

Estudo experimental preliminar da resistência de areias carbonáticas e quartzosas da costa nordeste do Brasil com base em ensaios triaxiais drenados.

Victor Luiz da Silva Alves, Alfran Sampaio Moura & Francisco Chagas Silva Filho

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil, victorluizalves@alu.ufc.br

Diana Rodrigues de Lima Gonçalves

Universidade de Brasília, Brasil

João Barbosa de Souza Neto

Universidade Federal do Cariri, Brasil

Jorge Fiori Fernandes Sobreira

Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello, Petrobras, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo experimental do comportamento de areias saturadas da costa nordeste do Brasil com base em ensaios triaxiais sob condição drenada. Projetos de parques eólicos offshore com perspectivas de implantação na costa nordeste do Brasil têm demandado estudos que indiquem particularidades desse tipo de material devido à escassez de estudos nesse tema. Ademais, este estudo visa comparar o comportamento de areias quartzosas e calcárias da costa nordeste do Brasil. Os ensaios foram realizados em dois tipos de areias com diferentes composições mineralógicas, uma areia quartzosa da foz do rio Pacoti em Aquiraz-CE e uma areia calcária obtida no mar da praia de Moitas em Amontada-CE. As amostras foram caracterizadas através de análise granulométrica, índice de vazios máximo e mínimo, densidade real, e ensaios de fluorescência de raios X. Posteriormente, as amostras foram usadas para reconstituir corpos de prova para os ensaios triaxiais em tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa. Para a mesma tensão confinante, maiores tensões desviadoras de ruptura foram observadas nas areias calcárias. Já em relação às envoltórias de resistência, as diferenças observadas entre as duas areias sugerem que a mineralogia tem influência nos valores do ângulo de atrito efetivo (ϕ').

KEYWORDS: Areia carbonática, Ensaio triaxial, Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: This paper presents an experimental study of the behavior of saturated sands from the northeastern coast of Brazil based on triaxial tests under drained condition. Offshore wind farm projects with prospects of implementation on the northeastern coast of Brazil have demanded studies that indicate particularities of this type of material due to the scarce of studies in this topic. Furthermore, this study aims to compare the behavior of quartz and calcareous sedimentary sands from the northeast coast of Brazil. The tests were carried out on two types of sands with different mineralogical compositions, a quartz sand from the mouth of Pacoti river in Aquiraz-CE and a calcareous sand obtained offshore at the beach of Moitas in Amontada-CE. The samples were characterized through grain size analysis, maximum and minimum void ratio, specific gravity, and X-ray fluorescence tests. Subsequently, the samples were used to reconstitute specimens for the triaxial tests at confining stresses of 50, 100, and 200 kPa. For the same confining stress, higher rupture deviator stresses were observed in the calcareous sands. Regarding the strength envelopes, the differences observed between the two sands suggests that the mineralogy has an influence on the values of the effective friction angle (ϕ').

KEYWORDS: Carbonate sand, Triaxial test, Shear resistance.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia sustentável é um assunto de grande relevância dentro do cenário da matriz energética global, na qual a energia eólica se destaca, notadamente, pelo seu potencial em diversas áreas brasileiras. Nesse contexto, o estudo do

comportamento dos solos dessas áreas litorâneas é importante para a segurança das fundações das torres eólicas.

No litoral nordestino do Brasil, a costa do Ceará, conhecida pelo seu potencial de geração de energia eólica, é uma área visada para projetos de parques eólicos offshore, entretanto, estudos geotécnicos detalhados a respeito do comportamento das areias carbonáticas presentes na costa são escassos.

As características e propriedades mecânicas das areias carbonáticas de origem litorânea são assuntos de interesse em pesquisas de diversos locais do mundo (Poulos 1998, Wang et al. 2011, Ding et al. 2021, Barroso & Moura 2023). Diversos estudos exploram a resistência ao cisalhamento de areias carbonáticas (Salem et al. 2013, Wang et al. 2017, Wei et al. 2021), bem como relatam que as areias calcárias apresentaram ângulos de atrito superiores aos de areias quartzosas (Mitchell e Soga 2005, Hassanlourad et al. 2008, Brandes 2011). Ademais, esses estudos comparativos apontam que as areias calcárias apresentaram um comportamento dilatante.

