

Análise dos métodos de moldagem de corpos de prova para ensaios triaxiais em areias carbonáticas

Analysis of specimen molding methods for triaxial testing in carbonate sands

Análisis de métodos de moldeo de muestras para ensayos triaxiales en arenas carbonatadas

DOI: 10.54033/cadpedv22n13-118

Originals received: 10/10/2025

Acceptance for publication: 11/3/2025

Cíntia Lopes de Castro

Mestra em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: cintia.cstr.eng@gmail.com

Victor Luiz da Silva Alves

Mestre em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: victorluizalves2015@gmail.com

Gabriela França Azevedo

Mestra em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia (UFU)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: gabrielaazevedotn@gmail.com

Lucas Pereira Cavalcante

Graduado em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: lucaspengenharia@gmail.com

Carlos Phelipe Barbosa de Alcântara

Mestre em Climatologia
Instituição: Universidade Estadual do Ceará (UECE)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: carlos.alcantara@aluno.uece.br

André Leilson de Oliveira Barbosa

Graduado em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: andreleilson@gmail.com

Diana Rodrigues de Lima Gonçalves

Mestra em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: diana.lima@ufca.edu.br

Alfran Sampaio Moura

Doutor em Geotecnia
Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)
Endereço: Fortaleza, Ceará, Brasil
E-mail: alfransampaio@ufc.br

RESUMO

A reconstituição e remoldagem de solos é uma fase essencial para assegurar resultados representativos de ensaios de laboratório. Devido ao caráter granular e não coesivo das areias, surgem desafios particulares, como a garantia da homogeneidade, o controle rigoroso da densidade e a prevenção da segregação das partículas. Nesse contexto, surge a necessidade de estudos de métodos de moldagem que sejam mais efetivos e que assegurem maior representatividade das amostras ensaiadas. Em vista disso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade dos métodos de moldagem por pluviação ao ar na reconstituição de corpos de provas de areias carbonáticas que são mais representativos, ou seja, que não variam significativamente durante a deposição da areia, sendo assim o método mais adequado para fazer ensaios triaxiais no estado fofo e compacto. No procedimento de moldagem variou-se abertura do funil, altura de queda, número de golpes e quantidade de camadas. Como resultado, a partir da análise estatística dos dados, foi possível obter o procedimento mais efetivo para areias carbonáticas nos estados fofo e denso.

Palavras-chave: Reconstituição de Solos. Moldagem de Corpos de Prova. Areia Carbonática. Análise Estatística.

ABSTRACT

Soil reconstitution and remolding is an essential step in ensuring representative laboratory test results. Due to the granular and non-cohesive nature of sands, particular challenges arise, such as ensuring homogeneity, strict density control, and preventing particle segregation. In this context, there is a need for studies of molding methods that are more effective and ensure greater representativeness of the tested samples. In view of this, the present work aims to evaluate the applicability of air pluviation molding methods in the reconstruction of carbonate sand test specimens that are more representative, i.e., that do not vary

significantly during sand deposition, thus being the most suitable method for performing triaxial tests in the loose and compacted states. In the molding procedure, the funnel opening, drop height, number of blows, and number of layers were varied. As a result, based on statistical analysis of the data, it was possible to obtain the most effective procedure for carbonate sands in the loose and dense states.

Keywords: Soil Reconstruction. Test Specimen Molding. Carbonate Sand. Statistical Analysis.

RESUMEN

La reconstitución y remodelación de suelos es una fase esencial para garantizar resultados representativos de los ensayos de laboratorio. Debido al carácter granular y no cohesivo de las arenas, surgen retos particulares, como garantizar la homogeneidad, controlar rigurosamente la densidad y evitar la segregación de las partículas. En este contexto, surge la necesidad de estudiar métodos de moldeado más eficaces y que garanticen una mayor representatividad de las muestras ensayadas. En vista de ello, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de los métodos de moldeado por pluviación al aire en la reconstitución de muestras de arenas carbonatadas que sean más representativas, es decir, que no varíen significativamente durante el depósito de la arena, siendo así el método más adecuado para realizar ensayos triaxiales en estado suelto y compacto. En el procedimiento de moldeado se varió la apertura del embudo, la altura de caída, el número de golpes y la cantidad de capas. Como resultado, a partir del análisis estadístico de los datos, fue posible obtener el procedimiento más eficaz para arenas carbonáticas en estado suelto y denso.

