XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/111

Potencial de uso do fruto da *Sapindus saponaria* como estabilizante natural para fins geotécnicos

Bruno Rocha Nunes
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, unbsb061@gmail.com

Jessé Corrêa Côrtes
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jessecortes19@gmail,com

Brenda Aparecida Ferreira De Aquino
Graduando em Engenharia Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, brendaferreira.aquino@gmail.com

Mateus Teixeira Crippa
Doutorando em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mateus.crippa@aluno.unb.br

Michéle Dal Toé Casagrande
Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

José Wilson Dos Santos Ferreira
Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, jose.wilson@unb.br

RESUMO: A busca por soluções ambientalmente sustentáveis na engenharia geotécnica tem impulsionado o desenvolvimento de estabilizantes alternativos que conciliem desempenho técnico e menor impacto ambiental. Nesse contexto, este estudo investigou o potencial do fruto da planta *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico em duas matrizes distintas: uma areia pura e um solo arenoso do Distrito Federal. Além dos ensaios de caracterização física, foram realizados ensaios de compactação, com teores de adição do fruto de 10, 15, 20 e 30% para a areia pura e 10% para o solo arenoso, ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e análises microestruturais por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados de compactação indicaram redução da densidade seca máxima com o aumento do teor de fruto, atribuída à sua baixa densidade, e comportamento distinto quanto à umidade ótima: aumento para a areia pura e redução para o solo arenoso, mesmo frente à elevada capacidade de absorção de água do fruto. Nos ensaios de RCS, verificou-se incremento de resistência para a areia, associado ao efeito de aglutinação promovido pelo estabilizante, enquanto para o solo arenoso, o qual já contém finos em sua matriz, não se observaram melhorias significativas, tendências essas que foram corroboradas pelas imagens de MEV. A variabilidade entre triplicatas aumentou com o teor de adição, refletindo a heterogeneidade do material natural. Os resultados demonstram o potencial técnico e ambiental do uso do fruto de *Sapindus saponaria* como estabilizante orgânico, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável para aplicações geotécnicas e abrindo perspectivas para o aproveitamento de recursos naturais renováveis em substituição a estabilizantes convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilizante orgânico; *Sapindus saponária;* Resistência à compressão simples; Microscopia Eletrônica de Varredura.

ABSTRACT: The search for environmentally sustainable solutions in geotechnical engineering has driven the development of alternative stabilizers that combine technical performance with lower environmental impact. In this context, this study investigated the potential of the fruit of the plant *Sapindus saponaria* as an organic stabilizer in two distinct matrices: a clean sand and a sandy soil from the Federal District (Brazil). In addition to physical characterization tests, compaction tests were performed with fruit addition contents of 10, 15, 20, and 30% for the clean sand and 10% for the sandy soil, along with unconfined compressive strength (UCS)

tests and microstructural analyses using scanning electron microscopy (SEM). The compaction results indicated a reduction in maximum dry density with increasing fruit content, attributed to its low density, and distinct behavior regarding optimum moisture content: an increase for the clean sand and a reduction for the sandy soil, despite the fruit's high water absorption capacity. In the UCS tests, an increase in strength was observed for the sand, associated with the agglomeration effect promoted by the stabilizer, whereas for the sandy soil—which already contains fines in its matrix—no significant improvements were observed; these trends were corroborated by the SEM images. Variability among triplicates increased with the addition content, reflecting the heterogeneity of the natural material. The results demonstrate the technical and environmental potential of using *Sapindus saponaria* fruit as an organic stabilizer, reinforcing its feasibility as a sustainable alternative for geotechnical applications and opening perspectives for the use of renewable natural resources to replace conventional stabilizers.

KEYWORDS: Organic stabilizer; *Sapindus saponaria*; Unconfined compressive strength; Scanning Electron Microscopy.

