

ESTUDO INICIAL DO USO DO FRUTO DE *Sapindus Saponaria* PARA ESTABILIZAÇÃO DE AREIA

Bruno Rocha Nunes

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

Gabriella Melo de Deus Vieira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

José Wilson dos Santos Ferreira

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

RESUMO

O estudo de novos estabilizantes de solo se torna cada vez mais relevante, considerando a necessidade de equilibrar critérios de sustentabilidade, desempenho, custo e redução de impactos ambientais. Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso do fruto da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico em matriz de areia. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização física da areia, ensaios mecânicos de compactação com 20 e 30% de adição do fruto, resistência à compressão simples (RCS) para diversos períodos de cura, ensaios não destrutivos de ultrassom, além da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A adição do estabilizante possibilita a compactação da areia, e a elevação do teor de incorporação reduz a densidade máxima seca e aumenta o teor de umidade ótimo. De maneira geral, observou-se aumentos significativos da RCS com os períodos de cura para ambos teores, devido ao efeito de aglutinação promovido pelo estabilizante e presença de substância química preenchendo os vazios, conforme observado na MEV. A aplicação de deformações antes da cura dos corpos de prova (CPs) mostrou pouca influência na RCS quando comparado com o teor de umidade. A correlação entre os resultados de ultrassom e RCS apresentou baixa eficiência, devido a variabilidade do estabilizante natural. A partir dos resultados obtidos, evidencia-se o potencial técnico e ambiental do uso da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico para fins geotécnicos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilizante, areia, fruto, *Sapindus saponaria*.

ABSTRACT

The study of new soil stabilizers is becoming increasingly relevant, considering the need to balance sustainability, performance, cost, and environmental impact reduction criteria. This work aims to evaluate the use of the fruit of the Sapindus saponaria plant as an organic stabilizer in a sand matrix. For this purpose, physical characterization tests of the sand were carried out, mechanical compaction tests with 20% and 30% fruit addition, unconfined compressive strength (UCS) tests for different curing periods, non-destructive ultrasonic tests, and scanning electron microscopy (SEM) analyses. The addition of the stabilizer enabled the compaction of the sand, and increasing the incorporation content reduced the maximum dry density while increasing the optimum moisture content. Overall, significant increases in UCS were observed with curing time for both addition levels, due to the agglutination effect promoted by the stabilizer and the presence of a chemical substance filling the voids, as observed in SEM analyses. The application of deformations before curing the specimens (CPs) showed little influence on UCS when compared to the influence of moisture content. The correlation between ultrasonic test results and UCS showed low efficiency due to the variability of the natural stabilizer. Based on the results obtained, the technical and environmental potential of using the Sapindus saponaria plant as an organic stabilizer for

*Autor correspondente: unbsb061@gmail.com

geotechnical purposes is evidenced.