De acordo com Holmes (1978), os sedimentos calcários cobrem aproximadamente 40% do fundo do oceano, assim, a presença de areias carbonáticas calcárias não é incomum em águas rasas oceânicas. Como as áreas costeiras brasileiras frequentemente apresentam potencial de geração de energia eólica sustentável, é notório a necessidade de estudos neste contexto.

Portanto, em vista das particularidades do comportamento das areias carbonáticas de sedimentos calcáreos, bem como da escassez de dados a respeito das areias da costa do estado do Ceará, o objetivo desse trabalho é analisar e comparar o comportamento de duas areias de diferentes locais do litoral cearense, uma calcária e uma quartzosa. Para isso, foram feitos ensaios de caracterização e ensaios de compressão triaxial drenados para avaliar a resistência ao cisalhamento das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram coletadas as amostras deformadas A1 e A2, sendo a primeira uma amostra de areia quartzosa retirada na fôz do rio Pacoti, no localizado no município de Aquiraz-CE, e a segunda uma areia carbonática retirada mais superficialmente do subsolo marinho e a cerca de 500 m da praia de Moitas, localizada no município de Amontada-CE. Os ensaios de laboratório foram divididos em duas etapas, primeiro os ensaios de caracterização de solo e em seguida os ensaios de triaxiais drenados.

2.1 Ensaios de caracterização

Para cada amostra de solo foram executados os seguintes ensaios de caracterização: granulometria, ensaios de densidade real dos grãos, ensaios de índice de vazios máximo e mínimo e fluorescência de raios X para análise da composição química.

A preparação das amostras para a caracterização foi feita de acordo com a NBR 6457/2106: Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, e a execução dos ensaios de granulometria foi feita de acordo com a NBR 7181/2016: Solo – Análise granulométrica.

Inicialmente, as amostras foram secas ao ar até atingir a umidade higroscópica, em seguida foram quarteadas e separadas para cada ensaio. As curvas granulométricas (Figura 1) mostram uma melhor distribuição do tamanho das partículas na amostra de areia calcária (A2), classificada como areia bem graduada com silte (SW-SM). Já a areia quartzosa é bastante uniforme, sendo assim, classificada como areia mal graduada (SP). A fração arenosa do solo quartzoso do rio Pacoti (A1) é de 99,02%, com aproximadamente 77,47% de areia média, e apenas 0,87% de material fino passante na peneira de número 200. Em contraste, o solo calcáreo da praia de Moitas (A2) apresenta uma fração arenosa de 63,38%, 25,01% de pedregulho e 11,61% de material fino.

Em seguida, foram separadas amostras para os demais ensaios de caracterização. A partir dos ensaios de índices de vazios máximo e mínimo e de densidade real dos grãos, foram obtidas as informações para calcular a massa de solo necessárias para moldar os corpos de prova dos ensaios triaxiais. Para fins de comparação, as características dos corpos de prova utilizados nesses ensaios para cada areia estudada estão dispostas na Tabela 1.

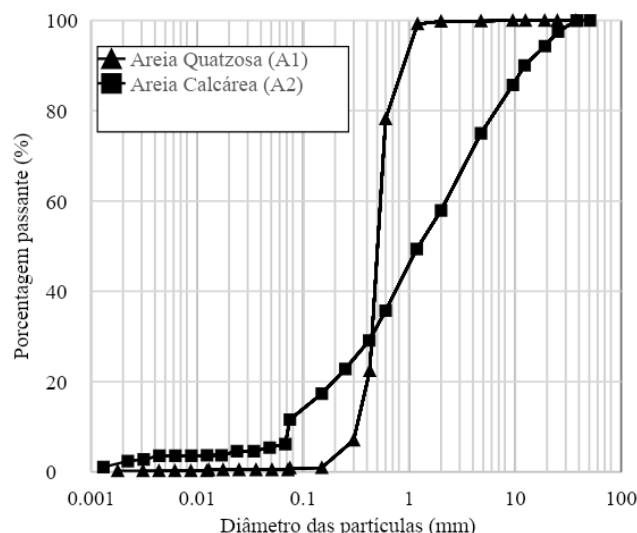


Figura 1. Curvas granulométricas das amostras de areia quartzosa (A1) e de areia calcária (A2).

Tabela 1. Parâmetros obtidos nos ensaios de caracterização das amostras A1 (areia quartzosa) e A2 (areia calcária).