1 INTRODUÇÃO

A expansão populacional e urbana tem provocado mudanças significativas no meio ambiente, incluindo a alteração da cobertura do solo, a emissão de poluentes atmosféricos e a crescente demanda por recursos naturais, energia e moradia (SANTOS; JÚNIOR, 2021). Dentro desse contexto, a construção civil assume papel central, uma vez que, além de atender às necessidades habitacionais e produtivas, figura como uma das atividades que mais exploram recursos naturais e que mais geram resíduos sólidos (SANTOS, 2017). Estima-se que, em cidades com mais de 500 mil habitantes, os resíduos provenientes desse setor possam corresponder a aproximadamente 50% do total de resíduos sólidos urbanos em massa, englobando materiais como concreto, argamassa, cerâmica, madeira, metais e plásticos (SANTOS; JÚNIOR, 2021).

A disposição inadequada desses resíduos e de outros contaminantes químicos resulta em impactos severos, como mortandade de espécies aquáticas, aumento de doenças de veiculação hídrica, depreciação de áreas urbanas e elevação dos custos para recuperação ambiental (BARSANO; BARBOSA; VIANA, 2014). Além disso, o próprio processo produtivo de insumos básicos da construção, como o cimento, envolve elevado consumo energético e emissões atmosféricas relevantes. A produção de clínquer requer temperaturas superiores a 1.200 ℃, liberando poluentes que incluem material particulado, óxidos de nitrogênio e enxofre, além de compostos orgânicos persistentes como dioxinas e furanos, considerados tóxicos e de difícil degradação (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009).

No campo da engenharia geotécnica, a estabilização de solos é uma prática essencial para aumentar resistência, reduzir compressibilidade e diminuir permeabilidade em obras como aterros, pavimentos, barragens e barreiras de contenção. Tradicionalmente, essa estabilização é alcançada por compactação ou pelo uso de aditivos como cal e cimento, que embora eficazes, implicam em custos ambientais elevados devido à extração intensiva de recursos e à emissão de gases de efeito estufa (SANTOS; JÚNIOR, 2021). Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis, capazes de aliar desempenho técnico ao menor impacto ambiental.

Nesse sentido, tem-se observado um crescente interesse na utilização de resíduos ou subprodutos de origem natural como aditivos estabilizantes. Entre as opções estudadas, destacam-se fibras vegetais como coco, bambu e sisal, que contribuem para a melhoria do comportamento mecânico do solo, embora apresentem limitações relacionadas à variabilidade de propriedades e à degradação ao longo do tempo. Mais recentemente, plantas contendo compostos bioativos têm sido investigadas em razão de sua capacidade de interagir quimicamente com as partículas do solo e de apresentar maior resistência à biodegradação, influenciando a coesão e a retenção de água.

Tradicionalmente utilizada como sabão natural, antifúngico e fitoterápico, a *Sapindus saponaria* surge como alternativa pouco explorada, sendo uma espécie abundante em diferentes regiões do Brasil e apresenta perfil fitoquímico singular (MURGU; RODRIGUES- FILHO, 2006). Estudos com o mesocarpo do fruto indicam a presença de diversas saponinas triterpênicas e oligoglicosídeos sesquiterpênicos, cujas concentrações alcançam, respectivamente, cerca de 110 mg g−1 (≈11% da amostra) e 540 mg g−1 (≈54%), valores obtidos a partir de extratos hidroalcoólicos (MeOH:H_2O, 3:2) submetidos a hidrólise alcalina

(MURGU; RODRIGUES-FILHO, 2006). Ressalta-se que tais proporções refletem a seletividade do solvente utilizado, isto é, enquanto a mistura hidroalcoólica favorece a extração de compostos de polaridade intermediária, um solvente aquoso tenderia a privilegiar oligoglicosídeos mais polares e a subestimar saponinas menos solúveis (MILANEZ; FERNANDES; PORTO, 2009).