Palabras clave: Reconstitución de Suelos. Moldeado de Muestras. Arena Carbonática. Análisis Estadístico.

1 INTRODUÇÃO

A moldagem de corpos de prova para ensaios triaxiais em areias é uma etapa importantíssima para garantir resultados confiáveis e representativos. Particularmente na moldagem de corpos de prova de areias, pela ausência de coesão há algumas dificuldades adicionais, como a manutenção da homogeneidade, o controle da densidade e a prevenção da segregação de partículas. Nesse aspecto, estudos a respeito de métodos para a reconstituição de amostras abrangem diversas questões, como métodos de preparação para solos arenosos, comparações com amostras indeformadas e o efeito da

reconstituição em ensaios não drenados (Raghunandan *et al.*, 2012; Dyvik & Høeg, 2018; Kwan & El Mothar, 2020).

O arranjo das partículas é diretamente modificado em função do tipo de moldagem dos corpos de prova, podendo comprometer a qualidade da reconstituição. Para areias carbonáticas, a reconstituição apresenta importância ainda mais relevante pela heterogeneidade de sua composição que pode ter origem em rochas calcáreas, carapaças de animais marinhos ou mesmo de algas marinhas. Nesse aspecto, diversas pesquisas voltadas para estudos geotécnicos das areias carbonáticas estão fortemente relacionadas com ensaios triaxiais (Barroso & Moura 2023, do Nascimento *et al.*, 2025, Golightly & Hyde 2021). Dessa forma, a análise de metodologias para reconstituição de corpos de prova também é bastante pertinente para esse tipo de solo.

A literatura não indica um método de moldagem específico para areias carbonáticas, dessa forma, busca-se indicar um procedimento mais adequado que seja representativo e que atenda as especificações do estado que se deseja moldar o corpo de prova de areias carbonáticas para ensaios triaxiais.

Portanto, a partir de diferentes métodos de moldagem de corpos de prova para ensaios triaxiais nos estados fofo e compacto, o presente estudo tem por objetivo, analisar estatisticamente a variabilidade do método da pluviação ao ar para uma amostra de areia carbonática, a fim de avaliar metodologias para moldagem de corpos de prova dessas areias que tenham menor variabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A reconstituição dos corpos de prova é um procedimento necessário, uma vez que é muito difícil a obtenção de amostras indeformadas, principalmente em solos granulares, na qual não há coesão. Além disso, tem-se que existe a incerteza da qualidade das amostras (Oliveira Filho, 1987).

Os métodos usuais de reconstituição de solos granulares são, em geral, em função das condições de umidade, no caso: seca, saturada e úmida. Além disso há que se considerar o modo de deposição das areias. Neste estudo, daremos ênfase a reconstituição da areia seca. Sendo que, para a moldagem de

corpos de prova de areia seca, ela pode ser preparada secando-a ao ar ou em estufa (105° a 110°C) (Oliveira Filho, 1987).

O método de pluviação no ar consiste em verter a areia seca por um recipiente de abertura pré-definida. Mulilis *et al.* (1975) e Miura e Toki (1982) comentam que a abertura do funil e a altura de queda seriam os fatores intervenientes na determinação da densidade relativa do corpo de prova; no entanto, acrescentam que o fator mais importante corresponderia a abertura do funil. A pluviação pode ocorrer na água onde verte-se a areia saturada em recipiente cheio de água, obtendo-se amostras fofas, já para maiores compacidades procede-se com a vibração até atingir a densidade relativa desejada.