Índice/Coefficiente	A1	A2
Umidade (%)	0,04	0,98
Massa específica. Máx (g/cm³)	1,69	1,70
Massa específica. Mín (g/cm³)	1,49	1,43
Densidade real dos grãos	2,68	2,69
Índice de vazios. Máx	0,79	0,89
Índice de vazios. Mín	0,58	0,60
Coefficiente de não uniformidade	1,65	30,55
Coefficiente de curvatura	1,19	1,22

A densidade real dos grãos de solo (G_s) foi obtida a partir da metodologia disposta na NBR 6458/2017: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Já os ensaios de índice de vazios máximo ($e_{\max}$) e mínimo ($e_{\min}$) foram determinados conforme a NBR 16840/2020: Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos e a NBR 16843/2020: Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos, respectivamente.

Para a análise de composição química das areias, foram separadas amostras de 30 g de cada solo para serem destorroadas em almofariz e submetidas a um ensaio de fluorescência de raio X. A areia quartzosa (A1) apresentou um percentual de dióxido de silício ou sílica (SiO_2) de 92,87%, sendo esse o composto químico do quartzo. Já a areia calcária apresentou 47,98% de sílica e 38,87% de óxido de cálcio (CaO) como principais componentes. A Tabela 2 resume os compostos encontrados em cada solo pelo ensaio de fluorescência de raio X.

Por ter sido coletada do subsolo do mar, a areia calcária (A2) também apresentou grande quantidade de conchas e de rodolitos, os quais são formados por carbonato de cálcio, o que explica o seu teor de calcário de 88,46%, enquanto a amostra da areia quartzosa (A1) apresentou apenas 1,23% de calcário.

Tabela 2. Composição química das amostras A1 (areia quartzosa) e A2 (areia calcária) com base no ensaio de fluorescência de raio X.

Compostos	A1	A2
SiO ₂ (%)	92,87	47,98
CaO (%)	0,79	38,87
Al ₂ O ₃ (%)	4,06	4,60
K ₂ O (%)	1,48	2,12
Fe ₂ O ₃ (%)	0,21	1,87
MoO ₃ (%)	0,10	0,85
MgO (%)	0,00	3,28
TiO ₂ (%)	0,00	0,39
P ₂ O ₅ (%)	0,46	0,00

2.2 Ensaios de compressão triaxial drenado

Os ensaios de compressão triaxial visam comparar o comportamento de resistência ao cisalhamento das areias quartzosa (A1) e calcária (A2).

As massas de solo foram calculadas para a moldagem dos corpos de prova, para a condição fofa e densa, com base na densidade real dos grãos e, respectivamente, nos índices de vazios máximo e mínimo. Na condição fofa, as massas de solo calculadas para os corpos de prova das areias quartzosa (A1) e calcária (A2) foram de 807,93 g e 791,5 g, respectivamente. Para o estado denso, as massas de areia calculadas foram de 914,79 g e de 937,83 g.



Figura 2. Corpo de prova remodelado para o ensaio triaxial.

No total, foram feitos 12 ensaios triaxiais drenados, nos quais, cada corpo de prova (Figura 2) foi moldado a partir das amostras deformadas de ambas as areias utilizando um molde cilíndrico com dimensões de 140 mm de altura e 70 mm de diâmetro. A execução dos ensaios seguiu as recomendações da norma ASTM D3080 – 23: Standard Test Method For Direct Shear Test Of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

Os corpos de prova de cada solo foram igualmente submetidos a etapas de saturação por percolação e contrapressão até atingir um nível de saturação de pelo menos 95 %. Em

seguida, os corpos de prova saturados foram adensados nas tensões de confinamento definidas para cada ensaio, sendo essas de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, para então serem rompidas na prensa do aparelho triaxial.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As envoltórias de tensões das areias (Figuras 3 e 4) mostram um crescimento significativo nas tensões desvio do estado fofa para o denso, nas quais, cada ponto da reta que tangencia os círculos de mohr, representa um dos ensaios nas tensões confiantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Em relação ao comportamento de tensão vs. deformação, as Figuras 5 e 6 compararam os resultados obtidos nos ensaios realizados em ambas as areias.

