



Estudo Comparativo de Técnicas Para o Melhoramento de Solo Colapsível – Revisão da Literatura

Arthur Vinícius Freire Silva Ramos

Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil,
arthur_vinicios_@hotmail.com

Geovanna Karla da Silva Simões

Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil,
geovanna.simoes@ufpe.br

João Paulo Marçal de Souza

Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, joao.marcal@ufpe.br

Silvio Romero de Melo Ferreira

Professor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

Igor Fernandes Gomes

Professor, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, igor.fernandes@ufpe.br

RESUMO: Os solos colapsíveis apresentam diversas origens e seu comportamento é condicionado por diversos fatores, como trajetória de tensão, estrutura interna, umidade, vazão de inundação e velocidade de deformação durante o colapso. Comuns em regiões áridas e semiáridas, representam desafios à engenharia, causando trincas, rupturas e instabilidade em construções e infraestruturas. Diante das problemáticas associadas aos solos colapsíveis, o presente estudo tem como objetivo avaliar e comparar técnicas de melhoramento desses solos, por meio de uma pesquisa exploratória e um levantamento bibliográfico abrangente. Foram analisados diversos métodos, como compactação, colunas compactadas, adição de resíduo de construção civil (RCC), cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de esgoto. A pesquisa buscou identificar soluções eficazes para reduzir o risco de colapso desses solos e promover alternativas mais sustentáveis. Os resultados indicam que as técnicas de compactação e colunas compactadas foram as mais eficientes na redução do potencial de colapso, com índices de eficiência superiores a 90%. Além disso, o uso de materiais reciclados, como o RCC e a CCA, mostrou-se eficaz, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas dos solos, além de ser uma solução ambientalmente responsável.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Colapsíveis, Melhoramento de Solo, Estabilização de Solos, Patologias.

ABSTRACT: Collapsible soils have diverse origins and their behavior is influenced by several factors such as stress path, internal structure, moisture, flooding rate, and deformation velocity during collapse. Common in arid and semi-arid regions, they pose challenges to engineering, causing cracks, failures, and instability in buildings and infrastructure. In light of the problems associated with collapsible soils, the present study aimed to evaluate and compare improvement techniques for these soils through an exploratory investigation and a comprehensive literature review. Various methods were analyzed, including compaction, compacted columns, addition of construction and demolition waste (CDW), rice husk ash (RHA), and sewage sludge. The research sought to identify effective solutions to reduce the risk of soil collapse and promote more sustainable alternatives. The results indicated that compaction and compacted columns were the most efficient techniques in reducing collapse potential, with efficiency rates above 90%. In addition, the use of recycled materials, such as CDW and RHA, proved effective, contributing to the improvement of the soil mechanical properties while also being an environmentally responsible solution.

KEYWORDS: Collapsible Soils, Soil Improvement, Soil Stabilization, Pathologies.



1 INTRODUÇÃO

Os solos colapsíveis apresentam uma ampla variedade de origens, incluindo formações residuais, eólicas, coluviais, aluviais, saprolíticas, argilas porosas ou até mesmo solos compactados (VARGAS, 1985 *apud* SILVA, 2022). O comportamento desses solos é condicionado por diversos fatores, como trajetória de tensão, estrutura interna, umidade, vazão de inundação e a velocidade de deformação durante o colapso.

Esses solos são encontrados em diferentes partes do mundo, especialmente em regiões de climas áridos e semiáridos, e representam um grande desafio para a engenharia geotécnica. Problemas decorrentes dessas formações vão desde trincas e fissuras até colapso estrutural, além de comprometer infraestruturas como canais de irrigação, pavimentos rodoviários e taludes, nos quais podem surgir superfícies de escorregamento (MENDONÇA, 1990).

Dessa forma, diante das problemáticas associadas aos solos colapsíveis, o objetivo principal deste trabalho foi analisar, por meio de uma pesquisa exploratória e de um amplo levantamento bibliográfico, as soluções disponíveis para o melhoramento desses solos. A investigação abrangeu tanto as técnicas mais amplamente utilizadas quanto tratamentos inovadores, aplicados a diferentes tipos de solo, com o intuito de contribuir para a comunidade acadêmica ao oferecer um auxílio na escolha preliminar da solução mais adequada para cada localidade de estudo.