Para amostras compactas são realizadas compactação com auxílio de soquete, usando determinada quantidade de golpes. É comum fazer como alternativa uma compactação com determinada quantidade de areia até preencher o volume do molde já conhecido e atingir a densidade relativa pré-estabelecida. A compactação pode ser realizada através de haste, introduzindo-se de forma dinâmica e de modo que os golpes sejam uniformes. Além disso, pode-se compactar por meio de golpes laterais do molde.

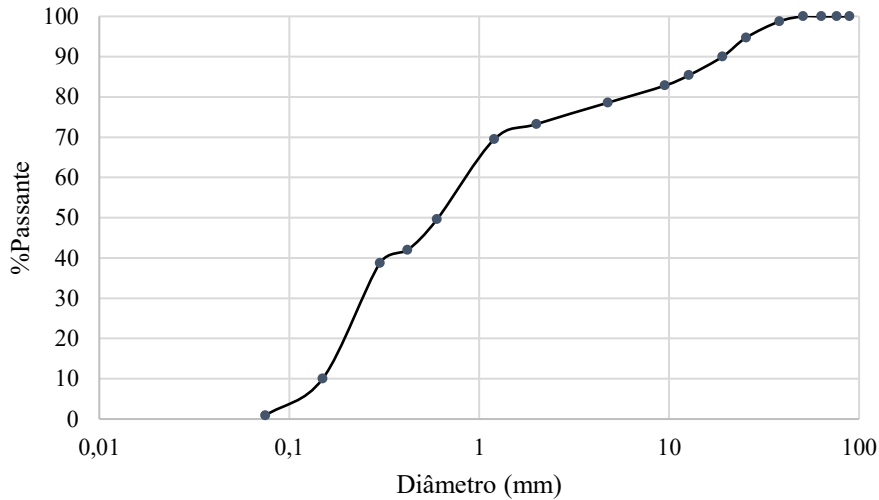
Para o presente estudo, foi utilizado o método de pluviação no ar, por utilizar materiais de fácil obtenção como funil e molde cilíndrico e por sua simplicidade de execução.

3 METODOLOGIA

Os ensaios foram realizados no laboratório de mecânica dos solos e pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC). O material utilizado é uma areia carbonática coletada no litoral Cearense. A granulometria do solo utilizado no presente trabalho pode ser visualizada na Figura 1. O teor de carbonato da amostra foi determinado pelo método do calcímetro de Bernad apresentou 38,5%. A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização geotécnica do material carbonático ensaiado nesse estudo, nomeado de FOZ 3. Todas os corpos de prova foram reconstituídos em moldes de 5mm de diâmetro

e 100mm de altura, uma vez que é o mesmo tamanho utilizado para ensaios triaxiais.

Figura 1. Curva granulométrica do solo utilizado



Fonte: Autores (2025).

Tabela 1. Caracterização geotécnica do solo utilizado na pesquisa

Amostra	Foz 3
em _{ax}	0,730
em _{ín}	0,597
Dr	0,8
Gs	2,67
w (%)	0,13
γ .nat (g/cm ³)	1,705

Fonte: Autores (2025).

Com intuito de simplificar e parametrizar os métodos de moldagem foram utilizados os seguintes equipamentos: Funil 100, e 120mm de abertura, molde cilíndrico, suporte para funil.

Os corpos de prova foram moldados para o estado fofo e o estado denso. Para o estado fofo, variou-se a abertura do funil (100mm e 120mm) e a altura de queda do material (2mm e 5mm). Já para o estado denso, ou seja, com o solo compactado, variou-se a abertura do funil (100mm e 120mm), altura de queda do material (2mm e 5mm), a quantidade de camadas (3 ou 5) e o número de golpes (12 ou 26 golpes) aplicada em cada camada.