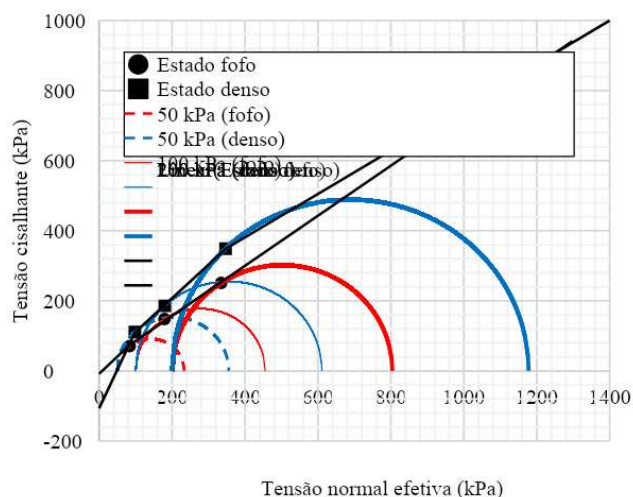


Figura 3. Envoltória de tensão da areia quartzosa (A1).

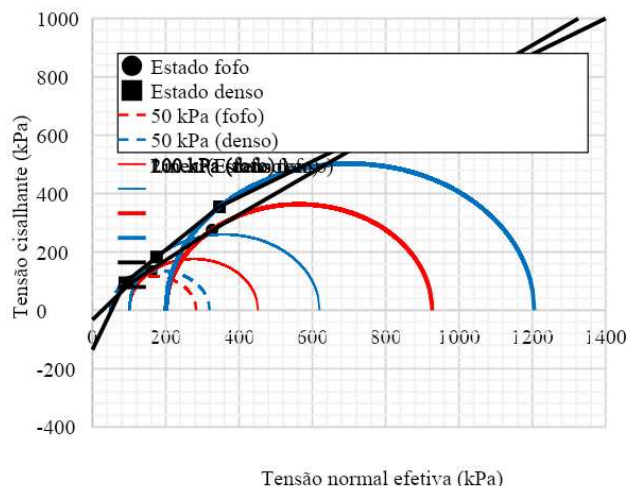


Figura 4. Envoltória de tensão da areia calcária (A2).