Além disso, destaca-se que as saponinas presentes no fruto podem retardar processos de biodegradação devido à sua atividade antimicrobiana e tensoativa, o que contribui para maior estabilidade do material no tempo (GEORGE; PARIMELAZHAGAN; KUMAR, 2019). Paralelamente, a fração lipídica rica em glicerídeos tende a formar estruturas cristalinas rígidas durante a degradação, favorecendo a criação de uma matriz mais resistente (QI et al., 2021). Tais características reforçam a importância de compreender a interação entre a composição química do fruto e seu potencial papel como estabilizante de solo.

Assim, a investigação do uso de *Sapindus saponaria* triturada como aditivo em misturas de solo representa uma oportunidade de propor um estabilizante alternativo, sustentável e de base natural, unindo propriedades químicas intrínsecas a possíveis benefícios geotécnicos ainda pouco explorados na literatura.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de solos: areia fina comercializada em Brasília e solo arenoso da região do Distrito Federal. O estabilizante empregado foi o fruto de *Sapindus saponaria*, colhido antes do início do período chuvoso para minimizar seu teor de umidade. Após a coleta, a noz foi separada da semente e o fruto foi triturado. O produto resultante foi peneirado com malha de 2 mm, garantindo uniformidade do material incorporado aos solos.

2.2 Caracterização Física dos Solos

A caracterização física envolveu ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, com e sem uso de defloculante hexametafosfato de sódio, e determinação da massa específica dos grãos, seguindo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 17212 (2025) e NBR 7181 (2025).

A massa específica dos grãos foi determinada utilizando três picnômetros de 500 mL. Amostras de 60 g para o solo arenoso e areia foram imersas em água por 12 h e dispersas mecanicamente por 15 min. O material foi então transferido para os picnômetros, que foram aquecidos e submetidos a vácuo para remoção de ar dissolvido. Após 24 h em temperatura controlada, os picnômetros foram completados com água até a marca de calibração e pesados, permitindo o cálculo da massa específica dos grãos dos solos.

2.3 Ensaios de Compactação

Para a areia, foram avaliados os teores de 10%, 15%, 20% e 30% de adição da casca do fruto em relação à massa seca da areia, enquanto para o solo arenoso foi avaliado o solo puro e o teor de 10% de casca, selecionados com base em testes anteriores. Ressalta-se que, por se tratar de areia, não foi possível obter a curva de compactação para a situação pura, ao passo que no solo arenoso, por conter finos, a adição do fruto se deu em menor quantidade.

A compactação seguiu a norma ABNT NBR 7182 (2025), utilizando a energia normal de Proctor e cilindro padrão do ensaio. O material seco foi inicialmente misturado à casca e, em seguida, homogeneizado com água até atingir a umidade estimada. A compactação ocorreu em três camadas, aplicando-se 26 golpes por camada. Os valores de umidade ótima e massa específica seca máxima obtidos foram aplicados para moldar os corpos de prova na etapa de investigação do comportamento mecânico.

2.4 Comportamento Mecânico

A resistência à compressão simples foi determinada em triplicata, conforme a ABNT NBR 12270. Os corpos de prova foram moldados em molde Mini-MCV, com diâmetro de 50,0 mm e altura de 100,0 mm, compactando-os em três camadas e deixados em cura ao ar por 14 dias. Adotou-se como controle de compactação um grau de compactação (GC) ≥ 90% e desvio de teor de umidade ótima de ±5%.

Durante a cura, os corpos de prova tiveram seu peso monitorado ao longo da secagem, sendo o ensaio de ruptura realizado apenas após a estabilização da massa, de modo a garantir um teor mínimo de umidade. Para acelerar o processo de secagem, os corpos de prova foram expostos a lâmpadas de infravermelho, condição em que a temperatura se manteve próxima de 40 ◦C e a umidade relativa do ar em torno de 30%.