KEYWORDS: *Stabilizer, sand, fruit, Sapindus saponaria.*

1. INTRODUÇÃO

A expansão urbana e o crescimento das infraestruturas demandam melhorias nas condições do solo para diversas obras geotécnicas, como contenção de encostas, aterros e pavimentação. Esse cenário impulsiona a necessidade de materiais de construção, como estabilizantes de solo, que contribuem para a adequação do terreno às condições locais (TAVARES, 2024). Com a crescente necessidade de vias mais duráveis e resistentes, setores como a construção civil e obras de infraestrutura têm adotado cada vez mais a estabilização de solos como uma solução eficaz para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade de terrenos inadequados. Entre as técnicas de estabilização química mais comuns, destacam-se o uso de cal, cimento e cinza volante, cada uma com características específicas. A estabilização com cal, por exemplo, é amplamente aplicada em solos argilosos e siltosos. A cal reage quimicamente com os minerais do solo, promovendo um aumento significativo da resistência, além de reduzir a plasticidade e a tendência à expansão. Esse processo envolve a formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, resultando em um solo mais estável e com maior capacidade de suporte, resistente tanto a variações climáticas quanto à carga estrutural (AZEVEDO, 2010). Além da estabilização com cal, outra técnica amplamente empregada é o solo cimento, que consiste na mistura de solo, cimento e água, seguida de compactação e cura. A reação do cimento com a água e os minerais do solo forma compostos que aumentam a resistência do material, além de reduzir sua plasticidade e compressibilidade, sendo especialmente eficaz em solos granulares, onde a coesão, oriunda da cimentação entre as partículas é fundamental para a resistência da estrutura. Além das reações de hidratação e endurecimento do cimento, nas partículas finas do solo, o cimento provoca a flocculação ao redor das partículas, unindo o solo por meio do processo de cimentação (GARCIA; SANTOS; RIBEIRO, 2011). Por fim, a cinza volante, um resíduo da queima de carvão em usinas termelétricas, apresenta-se como uma alternativa viável para estabilizar solos com alto teor de cálcio. A cinza volante geopolimerizada atua como aglutinante, imobilizando as partículas de cálcio e prevenindo a formação de compostos prejudiciais,

como gesso e etringita, que podem causar fissuras. Isso resulta em uma microestrutura mais compacta e resistente, tornando o solo mais adequado para aplicações de grande impacto, como rodovias (BRITO; PARANHOS, 2017). No entanto, a produção de cimento envolve processos de combustão química e térmica, que são grandes responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO₂). Estima-se que mais de 4 bilhões de toneladas de cimento sejam produzidas anualmente, contribuindo com cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (LEHNE; PRESTON, 2018). Diante desse impacto ambiental, torna-se fundamental buscar alternativas mais sustentáveis.

Algumas dessas soluções incluem o uso de resíduos industriais reciclados, como micro-PET, para aumentar a durabilidade de materiais como o concreto asfáltico (HMA) (FERREIRA et al., 2022). Além disso, o uso de fibras naturais como reforço de solos tem ganhado destaque por sua menor pegada ambiental. Um exemplo é o emprego da fibra de coco, que, em proporções de 1,5%, resultou em aumento de 60% no ISC (Índice de Suporte Califórnia) em comparação com o mesmo solo sem fibras (MACHADO et al., 2024). Embora já existam estudos sobre o uso de diversos estabilizantes naturais, há uma lacuna significativa na literatura no que diz respeito ao uso do fruto triturado da *Sapindus saponaria* como estabilizante. A *Sapindus saponaria* é uma planta nativa com ocorrência confirmada em várias regiões da América Central. No Brasil, possui avistamentos na Bahia, Ceará, Espírito Santo, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás e Distrito Federal (EMBRAPA; CARVALHO, 2014). Neste último, foram feitos avistamentos em Brasília, Samambaia, Gama e Santa Maria. Especificamente em Santa Maria, foram avistados 119 exemplares frutificando. O fruto da *Sapindus saponaria* é utilizado como sabão e remédio para tratar diversas condições, incluindo úlceras, sarna, dores nas articulações, inflamações e lesões de pele causadas por fungos (TSUZUKI et al., 2007). Assim, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar as propriedades mecânicas e microestruturais de misturas de solo estabilizadas com *Sapindus saponaria*, propondo essa solução como alternativa sustentável para a engenharia.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais

A escolha do material recaiu sobre a areia, após resultados de teste indicarem maior eficiência em comparação à argila. A areia utilizada, vendida como areia fina, foi adquirida de distribuidores localizados em Brasília. Os frutos foram colhidos de algumas das árvores avistadas logo antes do período chuvoso, visando estocá-los em seu menor estado de umidade. Em seguida, a noz foi separada da semente e triturada. O material triturado foi então passado por uma peneira de 2 mm para padronizar o tamanho das fibras do fruto que foram utilizadas no solo (Figura 1).



Figura 1. (A) cacho colhido da árvore, (B) Frutos separados para triturar, (C) casca do fruto triturada e peneirada.

