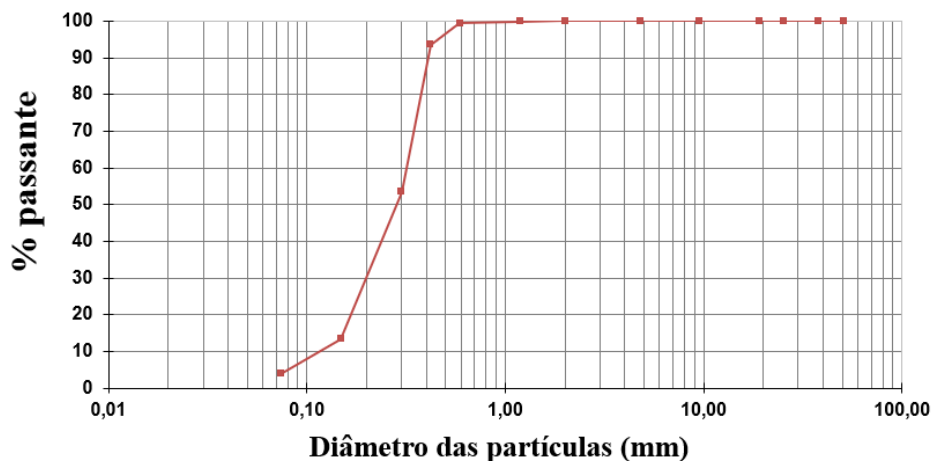


Figura 18. Curva granulométrica do solo eólico estudado.

Fonte – A autora (2022).

A partir da curva granulométrica foi possível a determinação dos diâmetros de partículas D_{10} , D_{60} e D_{30} . Para o cálculo dos respectivos coeficientes de uniformidade (C_u) e de curvatura (C_c) utilizaram-se as Equações 1 e 2.

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad (1)$$

$$C_c = D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10}) \quad (2)$$

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos C_u , C_c , a massa específica dos sólidos, os limites de consistência, pH e classificações SUCS e TRB do solo eólico estudado. Além disso, apresenta-se os resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica e classificação SUCS e TRB de alguns solos eólicos que foram utilizados em construções geotécnicas e serviram de referência para este trabalho (Itens 2.2 e 2.4.1).

Tabela 3. Ensaio de caracterização geotécnica, *pH* e Classificação do solo eólico.

Propriedades	Solo eólico estudado	Shooshpasha e Shirvani (2015)	Tiwari et al. (2016)	Ghrieb et al. (2012)	Abu Seif e Sonbul (2019)	Ruver et al. (2013)
Localização	Alegrete/RS	Irã	Índia	Argélia	Arábia Saudita	Rio Grande/RS
Coefficiente de uniformidade (Cu)	2,67	-	-	-	-	1,3
Coefficiente de curvatura (Cc)	1,04	-	-	-	-	1,2
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,38	2,74	2,66	2,60	2,54	2,59
Limite de Liquidez (%)	0	-	-	-	-	0
Limite de Plasticidade (%)	0	-	-	-	-	0
<i>pH</i>	4,5	-	-	-	-	-
Classificação SUCS	SP	SP	SP	SP	SP	SP
Classificação TRB	A-3	-	-	-	-	A-3

Fonte – A autora (2022).

Pela característica da curva granulométrica (Figura 18) e pelos resultados apresentados na Tabela 3, o solo eólico estudado revelou possuir partículas muito uniformes, apresentando valor de coeficiente de uniformidade $Cu < 5$. Para os ensaios de Limite de liquidez e de plasticidade não foram possíveis obter resultados satisfatórios, pois o solo mostrou-se não plástico, impossibilitando execução dos ensaios. Pela classificação do Sistema Unificado - SUCS, o mesmo foi classificado como areia mal graduada (SP). Para a classificação TRB, o solo eólico foi classificado como A-3, sendo um solo granular constituinte de fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia. Os demais autores (Shooshpasha e Shirvani, 2015; Tiwari et al., 2016; Ghrieb et al., 2012; Abu Seif e Sonbul, 2019; Ruver et al., 2013), encontraram valores de massa específica dos grãos compreendidos entre 2,54 a 2,74 g/cm³, resultados próximos do solo eólico de Alegrete (2,38 g/cm³); além disso, todos os autores classificaram o solo eólico de acordo com a classificação SUCS como SP, areia mal graduada. Ruver et al. (2013) classificaram pelo TRB o solo eólico como A-3. Considerando que todas as classificações dos

solos eólicos referenciados obtiveram a mesma classificação do solo eólico de Alegrete/RS, foi possível prever a utilização satisfatória do solo em estudo.

Comparando os resultados da Tabela 3 com a Tabela 1 (página 26), verificou-se que todos os solos eólicos estudados atendem os requisitos mínimos exigidos a normativa NBR 10833 (ABNT, 2013), para fabricação de tijolos de solo-cimento.

A Figura 19 mostra as curvas de compactação correspondentes às diversas proporções da mistura solo eólico-cimento-SCA (T88-12, T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12), ensaiadas com energias de Proctor Normal (EN) e Modificado (EM). Assim também, a Tabela 4 apresenta os parâmetros de compactação para cada proporção da mistura solo eólico-cimento-SCA.

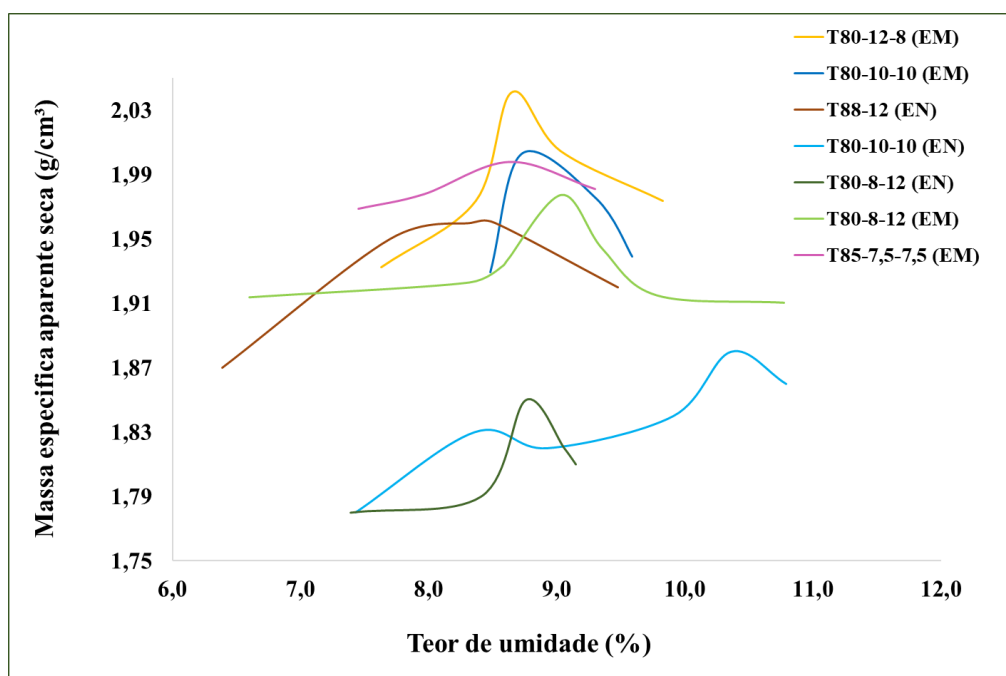


Figura 19. Curvas de compactação dos tratamentos T88-12, T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12.

Fonte – A autora (2022).

Tabela 4. Parâmetros de compactação respectivo à cada tratamento e a devida energia de compactação utilizada.