Para cada condição de moldagem realizada foram feitas 10 medidas de massa da areia depositada. As moldagens foram obtidas sob as mesmas

condições, a fim de evitar variações significativas devido a operação da deposição. A partir dos resultados da quantidade de massa depositada e de parâmetros conhecidos do solo foram calculados os índices de vazios para cada condição estudada.

No procedimento para moldagem no estado fofo, a areia seca foi lançada através do funil para dentro do molde, variando a altura de lançamento de 2cm e 5cm. Dessa forma, para o estado fofo foram obtidos resultados para 4 condições. A primeira utilizando o funil de 100mm e altura de 2cm, a segunda com funil de 100mm e altura de 5cm, a terceira com funil de 120mm e altura de 2cm e a quarta utilizando o funil de 120mm e altura de 5cm.

A moldagem dos corpos de prova no estado denso foi realizada em várias condições. Inicialmente variou-se o número de camadas em 3 e 5 camadas e a quantidade de golpes em 12 e 26, utilizando-se funis de 100mm e 120mm de diâmetro e adotando valores 2cm e 5cm para a altura de lançamento do solo no molde. Ao todo, foram realizados ensaios com 13 condições distintas para o estado denso. Os golpes foram realizados com soquete padronizado de 288,51g, sendo aplicado uma energia similar para todos os corpos de prova compactados.

A seguir são apresentados para o estado denso, as condições de moldagem dos corpos de prova, nas quais foram obtidos variando o diâmetro do funil, a altura de queda, número de camadas e número de golpes, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Condições de ensaio para o estado denso

Condição	Diâmetro do Funil (mm)	Altura de queda (cm)	Número de camadas	Número de golpes
C1	100	2	3	26
C2	100	2	5	12
C3	100	2	3	12
C4	100	2	5	26
C5	100	5	3	12
C6	100	5	3	26
C7	100	5	5	12
C8	100	5	5	26
C9	120	2	5	26
C10	120	5	3	12
C11	120	5	3	26
C12	120	5	5	12
C13	120	5	5	26

Fonte: Autores (2025).

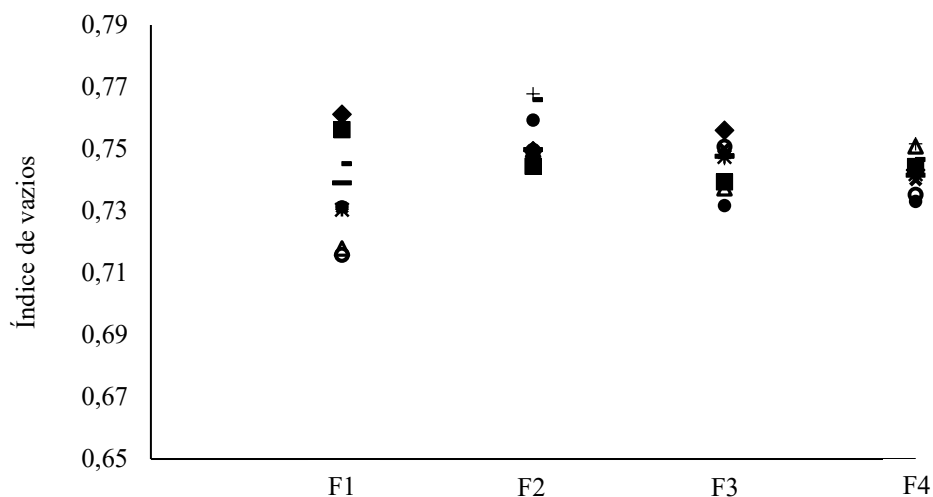
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises propostas no presente artigo foram conduzidas avaliando-se o comportamento do índice de vazios do solo. A média e o desvio padrão foram calculados, assim como o coeficiente de variação, com o objetivo de avaliar a variabilidade singular dos corpos de prova moldados. Dessa forma, foi analisado a variabilidade de acordo com as condições de moldagem nos dois estados de compactidade.