2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microestrutura do solo e a distribuição do estabilizante foram investigadas por microscopia eletrônica de varredura. Fragmentos de amostras foram coletados com aproximadamente 1 cm³ de volume para avaliação microestrutural do solo por meio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo JEOL JCM-5000 Neoscope, no laboratório de microscopia da Universidade de Brasília (LabMicro-UnB), operado sob a tensão de aproximação de 10 kV, permitindo observar a interação entre partículas do solo e fibras do fruto de *Sapindus saponaria*.

3 RESULTADOS

3.1 Ensaios de Caracterização

A caracterização dos materiais foi realizada a partir da massa específica dos grãos, análise granulométrica e, quando aplicável, determinação dos limites de consistência, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros granulométricos e de consistência dos solos estudados

Parâmetro	Areia	Solo Arenoso	
		Sem defl.	Com defl.
Massa específica dos grãos (g/cm3)	2,66	2,79	–
Fração areia (%)	83,79	58,14	50,02
Fração silte (%)	11,71	27,40	18,90
Fração argila (%)	3,50	14,46	31,08
LL (%)	–	34	–
LP (%)	–	21	–
IP (%)	–	13	–

A distribuição granulométrica da areia está representada na Figura 1, a partir da qual obteve-se os parâmetros d_{10} = 0,031, d_{30} = 0,072 e d_{60} = 0,169, bem como os coeficientes de uniformidade (C_u = 5,45) e de curvatura (C_c = 0,98). Os resultados indicam que o material possui granulometria mal graduada. Por se tratar de uma areia, não foram realizados os ensaios de limites de Atterberg, visto que o material não apresenta plasticidade.

Observa-se que, no caso do solo arenoso, a presença do defloculante promoveu a dispersão das partículas finas (silte e argila), resultando em maior porcentagem passante nas frações de diâmetro reduzido. Tal comportamento está associado à composição do solo arenoso, o qual apresenta 27,40% de silte e 14,46% de argila (Tabela 1). Na ausência do defloculante, ocorre a aglomeração das partículas finas por efeito das forças eletrostáticas e da presença de argilominerais, o que leva a uma curva granulométrica deslocada para maiores diâmetros aparentes. Com o uso do defloculante, essas partículas se dispersam adequadamente, evidenciando o real teor de finos do material.

Com base nos resultados de granulometria e nos limites de consistência, o solo arenoso foi classificado pelo sistema unificado de classificação dos solos (SUCS) como areia argilosa (SC). A Tabela 1 sintetiza os principais resultados obtidos para os dois materiais.

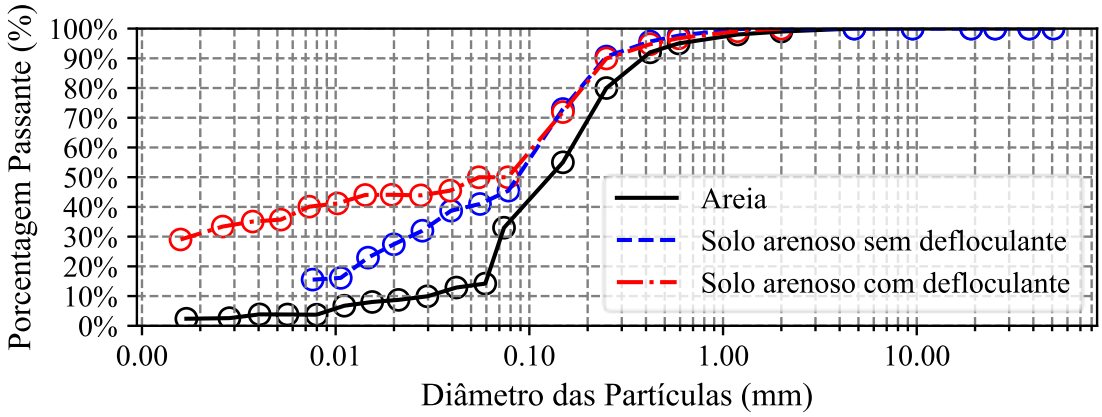


Figura 1. Distribuição granulometrica dos solos

3.2 Parâmetros de Compactação dos Compósitos

A partir das curvas de compactação para a areia e do solo arenoso estabilizados (Figura 2), observou-se que o aumento do teor de estabilizante resulta em deslocamento da umidade ótima para valores mais elevados e uma ligeira redução da massa específica seca máxima, evidenciando o efeito do material orgânico sobre o arranjo das partículas e densidade do compósito.