TRATAMENTO	Energia de compactação	Massa específica seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótimo (%)
T88-12	EN	1,96	8,33
T80-10-10	EN	1,88	10,36
T80-10-10	EM	2,01	8,74
T80-12-8	EM	2,04	8,65
T85-7,5-7,5	EM	1,99	8,63
T80-8-12	EN	1,85	8,76
T80-8-12	EM	1,97	9,04

Onde: EN = Energia Normal; EM = Energia Modificada.

Fonte – A autora (2022).

Analisando as curvas de compactação da Figura 19 e os parâmetros de compactação mostrados na Tabela 4, é possível observar o efeito da variação da energia de compactação para os tratamentos T80-10-10 e T80-8-12, os quais obtiveram um aumento da massa específica seca máxima devido ao incremento da energia de compactação. A massa específica seca máxima foi de 1,88 g/cm³, para o tratamento T80-10-10 compactado sob Energia Normal (EN) e quando compactado sob Energia Modificada (EM), apresentou uma massa específica seca máxima de 2,01 g/cm³; para o tratamento T80-8-12 foi possível obter uma massa específica seca máxima de 1,85 g/cm³ sob energia Normal, mostrando um aumento para 1,97 g/cm³ na EM. Além disso, em função do aumento da energia de compactação, observou-se uma redução do teor de umidade ótimo no tratamento T80-10-10, que revelou 10,36% para EN e 8,74% na EM; já no tratamento T80-8-12, não houve variação significativa entre os teores de umidade ótimos quando trabalhados sob ambas energias (8,76% sob energia Normal e 9,04% para energia Modificada). Para as duas energias de compactação (Normal e Modificada), observa-se na Figura 19 que a adição de SCA em maior proporção ao cimento, reduz as massas específicas secas máximas, o que pode ser constatado pelas curvas dos tratamentos T80-8-12 em comparação às curvas do tratamento T80-10-10. Finalmente, a maior massa específica seca máxima corresponde ao tratamento T80-12-8 sob energia Modificada e, a menor massa específica seca máxima corresponde ao tratamento T80-8-12 sob energia Normal.

Conforme descrito nos procedimentos metodológicos (Item 3.2.3), após o processo de compactação e de cura, todos os corpos-de-prova dos diversos tratamentos da mistura solo

eólico + cimento + SCA, foram submetidos ao teste de resistência à compressão simples. Dessa forma, na Tabela 5, são apresentados para cada tratamento estudado (T88-12, T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12), os valores máximos e mínimos de resistência à compressão simples. Além disso, é importante ressaltar que os corpos-de-prova cilíndricos submetidos ao teste de resistência, foram previamente moldados sob diferentes teores de umidade e massas específicas aparentes distintas (devido ao processo de confecção da curva de compactação). Portanto, na Tabela 5 e na Figura 20, apresentam-se também os valores de resistência à compressão simples, correspondentes aos parâmetros de compactação.

Tabela 5. Valores máximos, mínimos e valores correspondentes aos parâmetros de compactação de resistência à compressão simples dos tratamentos da mistura solo eólico + cimento + sílica de casca de arroz (SCA)

Tratamentos: Solo eólico – cimento - SCA (Energia de compactação)	Temp o de cura (dias)	Resistência Máxima (MPa)	Resistência Mínima (MPa)	Parâmetros de compactação		Resistência* (MPa)
				ρ_d máx (g/cm³)	w_{ót} (%)	
80%-8%-12% (EM)	28	21	9	1,97	9,04	19
80%-8%-12% (EN)	28	13	5	1,85	8,76	10
80%-10%-10% (EM)	28	23	11	2,00	8,73	23
80%-10%-10% (EN)	28	14	6	1,88	10,36	14
85%-7,5%- 7,5% (EM)	28	17	11	2,00	8,63	16
80%-12%-8% (EM)	7	18	9	2,04	8,65	11
88%-12%-0% (EN)	28	10	4	1,96	8,33	6

Fonte – A autora (2022). Onde: EM – Energia Modificada; EN – Energia Normal; ρ_d máx – Massa específica seca máxima; w_{ót} – Teor de umidade ótimo; Resistência* – Resistência à compressão simples correspondente aos parâmetros de compactação.

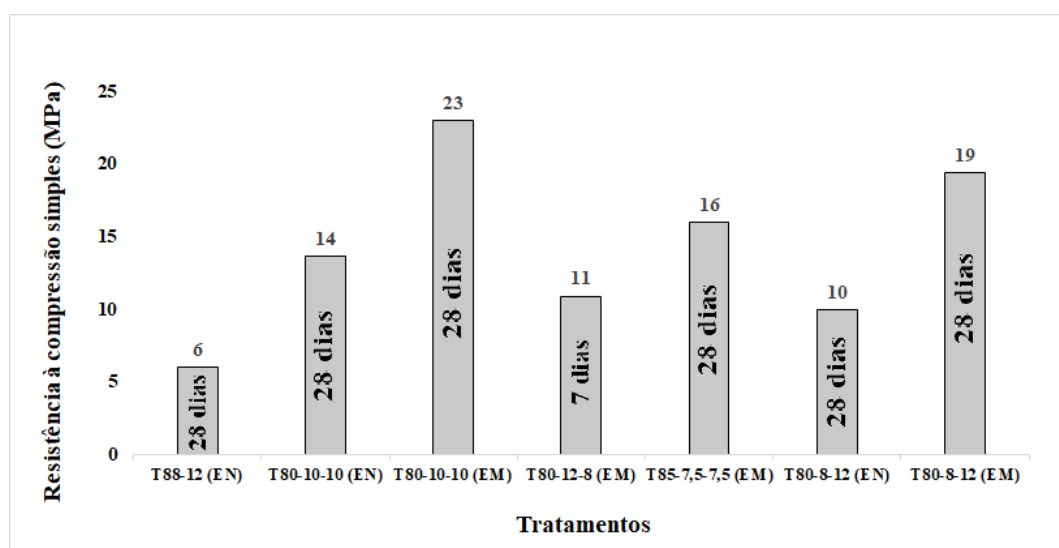


Figura 20. Valores de resistência à compressão simples nos corpos-de-prova cilíndricos, correspondente aos parâmetros de compactação de cada tratamento, moldado com energia Proctor Normal (EN) e Modificada (EM).

Fonte – A autora (2022). Onde: 7 ou 28 dias = Tempo de cura de cada tratamento.

A partir dos resultados mostrados na Tabela 5, pode-se dizer que todos os corpos-de-prova dos tratamentos da mistura solo eólico + cimento + SCA (T88-12, T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12), atenderam ao requisito exigido pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), a qual considera para confecção de tijolos de solo-cimento o valor mínimo individual de resistência à compressão simples maior ou igual a 1,7 MPa e, valores médios superiores a 2,0 MPa. Com isso, pode-se afirmar que todos os tratamentos da mistura apresentaram valores mínimos satisfatórios e acima do exigido.

Correlacionando os valores de resistência correspondentes aos parâmetros das curvas de compactação (Tabela 5 e Figura 20), verifica-se que o tratamento T80-10-10 moldado com EM, comparado com outros tratamentos, apresentou maior resistência à compressão simples (23 MPa); o tratamento T80-8-12 com EM, apresentou aos 28 dias de cura uma resistência de 19 MPa e, quando compactado com EN sob o mesmo tempo de cura (28 dias), obteve uma queda na resistência para 10 MPa, isso pode ser explicado pela redução da massa específica seca máxima na condição da EN; o mesmo acontece para o tratamento T80-10-10 que obteve uma queda na resistência quando moldado com energia Normal em comparação com energia Modificada, apresentando 14 MPa de resistência na EN. O tratamento T80-12-8 com EM apresentou uma resistência de 11 MPa aos 7 dias de cura; já o tratamento T85-7,5-7,5 obteve uma resistência de 15 MPa aos 28 dias sob energia Modificada. Finalmente, o tratamento T88-

12, quando comparado com os outros tratamentos (T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12), apresentou a menor resistência, sendo igual a de 6 MPa (sob tempo de cura de 28 dias), o que pode ser explicado pelo maior teor de areia (88%) na mistura.