4.1 ESTADO FOFO

A Figura 2 apresenta a variação dos índices de vazios no estado fofo, para as condições nas quais foi variado o diâmetro do funil e a altura de queda. Observa-se que a menor variação com relação ao índice de vazios dos corpos de prova moldados ocorre para o funil de 120mm e a altura de queda de 5cm.

Figura 2. Variabilidade do índice de vazios dos corpos de prova reconstituídos (estafo fofo)



F1 - Funil 100mm e altura de queda 2cm.
 F2 - Funil 100mm e altura de queda 5cm.
 F3 - Funil 120mm e altura de queda 2cm.
 F4 - Funil 120mm e altura de queda 5cm.

Fonte: Autores (2025).

Na Tabela 3, pode-se observar a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) dos índices de vazios obtidos em cada condição, para os corpos de prova moldados no estado fofo. O modo de deposição com menor variação, ou seja, com menores valores de desvio padrão e coeficiente de variação obtido ocorreu nas moldagens feitas com funil de 120mm de diâmetro e com altura de queda de 5 cm (condição F4).

Tabela 3. Resultado da análise estatística para o estado fofo

Condição	Funil (mm)	Altura de queda (cm)	Média	Desvio Padrão	CV
F1	100	2	0.736	0.015	2.015
F2	100	5	0.753	0.009	1.134
F3	120	2	0.745	0.007	0.966
F4	120	5	0.743	0.006	0.802

Fonte: Autores (2025).

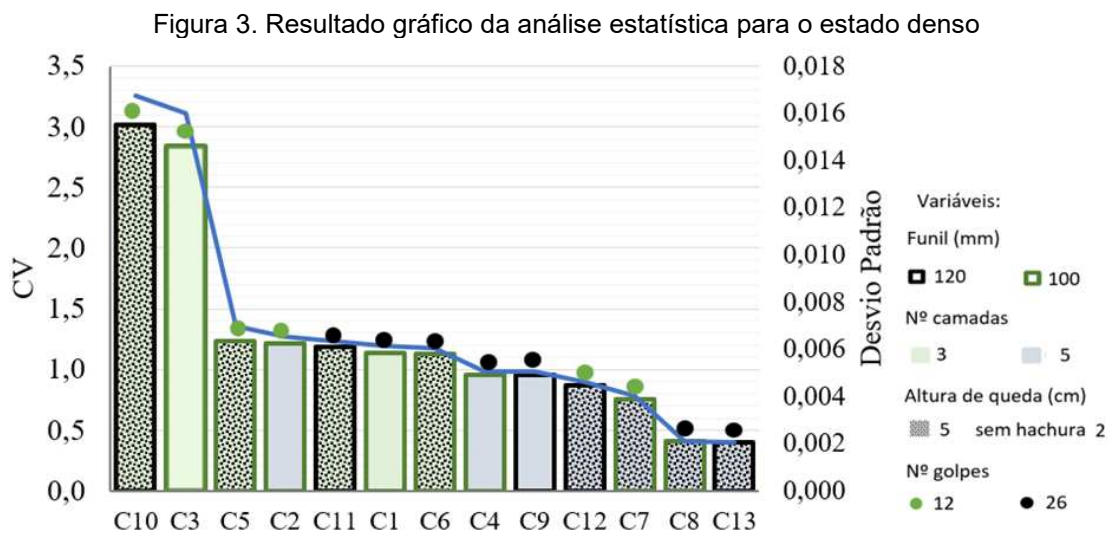
A análise estatística mostra que os métodos de moldagem com os maiores e menores valores de desvio padrão e coeficiente de variação são os da Condição F1 e da Condição F4, respectivamente. Comparando essas duas condições, os valores desses parâmetros reduziram de 0.015 para 0.006 no desvio padrão e de 2.015 para 0.802 no coeficiente de variação, assim, a variabilidade dos índices de vazios na condição F4 reduziu para menos da metade em relação a condição F1. Assim, em comparação com a condição F1, a condição F4 apresentou uma redução percentual de aproximadamente 60% tanto no desvio padrão, quanto no coeficiente de variação.