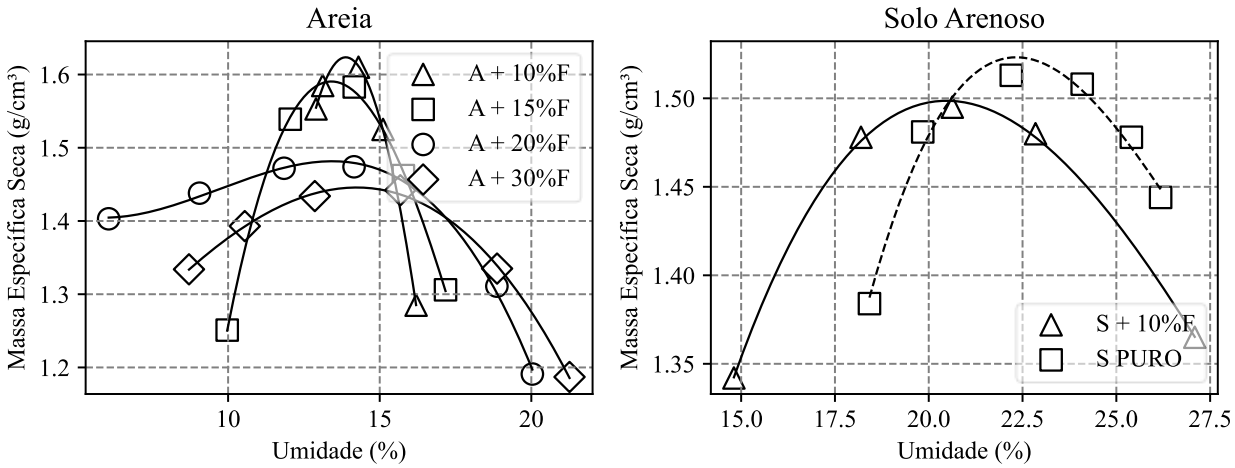


Figura 2. Curvas de compactação da areia e solo arenoso para diferentes teores de estabilizante

O aumento da umidade ótima no caso da areia está associado à maior quantidade de fruto presente, visto que, por se tratar de material natural, o fruto da planta *Sapindus saponaria* tende a absorver mais água para atingir o ponto de compactação ideal. Para o solo arenoso, observou-se que 10% produziu diminuição do teor de umidade ótima, possivelmente devido ao preenchimento de vazios pelo fruto. A diminuição da densidade seca máxima decorre da baixa densidade do material vegetal, que ocupa maior volume e reduz a densidade global da amostra.

A Tabela 2 resume os parâmetros de compactação obtidos para as condições investigadas. Observou-se que o solo com menor teor de estabilizante apresentou menor variação no ramo seco da curva, indicando que o aumento da concentração de fruto promoveu alterações mais significativas no comportamento de compactação, refletindo o efeito do material orgânico sobre a densidade e plasticidade do solo.