2.2 Caracterização da areia

Para a caracterização física da areia utilizada na moldagem dos CPs, foram realizados a análise granulométrica, conforme a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7181 (2025), e a determinação da massa específica dos grãos, segundo a NBR 17212 (2025). Os ensaios de granulometria foram realizados com o objetivo de identificar a distribuição das dimensões das partículas constituintes do solo e determinar a proporção de diferentes faixas granulométricas. Os ensaios foram conduzidos utilizando uma amostra de 1000g de areia, inicialmente passada pela peneira de 2mm. O material retido foi lavado para remoção dos finos e, em seguida, levado à estufa para secagem. Do material passante, foram separados 120g para o ensaio de sedimentação, que consistiu na imersão em uma solução de hexametáfosfato de sódio, e posterior agitação mecânica por meio de um dispersor. Após a dispersão, o material sedimentado foi transferido para uma proveta de 1000cm³, completada com água destilada. A proveta foi então agitada e, em ambiente de temperatura controlada realizaram-se as leituras do densímetro calibrado e da temperatura em

intervalos de tempo pré-estabelecidos, conforme o procedimento normativo. Para o ensaio de determinação da massa específica dos grãos do solo, foram utilizados três picnômetros de 500 mL devidamente calibrados. Inicialmente, 60 g de solo, previamente imerso em água por mais de 12 horas, foram colocados no dispersor mecânico por 15 minutos. Após o processo de dispersão, o material foi transferido completamente para os picnômetros. Estes foram, então, aquecidos e, após 15 minutos, submetidos a uma válvula de vácuo, com o objetivo de remover o ar dissolvido na água e nos vazios entre os grãos. Decorridos mais 15 minutos, os picnômetros foram preenchidos com água destilada até aproximadamente 2 cm abaixo da marca de calibração e colocados em ambiente de temperatura controlada para repouso. Após 24 horas, os picnômetros foram preenchidos até a marca de calibração e pesados. Com o peso total do conjunto e com a curva de calibração de massa do picnômetro em função da temperatura, foi possível calcular a massa específica dos grãos do solo.

2.3 Compactação

Os teores de casca escolhidos para o ensaio de compactação segundo a norma NBR 7182 (ABNT, 2025) foram de 20% e 30% em relação a massa seca de areia. Os teores foram escolhidos após verificar certa estabilidade de eficiência nessas proporções em testes preliminares. Utilizou-se um cilindro grande (ISC) e a energia aplicada foi normal. O ensaio foi realizado com o reaproveitamento do material, iniciado a aproximadamente 6% de umidade. As cascas foram inicialmente misturadas à areia na forma seca e, em seguida, a água foi adicionada, promovendo uma nova homogeneização. O material foi disposto em cinco camadas, sendo executados 12 golpes por camada com um soquete grande. Os parâmetros de compactação, i.e., teor de umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidos nesse ensaio foram utilizados nos ensaios subsequentes. A Figura 2 contém uma foto da mistura compactada no último ponto do ensaio de compactação do teor de 30% de casca.



Figura 2. (A) material separado para mistura, (B) compósito compactado, (C) textura do compósito.