Os resultados também mostram valores decrescentes de desvio padrão e de coeficiente de variação da condição F1 para a F4, de forma que a diferença entre os valores desses parâmetros estatísticos é maior em comparação com a Condição F1, enquanto nas condições F2, F3 e F4, a diferença desses parâmetros entre si é notavelmente menor. Isso indica que, nas condições de moldagem ensaiadas, a altura de queda apresentou uma maior influência na redução da variabilidade.

4.2 ESTADO DENSO

Os resultados da análise estatística no estado denso são apresentados na Figura 3 e na Tabela 4. Para este estado de compactação, observa-se que ocorreu menor variação dos índices de vazios com o uso do funil de 120mm, com altura de queda de 5cm, número de camadas igual a 5 e número de golpes equivalente a 26 (condição C13).

A Figura 3 apresenta, em ordem decrescente dos valores de desvio padrão e coeficiente de variabilidade, a disposição das metodologias utilizadas para a moldagem dos corpos de prova, identificando as variáveis utilizadas em cada condição de moldagem.



Fonte: Autores (2025).

Tabela 4. Resultado da análise estatística para o estado denso

Condição	Funil (mm)	Altura de queda (cm)	Número de camada	Número de golpes	Média	Desvio Padrão	CV (%)
C1	100	2	3	26	0.540	0.00615	1.1385
C2	100	2	5	12	0.539	0.00655	1.2164
C3	100	2	3	12	0.563	0.01600	2.8402
C4	100	2	5	26	0.525	0.00504	0.9605
C5	100	5	3	12	0.568	0.00699	1.2304
C6	100	5	3	26	0.534	0.00603	1.1296
C7	100	5	5	12	0.534	0.00401	0.7511
C8	100	5	5	26	0.520	0.00212	0.4078
C9	120	2	5	26	0.525	0.00504	0.9605
C10	120	5	3	12	0.556	0.01676	3.0149
C11	120	5	3	26	0.533	0.00632	1.1848

C12	120	5	5	12	0.533	0.00463	0.8679
C13	120	5	5	26	0.517	0.00205	0.3964

Fonte: Autores (2025).

A metodologia em que foi obtido a menor variação no índice de vazios corresponde a condição C13, na qual foi adotado 5 camadas de solo com 26 golpes em cada camada, 5 cm de altura de queda e 120 mm de abertura do funil. Em contrapartida, a metodologia que apresentou maior variabilidade (condição C10) se difere da condição C13 apenas no número de camadas e no número de golpes aplicados, nesse caso, 3 camadas com 12 golpes.

Comparando as condições C10 e C13, a redução percentual entre os valores de desvio padrão e coeficiente de variação, são de aproximadamente 87%, sendo assim, uma redução ainda maior em comparação com as condições de moldagem no estado fofo. Ademais, as metodologias executadas com 5 camadas de solo e 26 golpes apresentaram menor variabilidade na maioria dos casos ensaiados. Dentre essas variáveis, o número de camadas se mostrou como a mais influente na redução dos valores do desvio padrão e do coeficiente de variabilidade.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade dos métodos de moldagem por pluviação ao ar na reconstituição de corpos de prova de areias carbonáticas, buscando identificar o procedimento que produz amostras mais representativas, com menor variabilidade nos índices de vazios, para utilização em ensaios triaxiais nos estados fofo e denso.

A partir das análises estatísticas, foi observado que a metodologia de moldagem influencia significativamente na variabilidade dos índices de vazios dos corpos de prova. Foi observado ainda que a adoção de metodologias indiscriminadas poderá conduzir a moldagem de corpos de prova bastante heterogêneos que, certamente, contribuirá para o comprometimento de ensaios triaxiais.