Entretanto, esta pesquisa enfrentou limitações relacionadas à escassez de publicações científicas no Brasil sobre técnicas de melhoramento de solos colapsíveis. Como consequência, nem todos os tipos de solo puderam ser analisados para as diferentes técnicas abordadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ocorrência de Solos Colapsíveis no Brasil

A formação dos solos colapsíveis resulta de uma combinação de fatores climáticos e características do ambiente geológico. Ferreira (1995) aponta que esses solos podem ser encontrados em diferentes tipos de depósitos: coluviais, eólicos, aluviais, bem como em solos residuais e vulcânicos. Ademais, Silva (2022) aponta a ocorrência registrada na literatura de solos colapsíveis em diversas regiões do país, sendo identificado predominantemente em formações aluviais, coluviais e residuais, como pode ser visto na Figura 1.

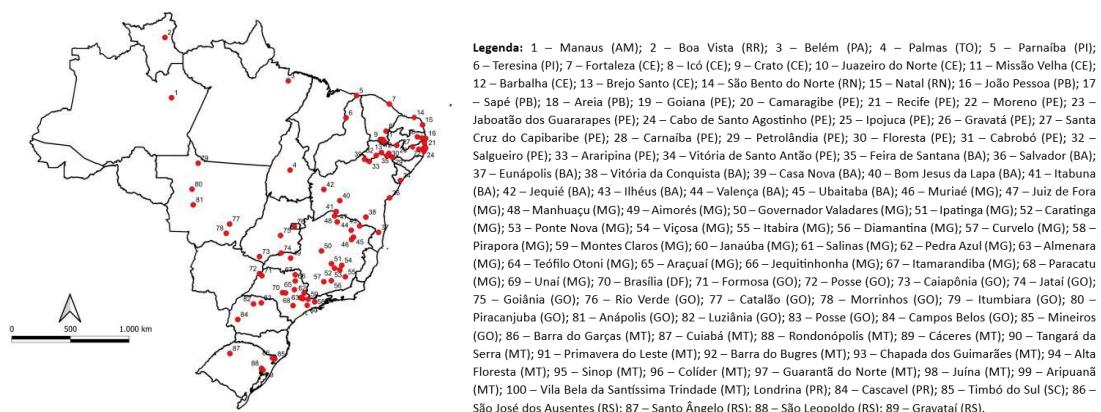


Figura 1. Ocorrência de solos colapsíveis no Brasil.

Ferreira (2008) *apud* Silva (2022).

Embora sua presença seja mais comum em áreas de clima árido e semiárido, especialmente em depósitos mais recentes, eles também podem ocorrer em outras condições climáticas e geológicas. Nesse sentido, segundo Silva (2022), a identificação desses solos geralmente está associada a obras de grande porte, como barragens, habitações coletivas e projetos voltados à irrigação, devido à extensão das áreas impactadas.

2.2 Solos Colapsíveis



2025

Os solos colapsáveis são influenciados por fatores climáticos e geológicos, sendo comuns em climas áridos e semiáridos, onde longos períodos de seca alternam com chuvas intensas e o lençol freático é profundo ou inexistente (SILVA E XAVIER, 2021). Além disso, regiões tropicais também apresentam condições propícias para a formação de solos colapsáveis, frequentemente associados à lixiviação de partículas finas dos horizontes superficiais, especialmente em locais com alternância entre períodos de relativa seca e chuvas intensas. Contudo, também existem registros de solos colapsáveis em áreas com climas distintos (VILAR *et al.*, 1981). A Figura 2 ilustra o comportamento de um solo colapsável, descrito abaixo:

- a. Solo com umidade natural, sem carregamento externo, apresentando sua estrutura intacta;
- b. Após o acréscimo de carga, o solo sofre uma pequena redução de volume, mas mantém sua estrutura;
- c. Quando ocorre uma variação de umidade, o solo começa a perder seus vínculos (sucção, pontes de argila, agentes cimentantes);
- d. Quando os vínculos não conseguem mais sustentar a estrutura, o solo sofre uma brusca e significativa variação de volume, colapsando.