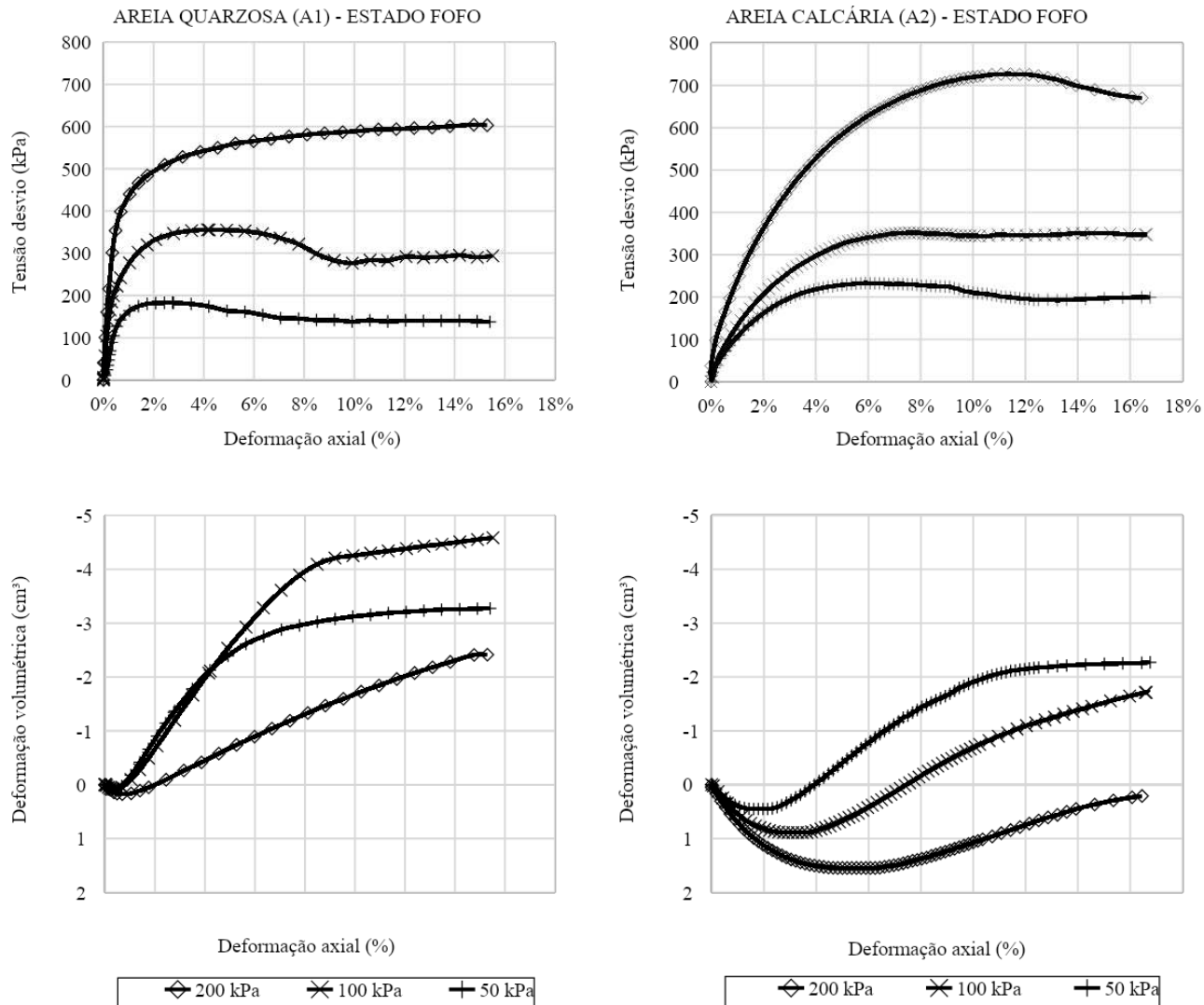


Figura 5. Curvas de tensão desvio vs. deformação axial e curvas de deformação volumétrica vs. deformação axial das areias no estado fofo.

Comparando os gráficos da Figura 5 observa-se que a areia quartzosa (A1) apresenta valores menores de tensão desvio de ruptura em comparação com a areia calcária (A2), principalmente, no estado fofo e para a tensão confinante mais elevada (200 kPa).

No geral, a areia calcária (A2) apresentou os maiores picos de tensão desvio na maioria dos ensaios, sendo superado pela areia quartzosa (A1) apenas em dois casos, no ensaio com pressão confinante de 100 kPa no estado fofo e no ensaio com pressão confinante de 50 kPa no estado denso. Assim, as Figuras 5 e 6 evidenciam que para níveis iguais de tensão confinante, os solos mostraram comportamentos visivelmente diferentes nas curvas de tensão desvio vs. deformação axial.

Analisando os ensaios com corpos de prova moldado para o estado fofo, a areia carbonática (A2) exibiu curvas de tensão vs. deformação com crescimento mais suaves e alcançando 726,78

kPa de tensão desvio sob a tensão confinante de 200 kPa, enquanto os ensaios desenvolvidos nas tensões menores de 50 kPa e de 100 kPa mostraram valores menos distantes de tensão desvio em relação as curvas da areia quartzosa (A1). A Tabela 3 resume os picos de tensão desvio encontrados em cada ensaio.

Tabela 3. Valores máximos de tensão desvio em cada ensaio.

Pico de tensão desvio (kPa)	A1	A2
Ensaio 50 kPa - fofo	183,19	233,08
Ensaio 100 kPa - fofo	355,46	351,82
Ensaio 200 kPa - fofo	604,13	726,78
Ensaio 50 kPa - denso	305,57	269,71
Ensaio 100 kPa - denso	510,85	519,94

Ensaio 200 kPa - denso	977,79	1005,33
------------------------	--------	---------