2.4 Comportamento mecânico e Microscopia

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado em triplicata conforme a norma NBR 1227 (ABNT, 2016), para tempos de cura seca ao ar de 14, 21 e 28 dias. Os corpos de prova, com dimensões de 50,1mm de diâmetro e 100,0mm de altura, foram moldados a partir de compactador miniatura. Durante a moldagem, foram aplicados 5 golpes com o soquete pequeno em uma camada (DER-ME 228, 1994). A aplicação da carga axial foi conduzida a uma velocidade de 1,00 mm/min, submetendo os corpos de prova a deformações de até 10%, exceto os CPs de 14 dias de cura, que foram submetidos a deformações menores para não danificar irreversivelmente a estrutura e inviabilizar o teste descrito a seguir. Os CPs com 14 dias de cura foram submetidos a deformações, e, nas fissuras resultantes, aplicou-se água para promover reidratação. Após esse processo, os CPs foram colocados em estufa a 40 °C para desidratação durante mais 14 dias. O objetivo desse experimento foi investigar uma possível propriedade regenerativa da resistência dos corpos de prova devido ao processo de reidratação. Foi medido também a massa e o tempo para a passagem de ondas ultrassônicas longitudinais com frequência de 60Hz emitido pelo equipamento Ultrasonic tester E46Controls, com tensão de emissão de 2,5 kV em intervalos ao longo de 28 dias de um corpo de prova com 30% de teor de casca a fim de obter o módulo de elasticidade a pequenas deformações. Com os dados de ultrassom e o comprimento do corpo de prova, foi possível calcular a velocidade da onda que atravessa o CP e entender o como ocorre o aumento de rigidez do material no intervalo estudado. A velocidade de uma onda sonora pode ser calculada pela fórmula $v = d/t$, onde v representa a velocidade, d é a altura do CP e t é o tempo gasto para percorrer essa

distância. Posteriormente, os dados foram plotados em um gráfico, e uma nova regressão foi realizada com o objetivo de verificar o valor de R^2 , ou seja, avaliar a correlação entre o tempo de cura e a velocidade da onda.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas a partir de uma pequena amostra fina, moldada sobre uma cápsula e submetida a secagem em estufa a 40°C por 24 horas, visando garantir a completa remoção de umidade do material.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização da areia

No ensaio de determinação da massa específica dos grãos, obteve-se um valor de 2,66 g/cm³ para o solo puro. Para o ensaio de granulometria, onde se observa a distribuição dos tamanhos de grãos, foi obtida a curva apresentada na Figura 3.

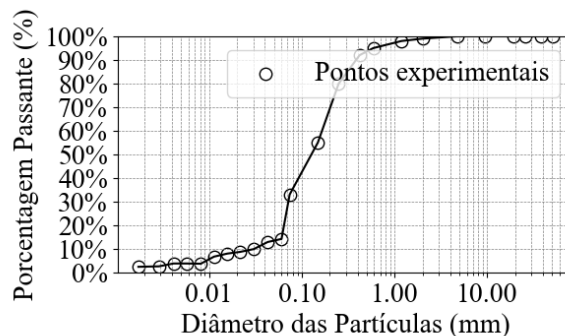


Figura 3. Distribuição granulométrica.

Os valores do coeficiente de uniformidade e do coeficiente de curvatura, conforme a Tabela 1, indicam que o material apresenta uma distribuição granulométrica mal graduada. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o solo em questão é classificado como arenoso de granulação grossa. Por ser areia, ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) não foram realizados, impedindo a classificação real do material pela SUCS. Contudo, com base no comportamento observado e na análise granulométrica, o solo pode ser interpretado como uma areia siltosa (SM).

Tabela 1. Dados da análise

d10 (mm)	d30 (mm)	d60 (mm)	Cu	Cc
0,031	0,072	0,0169	5,45	0,03

3.2 Parâmetros de compactação dos compósitos

Embora não seja possível construir a curva de compactação da areia pura, a adição do estabilizante permitiu a construção das curvas para os compósitos com 20 e 30% de adição. Esse comportamento pode ser atribuído à alta quantidade de material orgânico inserido na amostra, o que conferiu maior coesão ao material.

A Figura 4 ilustra um aumento do teor de umidade ótima acompanhado de uma diminuição da massa específica seca máxima à medida que o teor de adição aumenta.

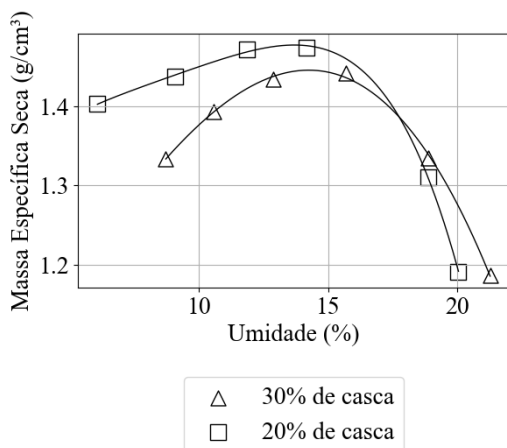


Figura 4. Curvas de compactação.