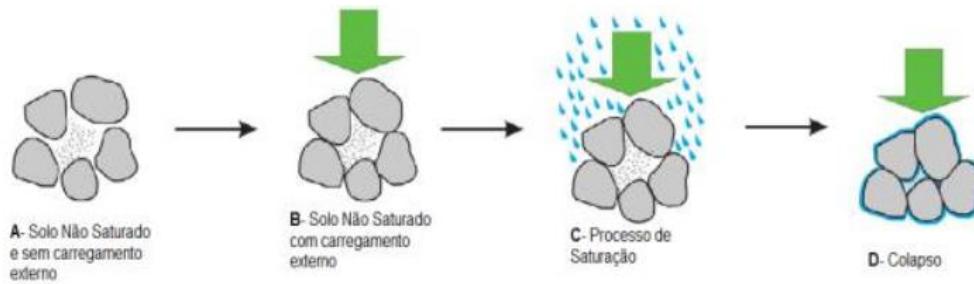


Figura 2. Variação Volumétrica do solo colapsável.
Mughal (2012) *apud* Silva (2022).

O colapso é influenciado por diversos fatores, como granulometria, estrutura, peso específico seco, umidade inicial, sucção-umidade, tipo de fluido permeante, conteúdo de minerais argílicos, velocidade e tensão de inundação, além da trajetória de tensões (FUCALE, 2000).

De acordo com Reginatto e Ferrero (1973), os solos colapsáveis podem ser classificados em duas categorias: verdadeiramente colapsáveis e condicionados ao colapso. Os primeiros correspondem àqueles que, quando inundados, não suportam o próprio peso e entram em colapso. Já os condicionados ao colapso são capazes de resistir a determinados níveis de tensão após a inundação, mas sofrem colapso quando esses limites são ultrapassados.

3 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza comparativa, com o objetivo de avaliar e comparar as técnicas de melhoramento de solos colapsáveis. Para atingir os objetivos propostos, foi realizada uma pesquisa exploratória, fundamentada em um levantamento bibliográfico abrangente, conduzida através da análise de periódicos, teses, dissertações e artigos acadêmicos relevantes sobre o tema.

Após o levantamento bibliográfico, foi realizada uma avaliação crítica dos dados obtidos nos diferentes estudos selecionados. A investigação incluiu tanto as técnicas amplamente utilizadas quanto tratamentos inovadores aplicados a diferentes tipos de solos. O foco foi analisar e sintetizar as evidências existentes, permitindo a comparação entre as abordagens tradicionais e as alternativas mais recentes, com o intuito de fornecer uma visão abrangente sobre as soluções disponíveis para o melhoramento de solos colapsáveis.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, são apresentados os materiais selecionados a partir do levantamento bibliográfico, juntamente com a justificativa para sua adoção na pesquisa. A descrição de cada material visa esclarecer sua relevância para os objetivos do estudo.

4.1 Dados das Pesquisas



4.1.1 Compactação

A compactação é uma das técnicas mais eficazes para mitigar o risco de colapso em solos, pois promove a reorganização das partículas, reduzindo a quantidade de vazios e melhorando a resistência mecânica. Além de diminuir o potencial de colapso, a compactação aumenta a resistência ao cisalhamento e reduz a permeabilidade, tornando o solo mais estável e menos suscetível a deformações (ROLLINS E ROGERS, 1994). A Figura 3 apresenta resumidamente alguns resultados, retirados do estudo de Silva e Xavier (2021) obtidos no tratamento de solos colapsáveis por meio da compactação, considerando diferentes tipos de granulometria do solo. A partir da análise gráfica, é possível observar a eficácia da técnica na redução do potencial de colapso em cada tipo de solo apresentado.