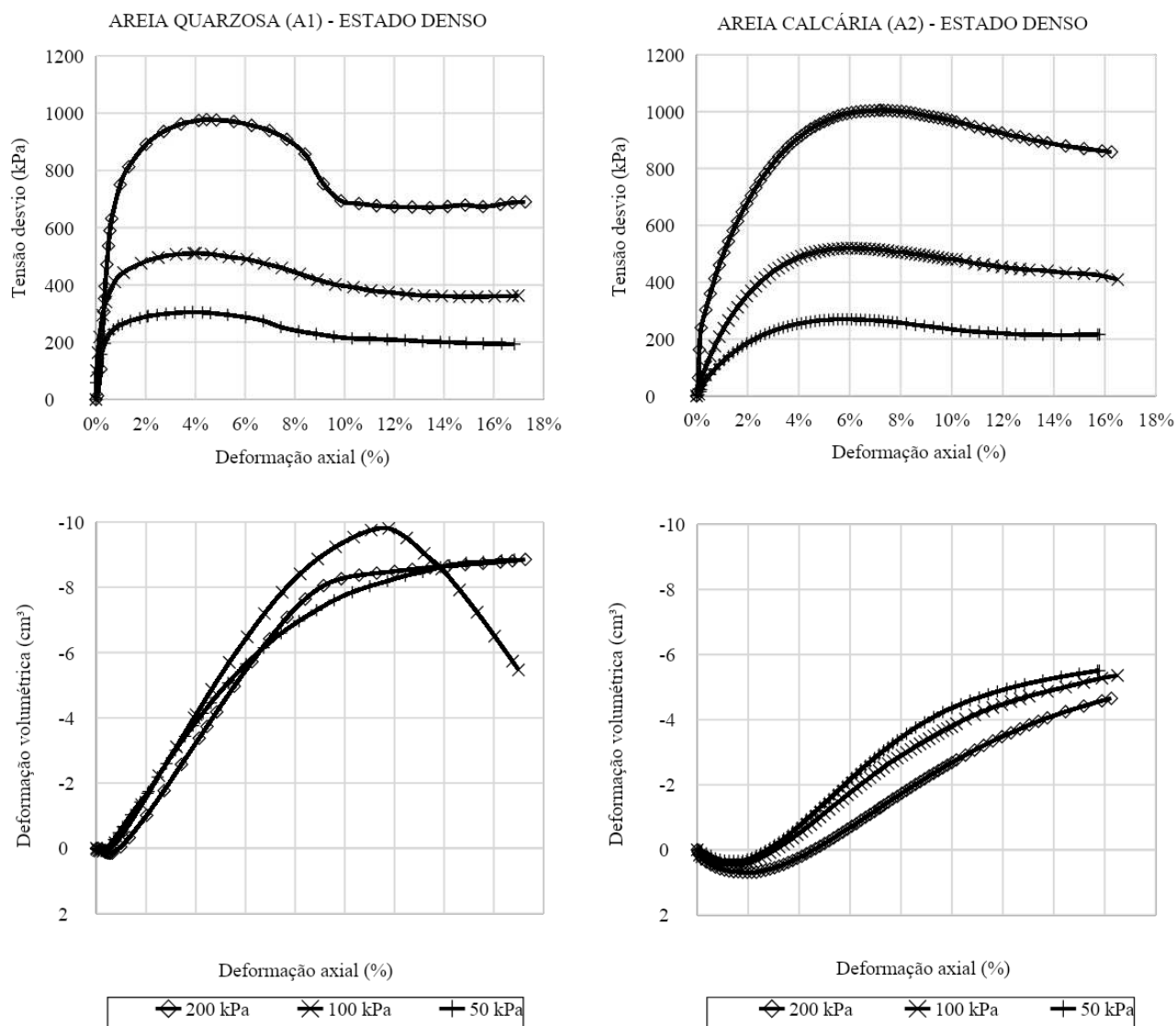


Figura 6. Curvas de tensão desvio vs. deformação axial e curvas de deformação volumétrica vs. deformação axial das areias no estado denso.

Os picos de tensão desvio da areia calcária (A2) se mostraram consideravelmente maiores em comparação a areia quartzosa (A1) nos ensaios com pressões confinantes de 50 kPa e de 200 kPa, enquanto os ensaios com pressão confinante de 100 kPa apontam uma diferença de apenas 3,64 kPa entre as areias. Esse comportamento também é observado nos ensaios com corpos de prova moldados para o estado denso, no qual os ensaios realizados na tensão confinante de 100 kPa também apresentaram a menor diferença de valor no pico de tensão desvio, nesse caso uma diferença de 9,09 kPa. Isso indica que independente do estado de densidade das areias, para tensões confinantes mais altas, as diferenças entre as tensões desvios de ruptura vão se tornando cada vez mais expressivas.