Esse aumento da umidade ótima pode ser explicado pela maior quantidade de fruto que demanda mais água para ser hidratada e atingir o ponto ótimo. A redução da massa específica, por sua vez, é causada pela baixa densidade do fruto, que ao ocupar um volume maior, diminui a densidade global da amostra. A tabela 2 indica os pontos de umidade ótima e densidade seca máxima para ambos os teores. A amostra com 20% de fibra apresentou menor variação no ramo seco em comparação à amostra com 30%, o que era esperado, uma vez que maiores concentrações de material vegetal impacta de forma mais expressiva o processo de compactação.

Tabela 2. Dados das propriedades dos materiais

20%		30%	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Wmax	13,7%	Wmax	14,3%
γd	1,48 g/cm ³	γd	1,45 g/cm ³

3.3 Comportamento mecânico e Microestrutural

Nos ensaios de resistência à compressão não confinada realizados com 14 dias de cura, todos demonstraram comportamento plástico em baixas deformações, com um rompimento amortecido. Entre eles, os CPs compósitos com 20% de fibra apresentaram os melhores resultados mais satisfatórios em termos de resistência à compressão, superando aqueles com 30%, como evidenciado na Figura 5. Após 21 dias de cura, houve uma melhora significativa da RCS para ambos os teores de fruto em relação aos resultados de 14 dias. Embora, em média, os CPs com 20% tenham mostrado melhor desempenho, para condição particular com 30% de fibra demonstrou a maior resistência isolada, como mostrado na Figura 6. Para os corpos de prova de 28 dias, os resultados foram ainda mais favoráveis, com os CPs contendo 20% de fibra alcançando a maior resistência à compressão não confinada (Figura 8). O rompimento antes suave presente até os CPs de 28 dias se torna mais abrupto nos corpos de prova reidratados na fatura e submetidos a estufa por 14 dias o que proporcionou resistência de pico ainda maiores para todos os CPs.