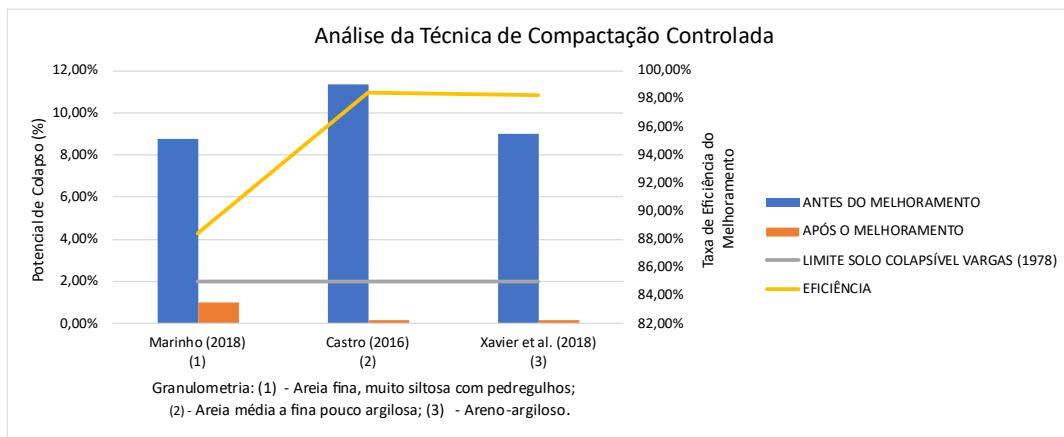


Figura 3. Análise da Técnica de Compactação Controlada.

Dessa forma, os dados indicam que, após o processo de compactação, o potencial de colapso foi significativamente reduzido, permanecendo abaixo de 2% em todos os casos. Este resultado evidencia a eficiência da compactação como uma técnica de estabilização, capaz de melhorar consideravelmente as propriedades mecânicas do solo e mitigar os riscos associados ao colapso.

Com base na análise, observa-se que as condições de umidade ótima e grau de compactação variam significativamente conforme o material e o procedimento adotado Marinho (2018) realizou ensaios edométricos simples, aplicando uma tensão vertical de inundação de 120 kPa em amostras compactadas a 85% do grau de compactação, verificando melhor desempenho na umidade ótima. Castro (2016), por sua vez, avaliou o solo em condição natural, com umidade inicial correspondente ao estado seco ao ar e grau de compactação de 77%, além de amostras compactadas a 90% de grau de compactação na umidade de 10,6%, que apresentaram melhora expressiva nas propriedades. Já Xavier et al. (2018) conduziram ensaios edométricos simples sob tensão vertical de inundação de 160 kPa, em amostras compactadas à umidade ótima e com grau de compactação superior a 88%. Evidenciando que maiores níveis de compactação estão diretamente relacionados ao aprimoramento do comportamento do solo.

4.1.2 Lodo de Esgoto

Feitosa (2009) aborda o uso consciente do lodo, que, após tratamento, é frequentemente descartado em rios. Esse resíduo, rico em matéria orgânica e nutrientes, pode ser utilizado de maneira benéfica. O estudo tem como objetivo principal explorar a aplicação desse material no melhoramento de solos colapsáveis. No estudo, foram realizados ensaios edométricos simples em amostras compactadas, submetidas a diferentes tensões verticais de inundação e inundadas com água destilada. Foram utilizadas amostras compactadas com pesos específicos aparentes secos de 15,00 kN/m³ e 17,00 kN/m³, nas quais se observou maior eficiência na redução do colapso ao incorporar, respectivamente, 15% e 10% de lodo. A Figura 4 apresenta os resultados correspondentes para a tensão de inundação de 640 kPa. A Figura 4, demonstra que o uso de lodo de esgoto apresenta um grande potencial para o melhoramento de solos colapsáveis.