Tabela 2. Parâmetros de compactação

Condição	Umidade ótima W_{max} (%)	Massa específica seca ρ_d (g/cm^3)
Areia + 10%F	13,88	1,624
Areia + 15%F	13,41	1,591
Areia + 20%F	13,43	1,482
Areia + 30%F	14,24	1,446
Solo arenoso puro	22,33	1,523
Solo arenoso + 10%F	20,48	1,499

3.3 Comportamento Mecânico e Microestrutural

Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) são apresentados nas Figura 3, obtidos a partir de corpos de prova curados por 14 dias e ensaiados em triplicata, com o objetivo de avaliar o efeito do teor de fruto na resistência mecânica dos compósitos. Por se tratar de um estabilizante de origem natural, observou-se que a variabilidade inerente ao material afetou o comportamento tensão-deformação, de modo que, para um mesmo teor de fruto, foi observado comportamento frágil e plástico com a deformação.

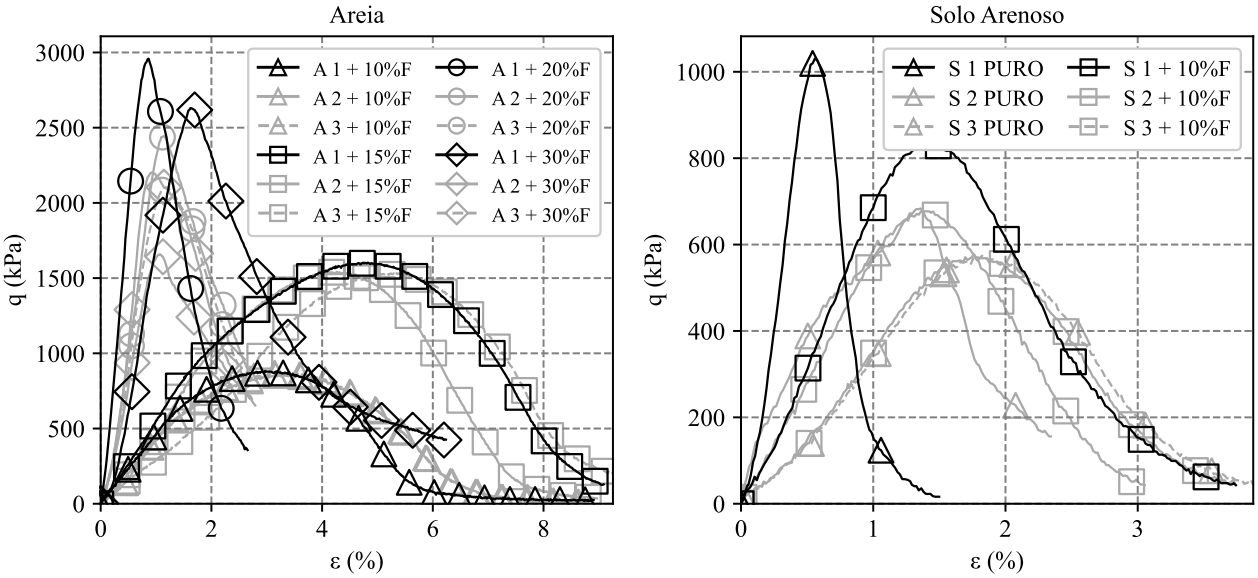


Figura 3. *Curvas tensão-deformação dos compósitos de areia e solo arenoso.*

Na Figura 4 são apresentados os valores médios de RCS obtidos, bem como a variabilidade apresentada entre as triplicatas. Pode-se notar que, quanto maior a quantidade de fruto adicionada, maior a variabilidade experimental. Para os compósitos de areia, o teor de 20% de adição de fruto resultou no maior valor médio de RCS. Em contraste, para o solo arenoso, observou-se menor variabilidade entre os ensaios, sem acréscimos significativos de resistência com a adição do estabilizante. Ressalta-se que, além da resistência à compressão simples avaliada neste estudo, a análise dos efeitos de durabilidade deve ser considerada em etapas futuras da pesquisa, especialmente tendo em vista aplicações voltadas ao controle de erosão.