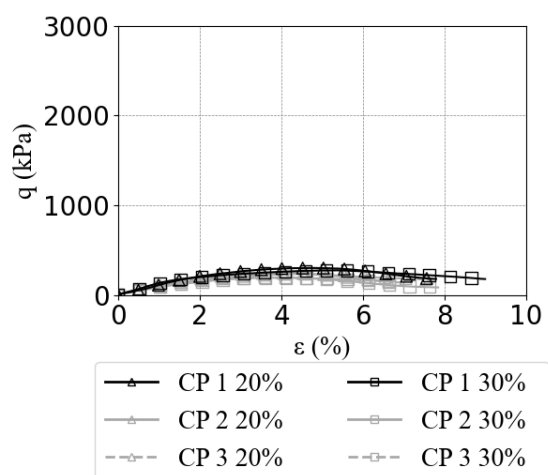


Figura 5. Curvas tensão-deformação das misturas de 14 dias de cura

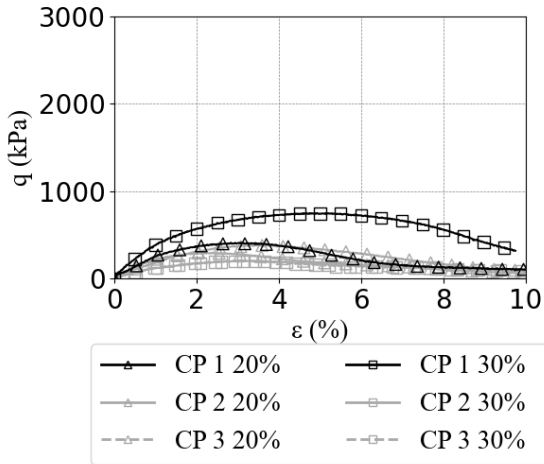


Figura 6. Curvas tensão-deformação das misturas de 21 dias de cura

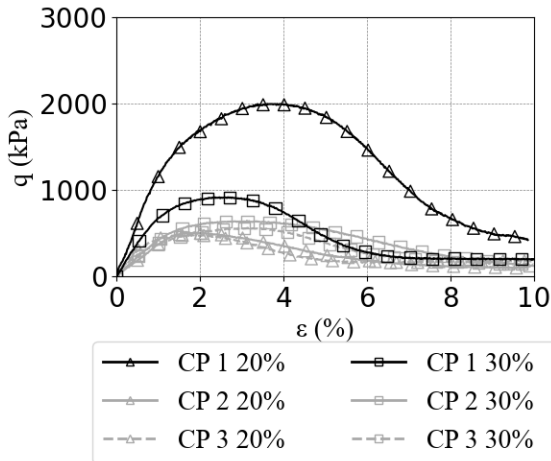


Figura 7. Curvas tensão-deformação das misturas de 28 dias de cura

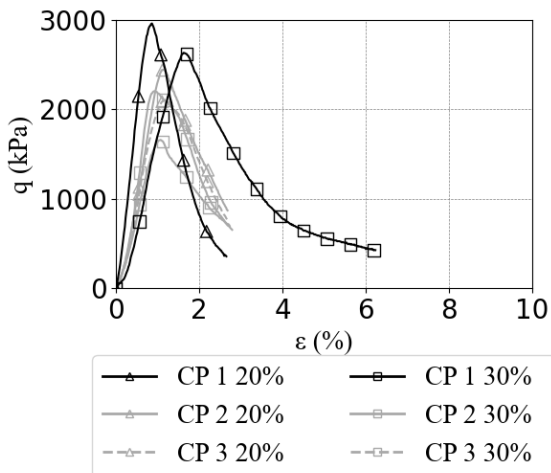


Figura 8. Curvas tensão-deformação das misturas de 14 dias de cura secas em estufa

Ao longo de todos os teores de fibra e tempos de cura avaliados, observou-se uma alta variabilidade nos resultados dos CPs. A figura 9 mostra o valor médio e a dispersão entre as triplicatas das resistências máximas à compressão simples (RCS).

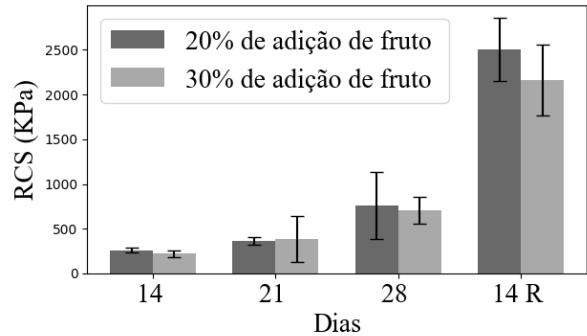


Figura 9. RCS médio e desvio entre as triplicatas, o termo "R" significa que ele foi submetido à recompressão.

Na Figura 10, foi correlacionada a velocidade de passagem da onda com o tempo de cura. Uma regressão linear indica um R^2 de 0,89, o que evidencia um bom ajuste, ou seja, uma boa correlação entre a velocidade da onda ultrassônica e o tempo de cura.

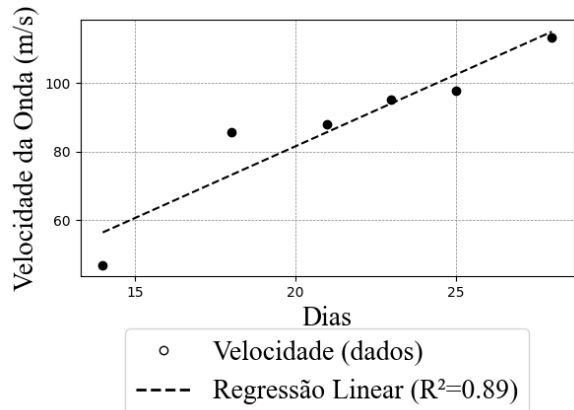


Figura 10. Variação da velocidade da onda ao longo do tempo de cura

A Figura 11, obtidas pelo MEV, revela a presença de uma substância, que ocupa os espaços vazios entre os grãos. A Figura 12 evidencia a aglutinação das partículas, enquanto a Figura 13 ilustra o efeito desse processo de aglutinação em ampliações maiores.