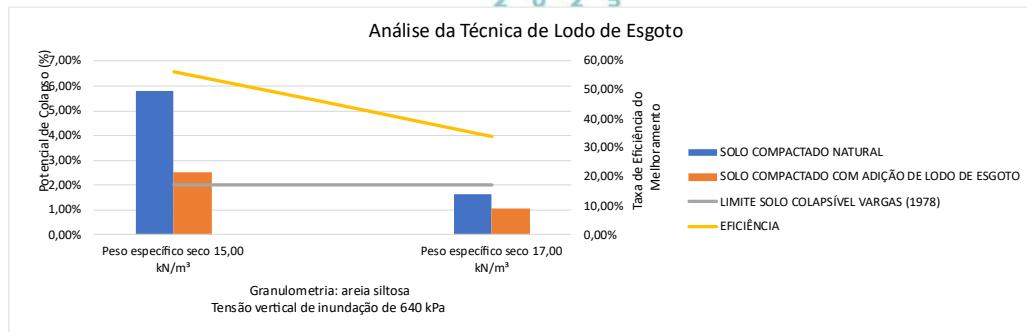


Figura 4. Análise de Técnica de Lodo de Esgoto.

A adição do lodo reduziu significativamente o potencial de colapso, além de promover uma diminuição no índice de vazios do solo, essa redução resulta em uma redução da compressibilidade do solo tratado. Dessa forma, para um mesmo peso específico aparente seco, a adição de lodo ao solo aumenta o número de partículas nos contatos entre os grãos, reduzindo a porosidade e conferindo maior estabilidade à estrutura, o que resulta na diminuição do colapso.

É importante destacar que, segundo Feitosa (2009), as características químicas e físicas do tratamento de lodo de ETE varia para cada região, dessa forma, esse estudo é apenas válido para a Estações de Tratamento de Esgoto Mangueira e Curado.

4.1.3 Colunas de Solo Compactado

Diversos estudos comprovam a eficácia da compactação na redução ou eliminação do potencial de colapso em solos. Freitas (2016) *apud* Silva e Xavier (2021) analisa o uso da compactação em solo laterítico na cidade de São Carlos – SP. O estudo tem como objetivo avaliar como a compactação, quando aplicada a solos lateríticos, pode reduzir o tempo e o custo envolvidos na estabilização de solos colapsáveis.

O trabalho seguiu uma metodologia de testes baseada em dois critérios principais: a realização de ensaios de carga de placas e a avaliação do impacto da compactação nas colunas circundantes. Foram realizadas avaliações envolvendo o uso de colunas de solo compactado e colunas compostas por solo e brita compactados, comparando-as com o desempenho do solo compactado sem reforço.

Conforme ilustrado na Figura 5, o melhoramento do solo colapsável submetido a uma tensão aplicada de 100 kPa apresentou resultados superiores tanto para as colunas de solo compactado quanto para as colunas de solo e brita compactados. Ambas as soluções aumentaram significativamente a tensão admissível do solo em comparação ao tratamento realizado apenas com o solo compactado, a qual segundo Freitas (2016) *apud* Silva e Xavier (2021) apresenta-se como uma solução para obras de fundações superficiais localizadas em solos colapsáveis.

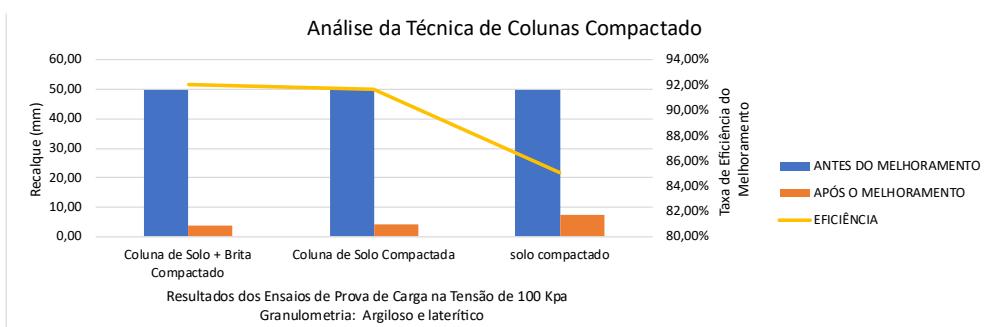


Figura 5. Análise da Técnica de Colunas Compactado.

Em relação à compactação ao redor das colunas, verificou-se que ela alcançou um raio de 80 cm, evidenciando a capacidade da técnica de melhorar a área ao redor das colunas aplicadas. Além disso, foi destacado que essa técnica possui custos e tempos de execução menores do que outras técnicas de estabilização e permite o uso do material local para compactação.