A Figura 21 apresenta para cada tratamento da mistura solo eólico-cimento-SCA (T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12), o comportamento da resistência à compressão simples em função da curva de compactação sob energia Proctor Modificada (EM).

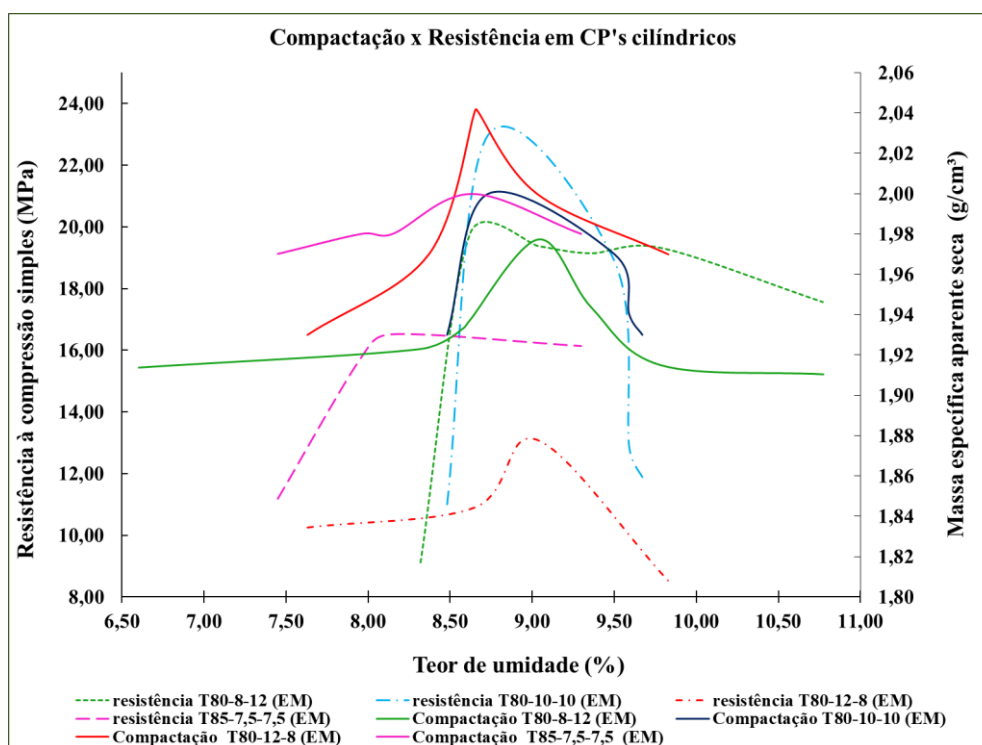


Figura 21. Comportamento das curvas de resistência à compressão simples e de compactação Proctor Modificado para os tratamentos T80-10-10, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12.

Fonte – A autora (2022).

De acordo com a Figura 21, para o tratamento T80-12-8 sob 7 dias de cura, percebe-se que o comportamento da curva de resistência, quando comparado com a curva de compactação, apresenta resistência máxima (em aproximadamente 9% de umidade) após ter ultrapassado a margem do teor de umidade ótimo (8,65%). O tratamento T80-10-10, aos 28 dias de cura, manteve comportamento similar entre as curvas de resistência e de compactação, coincidindo a resistência máxima com os respectivos parâmetros de compactação (no teor de umidade ótimo e massa específica seca máxima). Analisando o tratamento T85-7,5-7,5 (com 28 dias), observa-se na Figura 21, que o pico da resistência ocorre antes de atingir o ápice da curva de

compactação, não coincidindo com os parâmetros de compactação; entretanto, atingido o pico, a curva de resistência apresenta uma leve redução com o aumento do teor de umidade (ramo úmido da curva de compactação). Comparando a curva de resistência e a curva de compactação do tratamento T80-8-12 (sob 28 dias de cura), percebe-se também que a resistência máxima ocorre antes de atingir os parâmetros de compactação, em torno de 8,7% de umidade, mantendo-se estável até aproximadamente 10% de umidade, após isso, apresenta a mesma tendência da curva de compactação, diminuindo à medida que aumenta o teor de umidade. Com base na análise feita da Figura 21, pode-se dizer que as resistências máximas de pico obtidas a partir da interpolação dos corpos-de-prova compactados sob energia Modificada (Tabela 5 e Figura 21), a exceção do tratamento T80-10-10, não coincidem com o ápice das respectivas curvas de compactação (parâmetros de compactação). Isso provavelmente seja condicionado a um teor de umidade ideal necessário, responsável pela reação química eficiente entre o cimento e os demais materiais da mistura (solo eólico e sílica da casca de arroz).

A Figura 22 mostra também a correlação entre as curvas de resistências e as curvas de compactação feitas para os tratamentos T88-12, T80-10-10 e T80-8-12, utilizando corpos-de-prova cilíndricos compactados sob energia Proctor Normal.

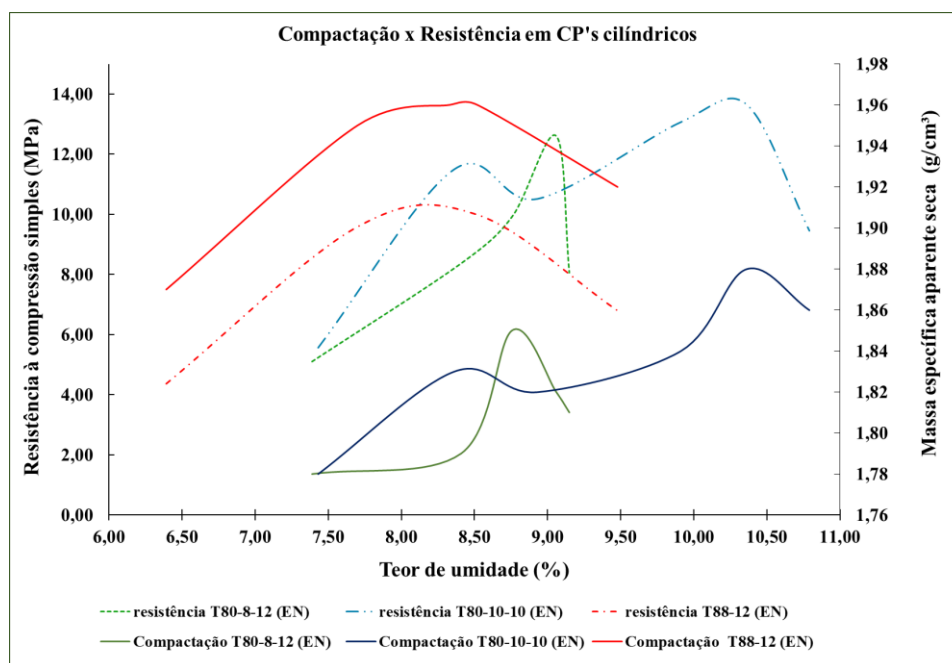


Figura 22. Comportamento das curvas de resistência à compressão simples e de compactação Proctor Normal para os tratamentos T88-12, T80-10-10 e T80-8-12.

Fonte – A autora (2022).

Conforme observa-se na Figura 22, os comportamentos das curvas de resistência à compressão simples correspondentes aos tratamentos T88-12 e T80-10-10, sob 28 dias de cura, apresentam correlação direta com as respectivas curvas de compactação, correspondendo as resistências máximas aos parâmetros de compactação (massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo). Já para o tratamento T80-8-12 (sob 28 dias de cura), embora observa-se comportamentos quase similares entre a curva de resistência e de compactação, percebe-se que a curva de resistência apresenta um ápice (próximo do 9% de umidade) após ter ultrapassado o teor de umidade ótimo da curva de compactação.