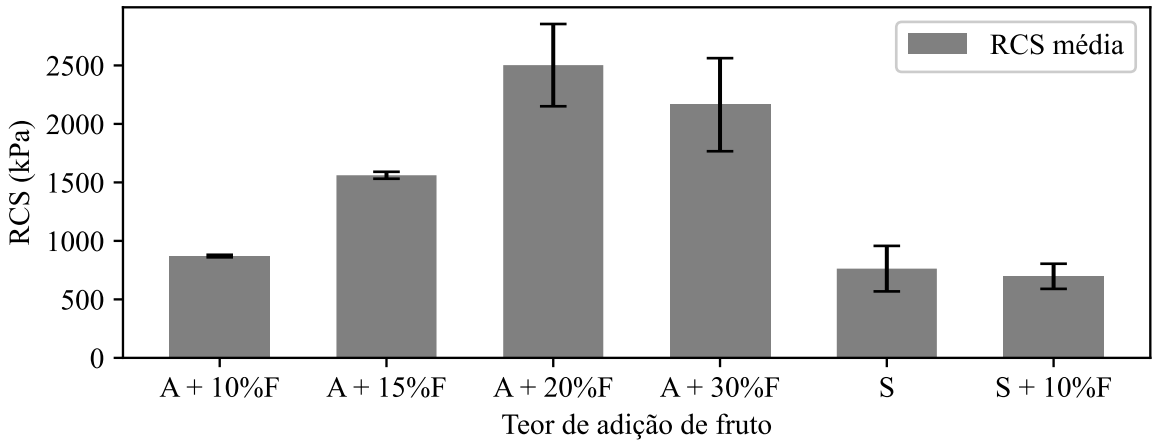
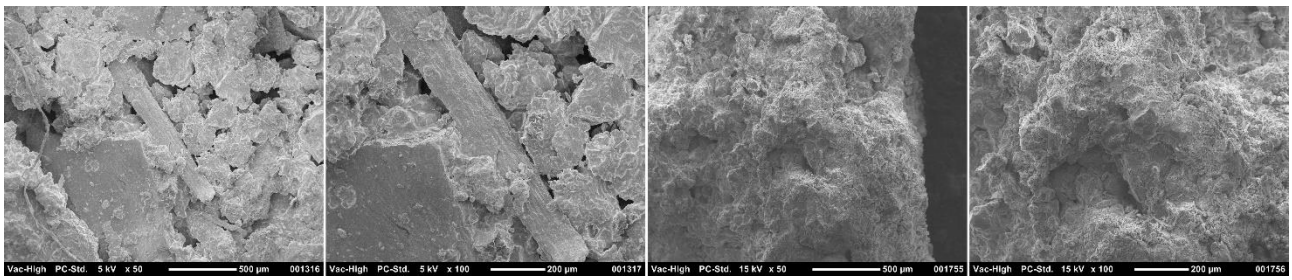


Figura 4. Valores médios de resistência à compressão e dispersão entre as triplicatas para todos os compósitos avaliados.

A análise da dispersão entre as triplicatas confirma a variabilidade inerente ao material, sendo essencial considerar a média e o desvio padrão para interpretação confiável dos resultados. As imagens de MEV das matrizes estabilizadas com o fruto de *Sapindus saponaria* são apresentadas na Figura 5. Por meio das imagens é possível observar a presença e interação do estabilizante nas matrizes. Percebe-se que na areia, devido a falta de argilomierais, distingue-se o fruto de maneira evidente, além da presença de vazios na matriz (Fig. 5a e 5b), ao passo que no solo arenoso (Fig. 5c e 5d), por conter fração de silte e argila, a matriz encontra-se mais agregada, entretanto, como observado nos resultados de comportamento mecânico, isso não se traduz em maior RCS.