Apesar do grande aumento das tensões de pico, as curvas de tensão desvio vs. deformação axial dos ensaios executados no

estado denso apresentaram comportamento próximo aos do estado fofo na maioria dos casos. Na areia carbonática (A2), as curvas apresentam menor inclinação, indicando maior deformabilidade em comparação com a areia quartzosa (A1), a redução da tensão de pico para maiores deformações também é menor nos corpos de prova de areia calcária. A redução da tensão desvio após o pico foi mais acentuada para areia densa ensaiada com 200 kPa.

Quanto a deformabilidade desses solos, as curvas de deformação volumétrica vs. deformação axial caracterizam um comportamento dilatante para as duas areias, conforme as Figuras 5 e 6. A areia quartzosa (A1), tanto no estado fofo quanto no denso, sofreu mais com o efeito da dilatação em comparação com a areia carbonática (A2). Os ensaios com tensão confinante de 100 kPa em corpos de prova moldados com areia quartzosa (A1)

se destacam por apresentarem um comportamento divergente em relação aos outros níveis de tensão. No estado fofo, a curva de deformações indicou a maior dilatação, enquanto no estado denso, a curva passou a indicar compressão nas proximidades de 12% da deformação axial. A divergência nos resultados obtidos é atribuída a dificuldades na moldagem de corpos de prova em condições homogêneas.

O comportamento dilatante da areia calcária (A2) condiz com os resultados encontrados na pesquisa feita por Hassanlourad *et al.* (2008), que estudou areias calcárias do golfo persico. Comparativamente, a densidade real dos grãos e os índices de vazios máximo e mínimo da areia carbonática (A2) mostraram valores próximos aos das areias do golfo pérsico.

Comparando as deformações de ambas as areias, é notório que a compacidade do faz com que as linhas das curvas de deformações de volume fiquem mais próximas, mesmo com aumentos significativos de tensão confinante. Nos ensaios realizados no estado fofo, entretanto, as curvas de deformações das duas areias se distanciaram significativamente entre cada ensaio com o aumento da tensão confinante.

A areia calcária (A2), por outro lado, sofreu em todos os ensaios uma deformação por compressão visivelmente maior no início das curvas de deformações. Ainda assim, o ensaio com tensão confinante de 200 kPa no estado fofo foi o único desse solo que manteve um valor positivo de deformação de volume ao fim da fase de ruptura do corpo de prova. A Figura 7 mostra uma fotografia do aspecto típico dos corpos de prova após a ruptura, com superfície de ruptura nítida e expansão lateral acentuada.



Figura 7. Corpo de prova após término do ensaio triaxial drenado.

Em todos os casos, a areia calcária (A2) apresentou ângulos de atrito maiores e intercepto coesivos menores em relação à areia quartzosa, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Valores dos ângulos de atrito e interceptos coesivos das areias quartzosa (A1) e calcária (A2).

Parâmetros	A1	A2
Ângulo de atrito - fofo (°)	36,5	37,0

Ângulo de atrito - denso (°)	43,35	45,35
Intercepto coesivo - fofo (kPa)	15,58	12,91
Intercepto coesivo - denso (kPa)	15,63	5,57

Os ângulos de atrito da areia calcária (A2) superaram os da areia quartzosa (A1) tanto no estado fofo quanto no denso, com diferenças crescentes entre esses estados de 0,5° e 2,5°. Ademais, o aumento do ângulo de atrito entre os estados fofo e denso foi de 6,5° para a areia quartzosa (A1) e 8,5° para a areia calcária (A2). Os valores de intercepto coesivos, porém, se mantiveram praticamente constantes na areia quartzosa (A1), enquanto a areia na areia calcária houve uma redução de 7,34 kPa do estado fofo para o denso.

Os valores mais elevados dos ângulos de atrito da areia calcária (A2) em comparação com a areia quartzosa também condizem com os resultados dos trabalhos de Hassanlourad *et al.* (2008) e de Brandes (2011), bem como os valores das tensões de pico dos ensaios de resistência.

Todos esses resultados indicam que a areia calcária estudada (A2) foi capaz de mobilizar uma maior resistência ao cisalhamento nas condições testadas, principalmente em altos níveis de tensão confinantes. Portanto, a necessidade de estudar e compreender de forma detalhada as nuances do comportamento mecânico de solos de origem carbonática se mostra necessária para o desenvolvimento de modelos geotécnicos confiáveis para projetos de fundações em solos costeiros.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo evidência a complexidade das propriedades geomecânica das areias costeiras do estado do Ceará, no nordeste do Brasil. A conclusão decorreu do presente estudo experimental realizado a partir de ensaios triaxiais drenados em corpos de prova modelados com uma areia carbonática e uma areia quartzosa. A relação entre as areias quartzosa e carbonáticas estudadas apontam para uma maior resistência ao cisalhamento por parte da areia calcária coletada offshore.