Para o estado fofo, a metodologia que proporcionou a menor variabilidade foi aquela utilizando o funil de 120mm e a altura de queda de 5mm, o que resultou em uma redução percentual de 60% nos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação. Nesse caso, a altura de queda mostrou maior influência na redução da variabilidade.

No estado denso, a metodologia mais efetiva foi obtida realizando a moldagem com funil de 120mm de diâmetro, altura de queda de 5cm, número de camadas de 5 e número de golpes equivalente a 26. Nesse caso, a redução percentual nos valores do desvio padrão e do coeficiente de variação entre as metodologias de maior e menor variação foi de aproximadamente 87%. Nas condições ensaiadas no estado denso, a variável que apresentou maior influência na redução da variabilidade foi o número de camadas na moldagem do corpo de prova.

O estudo contribuiu ao ampliar o conhecimento sobre a preparação de amostras de areias carbonáticas, fornecendo subsídios metodológicos para pesquisas em geotecnia experimental. Em termos sociais e tecnológicos, os resultados podem apoiar projetos de engenharia em regiões costeiras, onde essas areias são comuns, contribuindo para a segurança e eficiência de obras de fundações e estruturas offshore, como turbinas eólicas e instalações associadas à produção de hidrogênio verde.

Como limitação, destaca-se que os ensaios foram conduzidos com um único tipo de areia carbonática, sob condições controladas de laboratório, não abrangendo variáveis como umidade, granulometria diferenciada ou cimentação natural. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras avaliem outros tipos de areias carbonáticas, explorem diferentes métodos de reconstituição e investiguem o impacto das condições de moldagem em ensaios triaxiais drenados e não drenados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação do departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – POSDEHA, ao apoio da Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da PETROBRAS, efetivado através de termo de cooperação de P&D (no âmbito do PD-00553-0069/2021) que atende à obrigação ANEEL.

REFERÊNCIAS

- AIREY, D. W. Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1993.
- BARROSO F.O.P.; MOURA A.S. 2023. Proposition of correlations for the dynamic parameters of carbonate sands. **Soils and Rocks**, v. 46, 2023.
- do NASCIMENTO, M. V., ALVES, V. L. D. S., BARROS, S. P. P., GENZANI, R. G. B. C., PINHEIRO, C. G. D. S.; MOURA, A. S. Geotechnical Properties of Carbonate Sands on the Coast of Ceará: Implications for Offshore Wind Foundations and Green Hydrogen Initiatives. **Sustainability**, v. 17, n. 10, p. 4726, 2025.
- DYVIK, R.; HØEG, K. Comparison of tests on undisturbed and reconstituted silt and silty sand. *In: Physics and mechanics of soil liquefaction*. Routledge, 2018, p. 159-167.
- GOLIGHTLY, C. R.; HYDE, A. F. L. Some fundamental properties of carbonate sands. *In: Engineering for Calcareous Sediments Volume 1*. CRC Press, 2021, p. 69-78.
- KWAN, W. S.; EL MOHTAR, C. A review on sand sample reconstitution methods and procedures for undrained simple shear test. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2020.
- MIURA, S.; TOKI, S. A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand, **Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Vol. 22, n. 1, p. 61-77, 1982.
- MULILIS, J.P., CHAN, C.K. e SEED, H.B. The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands, **Technical Report, Univ. of California at Berkeley**, v. 75, 1975.
- OLIVEIRA FILHO, W. L. D. **Considerações sobre Ensaio Triaxiais em Areias**. 1987. 266 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1987.
- RAGHUNANDAN, M.; JUNEJA, A.; HSIUNG, B. Preparation of reconstituted sand samples in the laboratory. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 6, n. 1, p. 125-131, 2012.
- SZE, H. Y.; YANG, J. Cyclic loading behavior of saturated sand with different fabrics. *In: Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Geotechnical.org., 2013, p. 1611-1614.