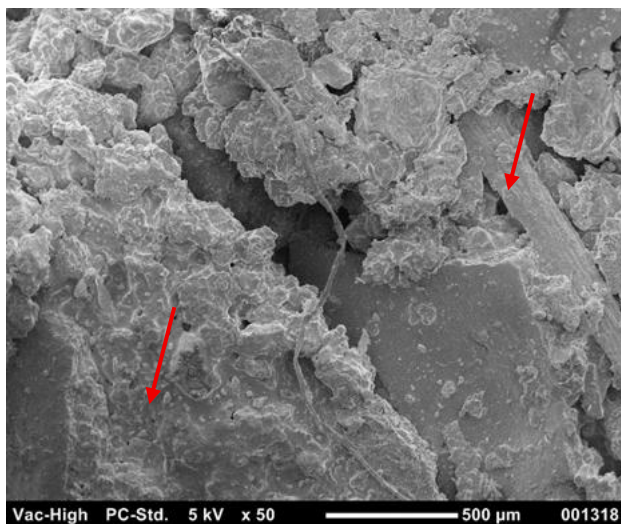


Figura 11. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 50x.

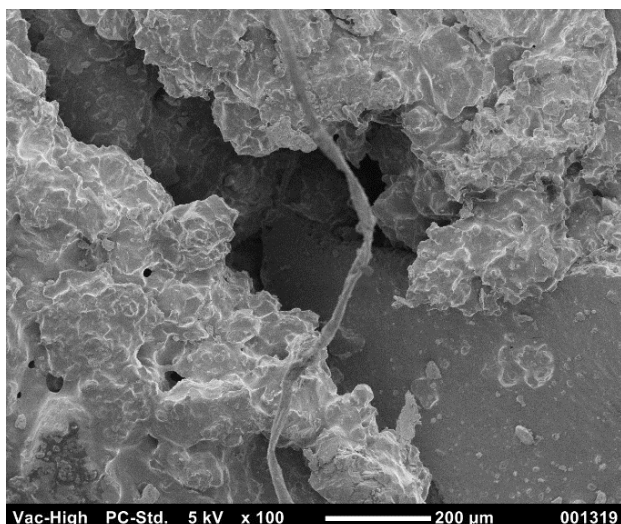


Figura 12. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 100x

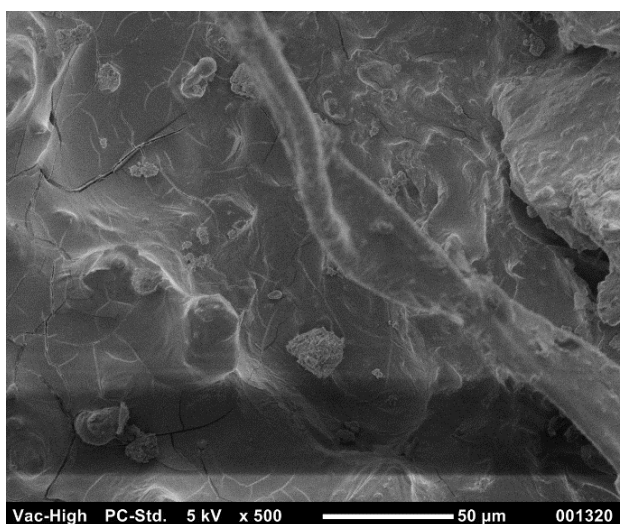


Figura 13. Imagens de microscopia eletrônica de varredura com ampliação de 200x

4. CONCLUSÕES

A utilização da planta *Sapindus saponaria* como agente de estabilização em areia demonstrou resultados promissores. Os compósitos estabilizados com o material vegetal apresentaram um aumento significativo na resistência à compressão, especialmente após períodos de cura, o que corrobora a viabilidade de seu uso em processos de estabilização de curto prazo em cura ao ar. Os ensaios de compactação mostraram que a adição de fibra vegetal alterou significativamente as propriedades do solo. O aumento no teor de fibra elevou a umidade ótima e reduziu a massa específica do solo, conforme esperado, devido à baixa densidade da fibra. Os ensaios de resistência à compressão indicaram que os corpos de prova com 20% de fibra tiveram o melhor comportamento mecânico, superando os compósitos com 30% de fruta. A resistência aumentou com o tempo de cura, sendo que os compósitos com 28 dias de cura apresentaram os resultados mais satisfatórios. Os resultados da recompressão dos CPs de 14 dias fissurados foram inconclusivos pois apesar de ter apresentado as maiores resistências de pico, não se pode afirmar que tenha sido devido a regeneração da área fissurada, porém se percebe que a resistência à compressão simples poderia ter fornecido resultados ainda melhores caso fosse fornecido mais tempo de cura. Dado a esse aumento gradual de resistência à compressão simples e pela alta variabilidade dos resultados entre os CPs, se espera que a resistência à compressão simples esteja mais ligada ao teor de umidade do CP que ao tempo fornecido para cura. Por fim, as imagens de microscopia eletrônica de varredura mostraram a presença de substâncias nos espaços vazios entre os grãos e a aglutinação das partículas, evidenciando o efeito de aglutinação dos grãos do solo pelas fibras. Esses resultados reforçam o potencial do uso do frutona estabilização de solos arenosos.