(a) (b) (c) (d)

Figura 5. MEV das matrizes estabilizadas com fruto de Sapindus saponaria em diferentes ampliações: (a) Areia -50x, (b) Areia - 100x, (c) Solo arenoso - 50x, (d) Solo arenoso - 100x

4 CONCLUSÕES

A caracterização física e mecânica dos materiais investigados evidenciou diferenças marcantes entre a areia e o solo arenoso, relacionadas principalmente à composição granulométrica e ao comportamento frente ao uso do estabilizante natural proveniente do fruto de *Sapindus saponaria*. A areia apresentou granulometria mal graduada e ausência de plasticidade, enquanto o solo arenoso revelou frações significativas de silte e argila, refletidas em valores de limites de consistência e na necessidade de defloculante para adequada dispersão das partículas finas.

Os ensaios de compactação mostraram que a adição do estabilizante promoveu aumento da umidade ótima e redução da massa específica seca máxima, efeito associado tanto à capacidade de absorção de água do fruto quanto à sua baixa densidade. Esse comportamento se manifestou de forma distinta entre a areia e o solo arenoso, sendo que, no último, a presença de 10% de fruto indicou redução no teor de umidade ótima devido ao preenchimento de vazios.

No que se refere ao desempenho mecânico, os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) indicaram grande variabilidade nos resultados, característica inerente ao uso de estabilizantes naturais. Ainda

assim, verificou-se que para a areia, a adição de 20% de fruto resultou nos maiores valores médios de RCS, enquanto no solo arenoso não foram observados acréscimos significativos de resistência. As análises microestruturais confirmaram a interação do estabilizante com a matriz granular, destacando-se que no solo arenoso o arranjo mais agregado não resultou em ganhos de resistência.

De forma geral, os resultados apontam para o potencial do fruto de *Sapindus saponaria* como estabilizante alternativo em compósitos solo-estabilizante, sobretudo em solos não coesivos, embora sua aplicação demande atenção à variabilidade do material e ao efeito sobre as condições de compactação. Estudos complementares, investigando a durabilidade dos compósitos, diferentes tempos de cura e combinações com outros agentes estabilizantes, são recomendados para ampliar a compreensão do comportamento mecânico e aplicabilidade dos compósitos desenvolvidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF), pela bolsa de iniciação científica, auxílio financeiro e apoio à pesquisa no âmbito do Projeto SEI-GDF nº 00193-00001386/2024-04. Além disso, os autores agradecem o Laboratório de Micropaleontologia do Instituto de Geologia (IG) da Universidade de Brasília (UnB) pela realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 17212. *Solos – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Solos – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 127701. *Solo – Determinação da resistência à compressão não confinada de solos coesivos*. Rio de Janeiro.

Barsano, P. R.; Barbosa, R. P.; Viana, V. J. (2014). *Poluição Ambiental e Saúde Pública*. São Paulo: Érica, 2014. E-book. ISBN 9788536521695. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521695/>.

George, B. P.; Parimelazhagan, T.; Kumar, R. (2019). *Antimicrobial and anti-biofilm activities of triterpenoid saponins*. Journal of Applied Microbiology, v. 127, n. 1, p. 118–129.

Milanez, B.; Fernandes, L. d. O.; Porto, M. F. d. S. (2009). *A coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente*. Ciência & Saúde Coletiva, v. 14, n. 6, p. 2143–2152.

Murgu, M.; Rodrigues-Filho, E. (2006). *Dereplication of glycosides from Sapindus saponaria using liquid chromatographymass spectrometry*. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 17, n. 7, p. 1281–1290, 2006.

QI, X. et al. (2021). *Structural features and crystallization properties of glycerides in natural plant extracts*. Food Chemistry, v. 345, p. 128816.

Santos, A. S. P.; Júnior, A. A. O. (2021). *Engenharia e Meio Ambiente: Aspectos Conceituais e Práticos*. Rio de Janeiro: LTC. E-book. ISBN 9788521637523. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521637523/>.

SANTOS, M. A. (2017). *Poluição do Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: LTC. E-book. ISBN 9788521634140. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/ 9788521634140/>.