Os resultados dos ensaios triaxiais drenados mostraram que a areia calcária alcançou maiores valores de tensões desvio em relação a areia quartzosa na maioria dos ensaios. Os ângulos de atrito também superaram os da areia quartzosa tanto no estado fofo quanto no denso, com diferenças consideráveis entre esses estados de compacidade. A areia calcária também apresentou a maior crescimento do ângulo de atrito do estado fofo para o denso. Todavia, o seu intercepto coesivo diminuiu com a densificação dos corpos de prova, enquanto a areia quartzosa manteve praticamente os mesmos valores para os dois estados.

As deformações observadas indicam um comportamento dilatante para as duas areias, de forma que a areia quartzosa apresentou maior dilatação. Na areia quartzosa as tensões confinantes causaram efeitos divergente no seu comportamento em relação as deformações volumétricas, de forma que os ensaios na tensão mediana de 100 kPa resultaram em dilatações mais elevadas que os das outras tensões de confinamento. Dessa forma, pelo presente estudo, fica evidenciada a necessidade de uma compreensão mais aprofundada do comportamento mecânico de solos carbonáticos de forma a possibilitar a formulação de modelos geotécnicos mais representativos para uso em projetos

de fundações em solos costeiros.

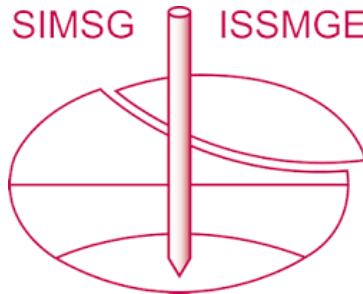
5 AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores também agradecem o apoio financeiro da PETROBRAS, o apoio do Departamento de pós-graduação DEHA da Universidade Federal do Ceará (UFC).

6 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de Solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. **Rio de Janeiro**, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 6458: Solo — Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. **Rio de Janeiro**, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. **Rio de Janeiro**, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16840: Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. **Rio de Janeiro**, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16843: Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. **Rio de Janeiro**, 2020.
- ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7181 - 20: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. Philadelphia, 2020.
- Barroso F.O.P., & Moura A.S. 2023. Proposition of correlations for the dynamic parameters of carbonate sands. *Soils and Rocks*, 46.
- Brandes H.G. 2011. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 29, p. 113-126.
- Ding Z., He S.H., Sun Y., Xia T.D., and Zhang Q.F. 2021. Comparative study on cyclic behavior of marine calcareous sand and terrigenous siliceous sand for transportation infrastructure applications. *Construction and Building Materials*, v. 283, p. 122740.
- Hassanlourad, M.; Salehzadeh, H., & Shahnazari, H. 2008. Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects. *International Journal of Civil Engineering*, 6(2): 108-119.
- Holmes A. 1978. Principles of Physical Geology Sunbury-on-Thames. Nelson, London, p. 730.
- Mitchell J.K. and Soga K. 2005. Fundamentals of soil behavior. New York: *John Wiley & Sons*.
- Poulos H.G. 1988. The mechanics of calcareous sediments (John Jaeger Memorial Address). *Australian Geomechanics*.
- Salem M., Elmamlouk H., Agaiby S. 2013. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, v. 55, p. 83-91.
- Wang X.Z., Jiao Y.Y., Wang R., Hu M.J., Meng Q.S. and Tan F.Y. 2011. Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea. *Engineering geology*, v. 120, n. 1-4, p. 40-47.
- Wang, X.Z., Wang, X., Jin, Z.C., Zhu, C.Q., Wang, R. and Meng, Q.S. 2017. Investigation of engineering characteristics of calcareous soils from fringing reef. *Ocean Engineering*, v. 134, p. 77-86.
- Wei, H., Yin, M., Zhao, T., Yan, K., Shen, J., Meng, Q. and He, J. 2021. Effect of particle breakage on the shear strength of calcareous sands. *Marine Geophysical Research*, 42, 1-11.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.