4.1.4 Resíduo de construção civil - RCC



No estudo realizado por Santos Neto (2015), foi analisado um solo colapsável, classificado como areia fina siltosa, coletado na cidade de Petrolina – PE. Com base nos resultados apresentados na Figura 6, observa-se que a técnica é eficaz para reduzir o potencial de colapso, sendo recomendada para o melhoramento de solos colapsáveis. Foram realizados ensaios edométricos simples em corpos de prova preparados com proporções de 10%, 30% e 50% de RCC#30, umidades pré-determinadas de 1%, 4% e 7%, e graus de compactação de 85%, 90% e 95%.

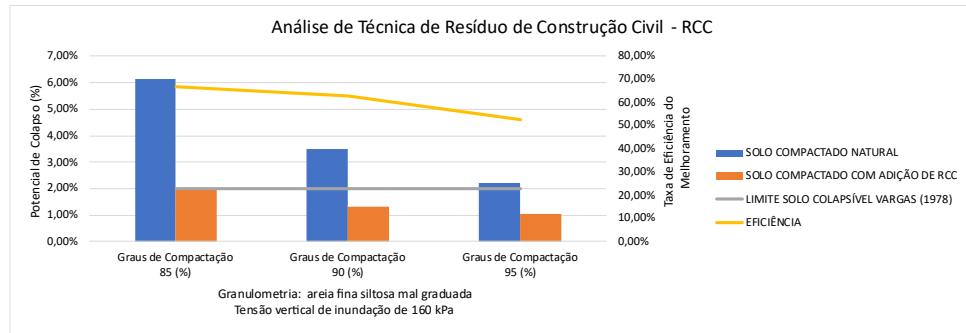


Figura 6. Análise da Técnica de RCC.

Observou-se que a maior redução do colapso ocorreu sob baixas tensões de 10 e 40 kPa; entretanto, para fins desta análise, será considerada a condição de 160 kPa, com umidade de 7% e composição de 50% de RCC#30 e 50% de solo. Esse efeito pode ser explicado, conforme Santos Neto (2015), pelo fato de a técnica promover melhorias tanto nas propriedades físicas quanto nas propriedades mecânicas do solo. A mistura composta por 50% de RCC#30 e 50% de solo apresentou uma distribuição de partículas bem graduada, favorecendo o desempenho do material.

Observa-se, entretanto, que, à medida que o grau de compactação aumenta, a eficiência da mistura tende a diminuir, uma vez que o solo já adquire maior resistência em função da própria compactação. Por outro lado, a elevação simultânea do grau de compactação e da umidade contribui para uma melhora significativa do comportamento do solo, resultando em uma expressiva redução do seu potencial de colapso.

4.1.5 Cinza de casca de Arroz – CCA

Yacoub (2017) conduziu uma pesquisa em Ilha Solteira – SP, na qual foi analisado um solo arenoso fino. Nesse estudo, parte do solo foi substituída por cinza de casca de arroz (CCA), com o objetivo de avaliar o impacto dessa adição na redução do potencial de colapso do solo.

O estudo incluiu ensaios de caracterização física, granulometria, ensaios edométricos simples e caracterização microestrutural. Os resultados indicaram que a CCA, de acordo com a análise granulométrica a laser, preencheu os vazios no solo, aumentando seu volume, o que contribuiu para um maior grau de compactação. A Figura 7 ilustra a redução do percentual de colapso para o teor da mistura mais eficiente, 14% de CCA, que diminuiu o potencial de colapso de 9,80% para 1,94%, evidenciando a eficácia da técnica de adição de CCA no tratamento de solos colapsáveis.