De maneira geral, com base nas interpretações realizadas das Figuras 21 e 22, foi possível verificar que a resistência máxima à compressão simples da mistura solo eólico-cimento-SCA, pode ser influenciada e condicionada por um teor de umidade ideal necessário para ocorrência das reações químicas, pelo tempo de cura, inclusive pela própria proporção: solo eólico + cimento + sílica de casca de arroz e, também, pela energia de compactação aplicada. Finalmente, só o tratamento T80-10-10 apresentou correlação direta entre o comportamento da curva de resistência e curva de compactação, tanto para Energia Normal e Energia Modificada, correspondendo os picos de resistência máxima aos parâmetros de compactação.

4. CONFECCÃO DE TIJOLOS MACIÇOS DE SOLO EÓLICO-CIMENTO-SCA

Para confecção dos tijolos maciços, primeiramente foram escolhidos três tratamentos da mistura “solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz”, que obtiveram os melhores resultados nos ensaios de resistência à compressão simples aplicados aos corpos de prova cilíndricos (Item 3.3) e, durante a moldagem apresentaram boa coesão e trabalhabilidade de manuseio. Desta forma, os tijolos foram confeccionados levando em consideração os parâmetros dos ensaios de compactação Proctor (massa específica seca máxima e teor de umidade ótimo) e a energia de compactação utilizada.

Os tratamentos escolhidos para serem aplicados nos tijolos maciços foram moldados sob Energia Modificada, uma vez que sob essa obteve-se os melhores resultados no ensaio de resistência à compressão simples. Foram escolhidos para aplicação nos tijolos o tratamento T80-12-8 que obteve parâmetros de compactação de massa específica seca máxima de 2,04 g/cm³ e teor de umidade ótimo igual a 8,65%; o tratamento T80-10-10 que obteve como valores de massa específica seca máxima 2,00 g/cm³ e 8,73% de teor de umidade ótimo e, o tratamento T80-8-12 com uma massa específica seca máxima de 1,97 g/cm³ e o teor de umidade ótimo de 9,04%. O tratamento T85-7,5-7,5 apresentou um bom resultado de resistência, entretanto, foi desconsiderado devido ao fato de não possuir boa coesão e trabalhabilidade durante a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, o que pode ser atribuído ao elevado teor de areia (85%).

Seguindo as recomendações da NBR 8491 (ABNT, 2012) e NBR 8492 (ABNT, 2012), foi realizada a mistura manual dos materiais para homogeneização e adição de água na condição do teor de umidade ótimo.

Para moldagem dos tijolos, foi confeccionado um molde metálico nas dimensões sugeridas pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), especificada para tijolo maciço do tipo A, com dimensões de 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (comprimento x largura x altura). O molde foi confeccionado utilizando aço comum, a forma do molde (Figura 23 – C e D) com viga I de 8”, com 22 cm de comprimento e duas chapas com 3/8” de espessura e 11 cm de comprimento; o fundo falso (Figura 23 – B) foi confeccionado com ferro chato 1/2” de espessura x 4” de largura com 20 cm de comprimento e 2 peças cantoneiras de 3/16” de espessura x 1” de largura com 23 cm de comprimento; ainda no fundo falso foram realizados pequenos furos com furadeira de broca de 1,0 mm para retirar o ar que ficaria comprimido durante a moldagem; o cabeçote metálico (Figura 23 – E) foi confeccionado com ferro chato de 1/2” de espessura x 4” de largura

com 20 cm de comprimento, 2 peças de ferro chato $\frac{3}{4}$ " de espessura x 3" de largura de 19 cm de comprimento e 4 peças de ferro chato $\frac{3}{4}$ " de espessura x 3" de largura de 10 cm de comprimento. A Figura 23, mostra o molde completo utilizado para a moldagem. No APÊNDICE A encontra-se o detalhamento digital completo do molde utilizado.

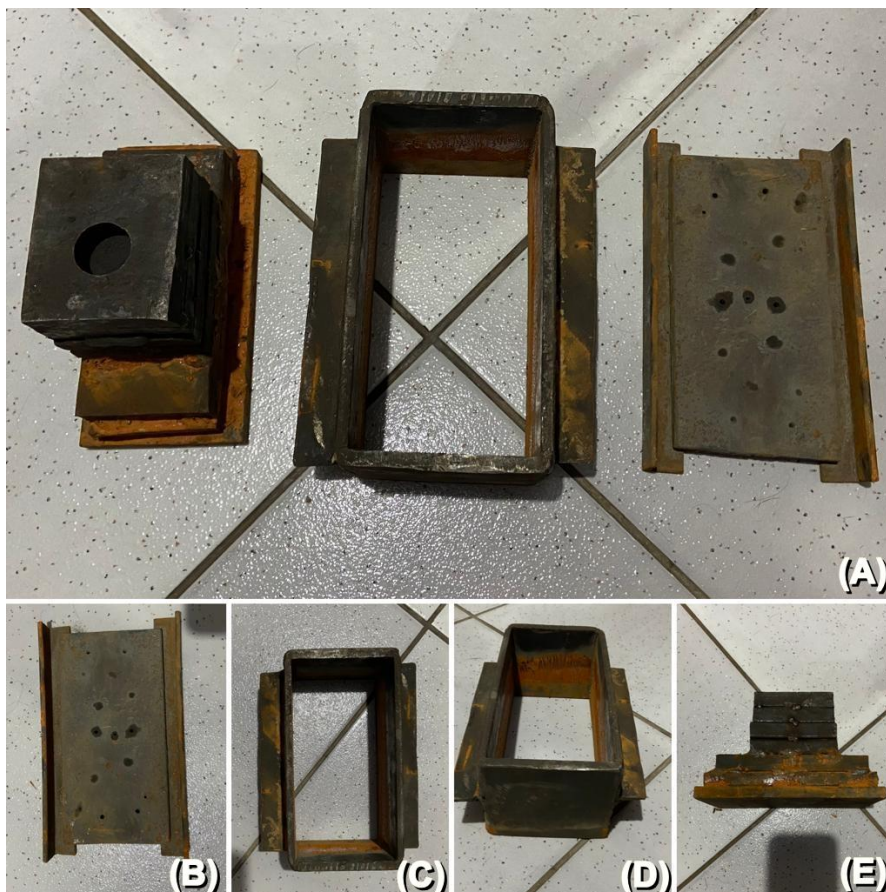


Figura 23. Molde de aço para confecção e moldagem de tijolos maciços. (A): Parte superior, forma e fundo. (B) Fundo falso; (C) e (D) Forma de moldagem com viga I; (E): Cabeçote metálico.

Fonte – A autora (2022).

Com o objetivo de confeccionar os tijolos sob os parâmetros das curvas de compactação dos tratamentos escolhidos, tais como a massa específica seca máxima e do teor de umidade ótimo, foi definido através do volume padrão (20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm) a massa úmida de cada proporção (em gramas) que seria alocada no molde e ser compactada, não sendo considerada como referência a carga aplicada pela prensa. Para a prensagem, foi utilizada uma prensa hidráulica uniaxial industrial da marca SIWA com capacidade de 100 toneladas (Figura

24), disponibilizada por uma empresa particular. No momento da prensagem, foram retiradas amostras para determinação do teor de umidade real da mistura (da bandeja); podendo haver variação a respeito do teor de umidade ótimo, devido à temperatura do ambiente não ser controlada. Na Figura 25, mostra-se a etapa da execução da prensagem dos tijolos maciços.



Figura 24. Prensa uniaxial industrial com capacidade de 100 toneladas utilizada para prensagem dos tijolos maciços.

Fonte – A autora (2022).



Figura 25. Confeção dos tijolos maciços com molde metálico no momento de prensagem.

Fonte – A autora (2022).