REFERÊNCIAS

- AZEVÉDO, A. L. C. Estabilização de solos com adição de cal. um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 11 2010. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/bitstreams/39d14354-87df-40d0-8f4c-87807366b00a/download>>. 2
- BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. Estabilização de solos. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 1, p. 425–438, 9 2017. ISSN 2448-

0959. Disponível em:
<<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao>>. 2

EMBRAPA; CARVALHO, P. E. R. Sabão-de-soldado. In: . [s.n.], 2014. v. 5, p. 489–496. Disponível em:
<<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/232181/1/Especies-Arboreas-Brasileiras-vol-5-Sabao-de-Soldado.pdf>>. 3

FERREIRA, J. W. dos S. et al. The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (pet) replacing natural sand in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 330, p. 127276, 5 2022. ISSN 09500618. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061822009564>>. 2

GARCIA, G. C. R.; SANTOS, E. M. B.; RIBEIRO, S. Efeito do tempo de cura na rigidez de argamassas produzidas com cimento portland. *Cerâmica*, v. 57, p. 94–99, 3 2011. ISSN 0366-6913. Disponível em:
<<https://www.scielo.br/j/ce/a/Kyr9ySPNHJNV7XbWWRRvgsC/>>.2

MACHADO, A. F. de S. M. R. et al. Análise da capacidade de suporte de um solo reforçado com fibra de coco. 2024. Disponível em:
<<https://cobramseg.com.br/evento/cobramseg2024/trabalhosaprovados/naintegra/64>>. 2

TAVARES, J. C. Trajetórias da infraestrutura no brasil. concepções, operacionalizações e marcos conceituais em perspectiva. *Cadernos MetrÓpole*, v. 26, p. 443–464, 5 2024. ISSN 2236-9996. Disponível em:
<<https://www.scielo.br/j/cm/a/tJMv9yGYZMTTLjzT7hDMqgx/>>.2

TSUZUKI, J. K. et al. Antifungal activity of the extracts and saponins from *sapindus saponaria* l. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 79, p. 577–583, 12 2007. ISSN 0001-3765.