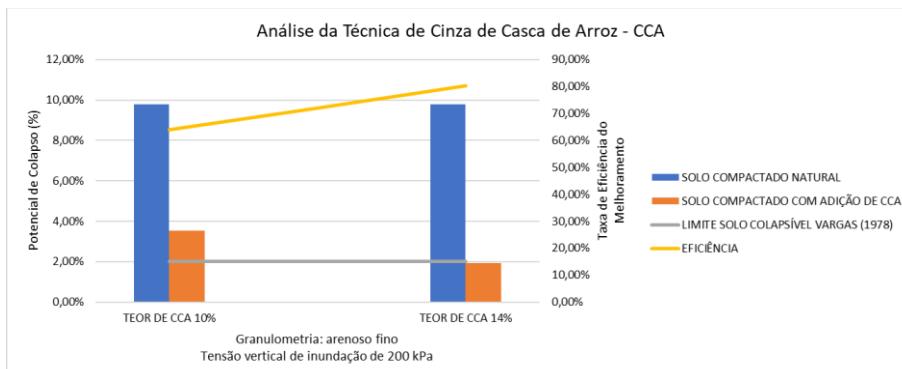


Figura 7. Análise da Técnica de Cinza de Casca de Arroz.



O solo foi estabilizado fisicamente pela CCA, a qual aumentou a cimentação entre as partículas, promovendo a redução da metaestabilidade e do potencial de colapso. Para análise, foram realizados ensaios edométricos simples, aplicando-se uma tensão vertical de inundação de 200 kPa, em amostras previamente compactadas com 80% do grau de compactação. Entre os teores analisados, 10% e 14% se destacaram; entretanto, o teor de 14% apresentou o melhor desempenho em termos de eficiência.

4.2 Comparação

Com os dados analisados do potencial de colapso e da redução do recalque foi possível calcular a eficiência de cada técnica. Calculada pela Equação 1:

$$Ef = \frac{(a-b)}{a} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

EF - taxa de acréscimo de resistência (%);

a - Valor do Potencial de Colapso ou recalque no solo natural;

b - Valor do Potencial de Colapso ou recalque no solo no após o melhoramento.

A partir dos cálculos da taxa de acréscimo de resistência foi possível comparar diretamente as técnicas analisadas obtendo as mais eficientes. Para as técnicas que tiveram mais de um tipo de solo foi considerado a o valor médio. Dessa forma, foi possível obter o Figura 8.

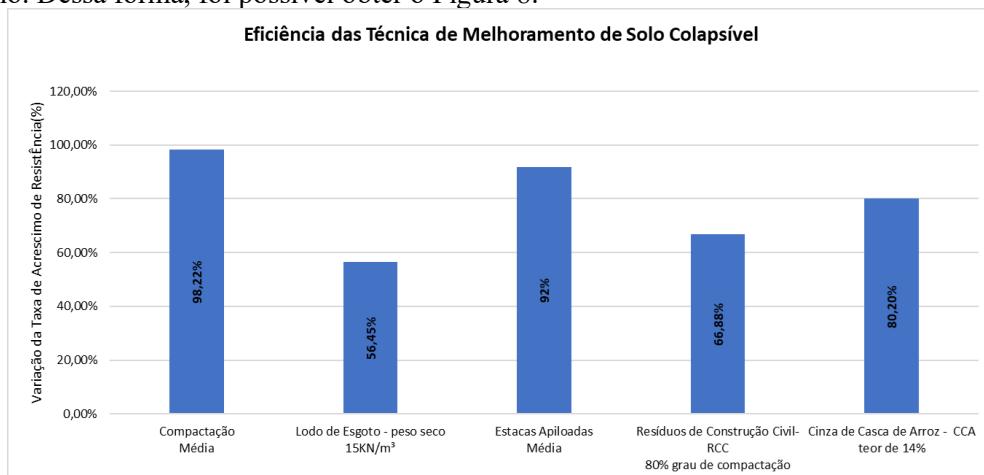


Figura 8. Eficiência das Técnicas de Melhoramento de Solo Colapsável.

Ao comparar a eficiência de cada técnica de melhoramento estudada nesse artigo, é possível observar que todas apresentam bons resultados, porém a técnica que apresentou melhores resultados em relação a eficiência da redução do potencial de colapso do solo, foram a compactação e a utilização de estacas apiloadas. Vale salientar que ambas são técnicas difundidas na construção civil, por apresentar um bom custo-benefício, sem a necessidade de uma grande quantidade de mão de obra especializada.