Foram moldados pelo menos 12 tijolos para cada mistura e, após a moldagem, retirados cuidadosamente do molde e alocados, conforme a norma supracitada, em local à sombra, superfície plana e em pilhas de até 1,5 m. Após 24 horas de moldados, os tijolos foram mantidos úmidos por meio de molhagens sucessivas, por um tempo de cura de 28 dias, dessa maneira, manteve-se o tempo de cura das misturas escolhidas e testadas nos corpos-de-prova cilíndricos. Entretanto, para o período de cura, visto que a moldagem ocorreu em uma empresa particular, foi montada uma estrutura metálica, à sombra, com água para manter ambiente úmido e com apoio interno de *pallets* elevado para alocar os tijolos durante este tempo (Figura 26). A estrutura possui dimensões de 1,70 m x 0,60 m x 0,85 m (comprimento x largura x altura).



Figura 26. Estrutura para cura dos tijolos maciços. (A): Estrutura fechada, parte externa; (B): Estrutura aberta, parte interna.

Fonte – A autora (2022).

4.1 Ensaio de absorção de água e de resistência à compressão simples

Para o ensaio de absorção de água conforme a NBR 8492 (ABNT, 2012), colocou-se 3 (três) tijolos aos 28 dias de idade em estufa por 24 horas, à temperatura de 105 ± 2 °C. Após serem retirados da estufa e atingirem temperatura ambiente, os tijolos foram pesados e verificadas suas massas secas e, em seguida, submersos em água por 24 horas. Passado esse tempo, os tijolos foram pesados para verificar sua massa saturada. Para determinar a absorção de água, foram utilizadas as equações descritas na NBR 8492 (ABNT, 2012). Na Figura 27, demonstra-se a execução do ensaio de absorção de água.



Figura 27. Execução do ensaio de absorção de água no laboratório: (A) Tijolos em estufa à 105 ± 2 °C; (B) Pesagem em balança de precisão; (C) Tijolos imersos em água para saturação.

Fonte – A autora (2022).

De acordo com as orientações da NBR 8492 (ABNT, 2012), após o período de cura de 28 dias dos tijolos, realizou-se uma análise dimensional do mesmo (Figura 28), com o auxílio de um paquímetro aferiu-se as dimensões dos tijolos, verificando se as mesmas estão de acordo com o molde.



Figura 28. Análise dimensional dos tijolos maciços.

Fonte – A autora (2022).

Para o ensaio de resistência à compressão simples, os tijolos foram serrados ao meio para a realização do processo de capeamento das faces superior e inferior, que consiste unir as faces através de uma camada fina de argamassa (aproximadamente 3mm) com cimento Portland e areia na proporção 1:1. Finalmente, após a argamassa endurecida, os tijolos foram submersos em água por um período de cura de 6 horas e, em seguida, ainda úmidos submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples. O referido ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da UNIPAMPA, com uma prensa hidráulica de capacidade máxima de 200 kN. A movimentação da carga ocorreu com uma velocidade de rompimento constante de 1 mm/s e, o ensaio foi cessado quando o valor da carga máxima começou a diminuir, apresentando fissuras visíveis nos tijolos. Na Figura 29, mostra-se a execução dos processos de corte, capeamento, cura e resistência à compressão simples nos tijolos maciços.



Figura 29. Etapas do ensaio de resistência à compressão simples no laboratório: (A) Corte; (B) Capeamento; (C) Espessura do capeamento de até 3mm; (D) Capeamento finalizado; (E) Processo de cura; (F) Compressão simples.

Fonte – A autora (2022).

4.2 Resultados dos ensaios de absorção de água e resistência a compressão simples nos tijolos maciços

A partir das orientações descritas na NBR 8492 (ABNT, 2012), foi possível calcular a porcentagem de absorção de água individual de cada tijolo analisado, a partir da Equação 3.

$$A = [(m2 - m1)/m1] \times 100 \quad (3)$$

Onde:

- *A*: a absorção de água, expressa em porcentagem (%);
- *m1*: a massa do corpo de prova seco em estufa, expressa em gramas (g);
- *m2*: a massa do corpo de prova saturado, expressa em gramas (g).

Na Tabela 6, são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água, nos tijolos de solo eólico-cimento-SCA.

Tabela 6. Absorção de água em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.

Tratamento	Tempo de cura (dias)	Massa seca em estufa – m1 (g)	Massa saturada – m2 (g)	Absorção de água (%)
T80-12-8	28	2013,27	2216,27	10,08
T80-12-8	28	1997,95	2184,70	9,35
T80-12-8	28	2005,53	2182,95	8,85
T80-10-10	28	1992,85	2178,38	9,31
T80-10-10	28	1979,85	2169,12	9,56
T80-10-10	28	1987,44	2183,77	9,88
T80-8-12	28	1953,87	2158,80	10,49
T80-8-12	28	2017,00	2212,12	9,67
T80-8-12	28	1950,23	2157,90	10,65

Fonte – A autora (2022).

Após conhecimento dos resultados individuais de absorção de água e, seguindo as orientações da normativa supracitada, foi calculado a média da absorção de água, em percentual, para cada um dos três tratamentos da mistura solo eólico-cimento-SCA (Tabela 7).

Tabela 7. Média da absorção de água em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.

Tratamento	Tempo de cura (dias)	Média absorção de água (%)
T80-12-8	28	9,43
T80-10-10	28	9,58
T80-8-12	28	10,27

Fonte – A autora (2022).

O tratamento T80-12-8 apresentou uma absorção de água média mais baixa, no valor de 9,43%, o que pode ser explicado pelo teor mais elevado de cimento (12%), quando comparado aos demais tratamentos (T80-10-10 e T80-8-12), que obtiveram valores médios de absorção de água maiores e crescentes, à medida que diminui o teor de cimento. Entretanto, todos os tratamentos atenderam ao valor mínimo estabelecido pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), onde a absorção média não deveria ser superior a 20%, nem apresentar valores individuais superiores a 22%;

Após a análise dimensional dos tijolos, os mesmos apresentaram dimensões de acordo com a normativa NBR 8492 (ABNT, 2012), não ultrapassando 1mm de variação nas três dimensões, com valor médio de 20,0 cm x 10,0 cm x 5,0 cm (comprimento x largura x altura).

Na Tabela 8, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples dos tijolos maciços, onde para cada tratamento é acompanhado do tempo de cura e do seu respectivo teor de umidade real da amostra (w%).

Tabela 8. Resistência à compressão simples em tijolos maciços de solo eólico-cimento-SCA.

Tratamentos	Tempo de cura (dias)	Teor de umidade (w%)	Resistência (MPa)
T80-12-8	28	6,13	8,47
T80-12-8	28	6,13	10,63
T80-12-8	28	6,13	5,21
T80-12-8	28	6,13	8,14
T80-12-8	28	6,13	9,29
T80-12-8	28	6,13	8,08
T80-12-8	28	9,45	13,16
T80-12-8	28	9,45	8,34
T80-12-8	28	9,45	6,69
T80-12-8	28	9,45	10,60
T80-10-10	28	8,59	11,94
T80-10-10	28	8,59	11,11
T80-10-10	28	8,59	7,11
T80-10-10	28	8,41	8,79
T80-10-10	28	8,41	10,98
T80-10-10	28	8,41	9,79
T80-10-10	28	8,41	8,48
T80-8-12	28	8,30	9,71
T80-8-12	28	8,30	7,49
T80-8-12	28	9,15	7,56
T80-8-12	28	9,15	7,84
T80-8-12	28	9,15	6,43
T80-8-12	28	9,15	8,18
T80-8-12	28	9,15	7,85

Fonte – A autora (2022).

Embora a Tabela 8 apresente os teores de umidade real das amostras, inicialmente os mesmos foram estimados e preparados a partir do teor de umidade ótimo característico de cada tratamento. No entanto, devido à moldagem dos tijolos acontecer em ambiente sem controle de temperatura, não foi possível manter o teor de umidade de maneira precisa. Além disso, apesar

de determinados os teores de umidades para cada tijolo no momento da moldagem e, como não foram marcados os tijolos de acordo com ordem de confecção (o que proporcionaria saber precisamente a umidade individual de cada tijolo); para fins de registros, utilizou-se o valor médio das umidades determinadas no dia. Apesar disso, a variação da umidade dos tijolos não afetou drasticamente a resistência à compressão simples.

Conforme observado na Tabela 8, o tratamento T80-12-8 da mistura “solo eólico + cimento + SCA”, apresentou uma resistência mínima de 5,21 MPa e máxima de 13,16 MPa (sob tempo de cura de 28 dias). Os valores de resistência do tratamento T80-12-8 apresentaram uma maior variabilidade se comparados aos outros tratamentos (T80-10-10, T80-8-12); isso se deve provavelmente ao fato de ser o primeiro tratamento testado da mistura, envolvendo assim, a familiarização com a confecção dos tijolos, variação do teor de umidade devido à temperatura ambiente não ser controlada, dificuldade em realizar o capeamento de maneira uniforme; sendo esses processos melhorados em acurácia para os demais tratamentos (T80-10-10 e T80-8-12). O tratamento T80-10-10 apresentou valores de resistência à compressão mínima de 7,11 MPa e máxima de 11,94 MPa. E por fim, o tratamento T80-8-12 com 6,43 MPa de resistência à compressão mínima e 9,71 MPa de máxima, apresentando menores valores individuais do que os demais tratamentos e, o que pode ser explicado pelo fato da mesma possuir menor teor de cimento (8%). Os tratamentos T80-10-10 e T80-8-12 apresentaram uma menor variabilidade nos resultados individuais.

A partir dos resultados individuais do ensaio de resistência à compressão simples de cada tijolo e, seguindo as orientações da normativa NBR 8492 (ABNT, 2012), foram calculados os valores médios da resistência de cada lote (tratamento) de tijolos, sendo apresentados na Figura 30.

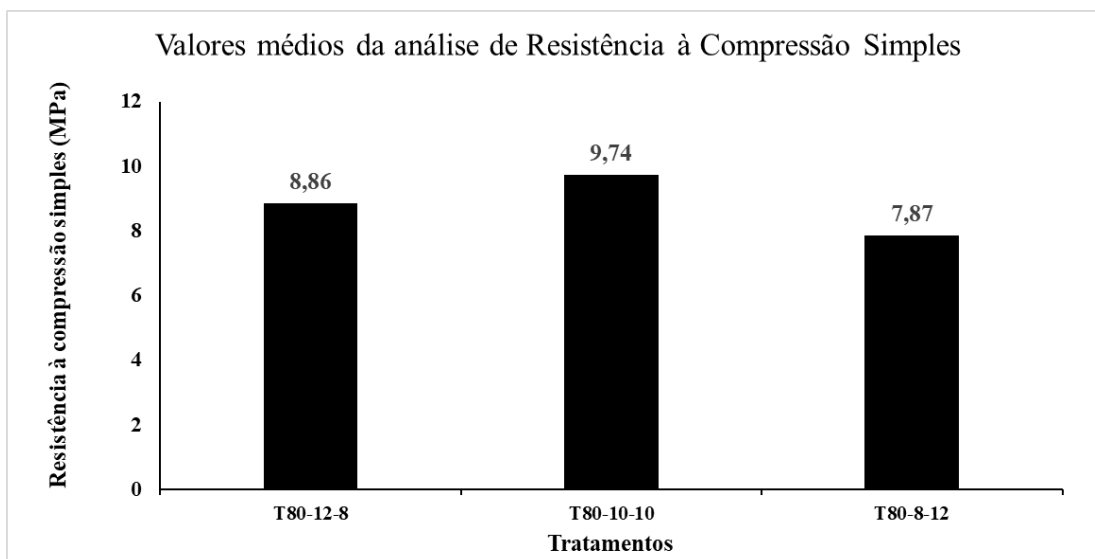


Figura 30. Valores médios da análise de resistência à compressão simples dos tijolos correspondentes aos tratamentos T80-12-8, T80-10-10 e T80-8-12.

Fonte – A autora (2022).

O tratamento T80-10-10 apresentou em média uma melhor resistência à compressão simples (9,74 MPa), quando comparado ao tratamento T80-12-8, que apresentou valor médio de 8,86 MPa e, ao tratamento T80-8-12 que apresentou valor médio de 7,87 MPa. Entretanto, todas os tratamentos atenderam aos requisitos mínimos estabelecidos pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), onde é preciso obter valor médio igual a 2,0 MPa (20 kgf/cm²), de modo que nenhum dos valores individuais estivesse abaixo de 1,7 MPa (17 kgf/cm²).

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, conclui-se que:

a) O solo eólico estudado apresentou granulometria muito uniforme, com coeficiente de uniformidade de 2,67. Pela classificação SUCS, o mesmo é definido como uma areia mal graduada (SP); para a classificação TRB, o solo eólico é definido como A-3, sendo um solo granular.

b) Baseado nas exigências da normativa NBR 10833 (ABNT, 2013), o solo eólico estudado apresentou-se adequado para a fabricação de tijolos quando misturado com cimento e sílica da casca de arroz.

c) Quando submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, todos os tratamentos com valores de teor de sílica da casca de arroz variando de 0 a 12% atenderam ao requisito exigido pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), quanto à resistência à compressão simples.

d) Os tratamentos utilizados nos corpos-de-prova cilíndricos moldados sob Energia de Proctor Modificada apresentam maior densidade da massa específica seca máxima e, conseqüentemente, valores superiores de resistência à compressão simples do que os moldados sob Energia de Proctor Normal.

e) Para a maioria dos tratamentos de solo eólico + cimento + sílica de casca de arroz (T88-12, T80-12-8, T85-7,5-7,5 e T80-8-12) estudados nesta pesquisa, verificou-se que as resistências máximas de pico obtidas a partir da interpolação dos corpos-de-prova compactados, não correspondem especificamente aos parâmetros de compactação. Só o tratamento T80-10-10 apresentou correlação direta entre o comportamento da curva de resistência e curva de compactação, tanto para Energia Normal e Energia Modificada, correspondendo os picos de resistência máxima aos parâmetros de compactação.

f) Com base nos resultados experimentais, pode-se dizer que a resistência máxima à compressão simples, da mistura solo eólico-cimento-SCA, pode ser influenciada e condicionada por um teor de umidade ideal necessário para ocorrência das reações químicas, pelo tempo e condições de cura, inclusive pela própria proporção dos materiais sólidos e, também, pela energia de compactação aplicada.

g) Todos os lotes de tijolos maciços confeccionados a partir dos tratamentos T80-12-8, T80-10-10 e T80-8-12 (solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz) atenderam à resistência à

compressão mínima estabelecida pela normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), com valor médio superior a 2,0 MPa (20 kgf/cm²), e nenhum valor individual abaixo de 1,7 MPa (17 kgf/cm²).

h) O uso da sílica da casca de arroz (SCA) possibilitou a redução do consumo de cimento em misturas com solo eólico, podendo ser utilizada como aditivo na confecção de tijolos maciços de solo-cimento.

i) Os valores de absorção de água dos tijolos maciços correspondentes aos tratamentos T80-12-8, T80-10-10 e T80-8-12, da mistura solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz, atenderam à normativa NBR 8491 (ABNT, 2012), onde a absorção média não foi superior a 20%, nem apresentou valores individuais superiores a 22%.

j) Pelos resultados obtidos na confecção de tijolos, o tratamento T80-10-10 da mistura solo eólico-cimento-sílica de casca de arroz, apresentou melhores desempenhos em termos de resistência e absorção da água, se comparado aos tratamentos T80-12-8 e T80-8-12.

k) Finalmente, considerando que todos os tratamentos apresentaram valores de resistências e de absorção de água de acordo com o exigido pela NBR 8491 (ABNT, 2012), para fins de confecção de tijolos, destaca-se o tratamento T80-8-12, por envolver menor concentração de cimento na mistura de solo eólico-cimento-sílica de casca de arroz.