Com base nos dados apresentados na Figura 8 é possível realizar uma análise preliminar para identificar o método mais adequado de melhoramento do solo colapsável, considerando o tipo específico de solo. Além disso, é essencial avaliar a disponibilidade de mão de obra qualificada e dos materiais necessários para a execução da técnica. Esses fatores são fundamentais para a escolha da solução mais viável e eficiente.

5 CONCLUSÃO

O estudo apresentado investigou diferentes técnicas de melhoramento de solos colapsáveis, avaliando sua eficiência com base em dados experimentais e estudos de caso. As técnicas analisadas, incluindo compactação, uso de lodo de esgoto, colunas compactadas, adição de resíduo de construção civil (RCC) e cinza



de casca de arroz (CCA), mostraram resultados variáveis, destacando-se pela capacidade de mitigar o potencial de colapso em diferentes tipos de solos.

Entre as técnicas, a compactação e as colunas compactadas foram as mais eficientes, com reduções superiores a 90% no potencial de colapso, reforçando sua aplicabilidade em projetos que demandam soluções tecnicamente viáveis e de baixo custo. Já a utilização de materiais recicláveis, como RCC e CCA, apresentou vantagens ambientais significativas, oferecendo alternativas sustentáveis para a estabilização de solos colapsíveis. Por outro lado, técnicas como o uso de lodo de esgoto, apesar de menos eficientes em alguns casos, demonstraram potencial para reaproveitamento de resíduos urbanos, contribuindo para a engenharia sustentável. É importante ressaltar que essas conclusões se aplicam às condições específicas adotadas nos ensaios, incluindo os teores de lodo, RCC e CCA e a energia de compactação empregada, ou seja, para percentuais ou condições diferentes, a melhoria observada pode não ocorrer na mesma magnitude. A escolha da técnica mais adequada deve considerar não apenas os resultados laboratoriais, mas também fatores como a disponibilidade de materiais, as condições específicas do solo local e os custos associados.

Por fim, este trabalho contribui para a geotecnia ao consolidar dados sobre técnicas de melhoria de solos colapsíveis, oferecendo subsídios para decisões preliminares em projetos de engenharia em regiões suscetíveis ao colapso. Estudos futuros podem explorar combinações de técnicas ou ampliar a aplicação dessas soluções a outros contextos regionais, buscando sempre equilibrar eficiência técnica e sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), a quem os autores agradecem pelo incentivo à pesquisa e à formação acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, A. P. A. Influência da compactação no colapso de um solo arenoso. (Dissertação de Mestrado), Universidade Estadual Paulista, 2016.
- FEITOSA, M. C. A. Lodo de esgoto: algumas aplicações em engenharia. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.
- FERREIRA, S. R. M. Colapso e Expansão de Solos Naturais Não Saturados Devido à Inundação. 1995. 400p. Tese -COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.
- MARINHO, R. P. Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE. (Dissertação de Mestrado). Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- MENDONÇA, M. B. Comportamento de Solos Colapsíveis da Região de Bom Jesus da Lapa – Bahia. 1990. 281p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.
- ROLLINS, K.M e ROGERS, G.W. Medidas de mitigação para pequenas estruturas em solos aluviais colapsáveis. Journal of Geotechnical Engineerin, 1994.
- SANTOS NETO, F. C. Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsíveis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.
- SILVA, G. I. G; XAVIER, J. M. COMPARATIVO DE TÉCNICAS PARA MELHORIA DE SOLOS COLAPSÍVEIS: Análise da Viabilidade de Aplicação no Solo de Ibimirim-PE. Revista Multi Disciplina do Sertão. v.03, n.3, p. 341-353, Jul-Set, 2021.
- SILVA, I. F. da. SOLOS COLAPSÍVEIS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: uma visão panorâmica. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2022.
- XAVIER, J.M. Estudo do comportamento geotécnico de um solo colapsível voltado para fundações superficiais. Dissertação (Mestrado). UFPE. Recife. 2018.
- YACOUB, J. D. Melhoria do comportamento colapsível de um solo arenoso fino com uso de cinza de casca de arroz. (Dissertação de Mestrado). Universidade Estadual Paulista. 2017.