6 SUGESTÓES

Como propostas para futuras pesquisas, sugere-se:

a) A realização do ensaio de ultrassom nos tijolos maciços de solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz. O ensaio de ultrassom segue as orientações da NBR 8802 (ABNT, 2019) e permite avaliar as propriedades elásticas dos materiais, a resistência à compressão e detectar possíveis defeitos na estrutura física dos tijolos, além de permitir o acompanhamento das mudanças ocorridas ao longo do tempo de cura, através da velocidade e do tempo de propagação da onda ultrassônica; o ensaio deve ser realizado, pelo menos, nas idades de 0, 7, 14, 21 e 28 dias.

b) Confeccionar tijolos maciços de solo-cimento e adicionar outro material alternativo como aditivo, tais como a cinza proveniente da queima da casca de arroz pelo método de combustão em cascata e comparar com os resultados obtidos neste trabalho;

c) Avaliar a viabilidade econômica na fabricação de tijolos maciços de solo-cimento-sílica da casca de arroz;

d) No decorrer do trabalho, para confecção de tijolos furados foi realizada a tentativa de utilizar uma prensa manual, entretanto, não houve sucesso devido à fragilidade em que se apresentavam os tijolos após a prensagem, sem conseguir retirar os mesmos da prensa. Dessa forma, considerando que na tentativa de prensagem utilizou-se o teor de umidade ótimo do tratamento, recomenda-se para pesquisas futuras, utilizar a mistura solo eólico-cimento-sílica da casca de arroz sob diferentes teores de umidade, até encontrar a umidade em que permita retirar os tijolos da prensa sem ser danificados. Posteriormente, testar a resistência à compressão simples e absorção de água desses tijolos, comparando com os tijolos maciços confeccionados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. Boletim Técnico BT-111. São Paulo, 2000. 19 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 6459**. Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 8491**. Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR 8492**. Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR 8802**. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

____. **NBR 9604**. Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 10833**. Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

____. **NBR 12023**. Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2012.

____. **NBR 12025**. Solo-cimento - Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 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**, 12 (5). 2019.

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

AL-AGHBARI, M. Y.; MOHAMEDZEIN, Y. E. A.; TAHA, R. Stabilisation of desert sands using cement and cement dust. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Group Improvemet**, 162(3), p. 145-151. 2009.

AL-KARNI, A.; ELKHOLY, S. M. Improving Geotechnical Properties of Dune Sands through Cement Stabilization Awad. **Journal of Engineering and Computer Sciences**, 5(1), p. 1–19. 2012.

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**, 14(2). 2013.

AMARAL, M. C. **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento**. 2014. 101p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Campos dos Goytacazes, 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM D 854**. Estados Unidos. 2014.

BINDA, A. L.; VERDUM, R. Reflexões Interpretativas sobre as Manchas de Areia do Sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil: Da Desertificação a Arenização. **In: Boletim Goiano de Geografia**, 2015. v. 35, n. 2, p. 273-288.

BURIOL, T. L. **Caracterização de jazidas para construção de habitações populares, com solo-cimento.** 2002. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CAMPAGNOLO, L. B.; TAPAHUASCO, W. F. C.; ALMEIDA, F. R.; ODY, L. P. **Melhorias de solos eólicos da Região da Campanha Gaúcha sob adição de cimento.** In: 16º Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental, 2018.

DUARTE, A.C.; FILHO, E.A.P. **A Intensificação da Arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul: Ações Antrópicas e Políticas Educacionais.** 2005. In: III Simpósio Nacional de Geografia Agrária, 2005.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo.** Brasília, 2017. 577p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.** 2 ed. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 306p.

FERREIRA, R.C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termo físicas de tijolos e mini painéis de terra crua tratada com aditivos químicos.** 2003. 204 p. Tese (Doutorado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FREITAS, C. A; GOULART, D. D; ALVES, F. D. **O processo de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: Uma alternativa para seu desenvolvimento sócio econômico.** 2007. Universidade Federal de Santa Maria. 16p. Santa Maria – RS. 2007.

GHRIB, A.; MITICHE-KETTAB, R.; BALI, A. Stabilization and utilization of dune sand in road engineering. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 39(3), 1517–1529. 2012.

GOMES, C. M; MARTON, L. F. Concreto de Cimento Portland Tipo III e Sílica Da Casca Do Arroz (SCA): Uma Contribuição à Sustentabilidade. 2015. **Anais...** 57º IBRACON, CBC2015, Brasil. 10p.

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

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea^a University of Technology, 2013.

MILANI, A. P. D. S. **Avaliação físico-mecânica de tijolos de solo-cimento e de solo-cal adicionados de casca de arroz**. 2005. 131p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 2005.

MÓSENA, M. **Agricultura em Áreas Frágeis: As Transformações decorrentes do Processo de Arenização em São Francisco de Assis/RS**. 2008. 175f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Econômicas; Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

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, 2010.

PEDRON, F. A.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos Arenosos do Bioma Pampa Brasileiro**. Editora UFSM, 2019. 278p.

RIBEIRO, J.C; VERDUM, R. **Arenização, silvicultura e políticas ambientais no sudoeste do Rio Grande do Sul**. 22p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.

RUVER, C. A.; MACHADO, C. R.; AUGUSTO, C.; BASTOS, B. Viabilidade técnico econômica da areia eólica estabilizada com agentes aglomerantes para emprego em pavimentação. 2013. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 1 n. 21, p.13-24. 2013.

SANTOS, A. F. R. D.; BAUMGART, L. N.; WOICIOKOSKI, M.; JUNIOR, O. T.; JATZAK, S.; NICOLETTI, V. **Utilização de resíduos da construção civil em tijolos ecológicos**. 20p. Santa Catarina: Associação do Vale do Itajaí Mirim, 2009.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1ª ed. São Paulo: Pini, vol. I, 779p. 2001.

SHOOSHPASHA, I.; SHIRVANI, R. A. Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. 2015. **Geomechanics and Engineering**, 8(1), p. 17–31.

SOUZA, I. B. M.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, A. J. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, 12 v, n. 2, p. 205 – 212, 2008.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A Trajetória da Natureza: um estudo geomorfológico sobre os áreas de Quaraí-RS**. São Paulo: USP, 1987. 243p. Tese de doutorado: Universidade de São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, BR-SP.

SUERTEGARAY, D. M. A. Erosão Nos Campos Sulinos: Arenização no Sudoeste Do Rio Grande Do Sul. 2011. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 61–74, 2011.

SUERTEGARAY, D. M. A.; VERDUM, R.; BELLANCA, E. T.; UAGODA, R. S. Sobre a gênese da arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul. 2005. **Terra Livre**, Goiânia, ano 21, v.1, n. 24, p. 135-150, 2005.

TIWARI, S. K.; SHARMA, J. P.; YADAV, J. S. Akademia Baru Behaviour of Dune Sand and its Stabilization Techniques. 2016. **Journal of Advanced Research in Applied Mechanics**. ISSN, 19(1), 2289–7895.

VALENCIANO, M. D. C. M. **Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento**. 1999. 115p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, 1999.

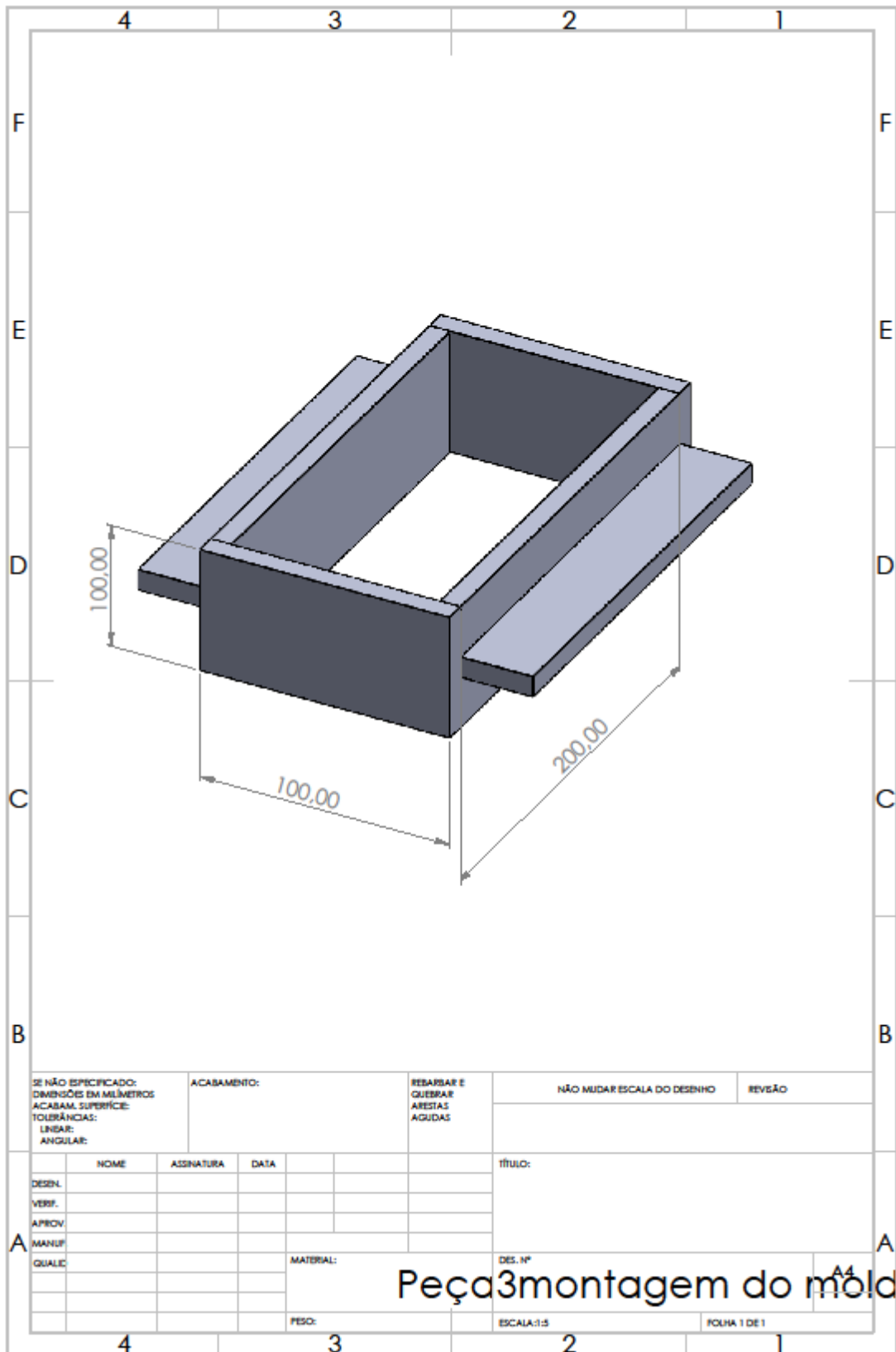
VESSOZI, C. S. **Estudo da viabilidade de fabricação de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de casca de arroz**. 2016. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

VIEIRA, C. L.; VERDUM, R. Arenização e erosão hídrica no sudoeste do Rio Grande do Sul: análise dos agentes condicionantes e considerações básicas para intervenções mecânico-vegetativas. 2015. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 32. n. 1, p. 41-65.

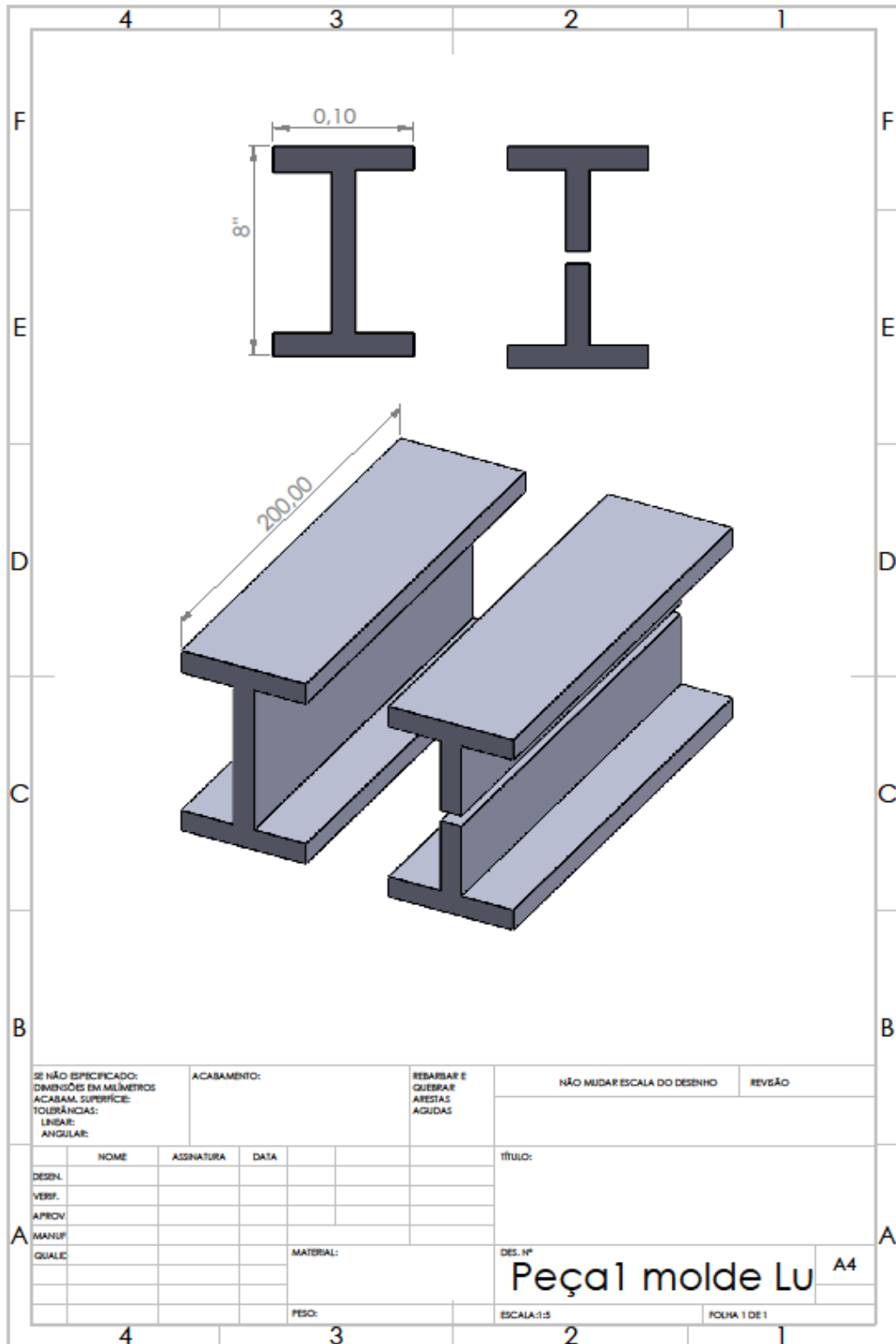
WEBER, E.; CAMPOS, R. F. F.; BORGA, T. Análise da eficiência do tijolo ecológico solo-cimento na construção civil. 2017. **Ignis**, Caçador, v. 6, n. 2, p.18-34.

APÊNDICES

APÊNDICE A1 – Detalhamento digital do molde completo utilizado na confecção dos tijolos maciços.



APÊNDICE A2 – Detalhamento digital das laterais do molde utilizado na confecção dos tijolos maciços.



APÊNDICE A3 – Detalhamento digital das peças durante a moldagem do molde utilizado na confecção dos tijolos maciços.

