

Avaliação Preliminar do Comportamento Geomecânico de Areias Calcárias de Regiões Costeiras do Ceará

Gabriela França Azevedo

Doutoranda, Universidade de Brasília – UNB. Distrito Federal. Brasil. gabrielaazevedotn@hotmail.com

Matheus Vasconcelos do Nascimento

Mestrando, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. matheusvasna@gmail.com

Rosiel Ferreira Leme

Professor, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. rosiefferreira@gmail.com

Roberto Antônio Cordeiro Silva

Técnico de Laboratório, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. roberto@det.ufc.br

Francisco Chagas da Silva Filho

Professor, Universidade Federal do Ceará – UFC. Fortaleza. Brasil. fchagas@ufc.br

RESUMO: Embora a região costeira do Brasil apresente uma alta incidência de solos compostos por sedimentos carbonáticos, as areias carbonáticas naturais permanecem pouco estudadas. Esses solos apresentam um comportamento complexo, caracterizado por grandes mudanças de densidade e alto índice de vazios. Além disso, são normalmente frágeis e altamente compreensíveis, o que influenciam diretamente no comportamento das fundações. Compreender o comportamento geomecânico desses solos é de suma importância para o desenvolvimento de projetos geotécnicos adequados levando em consideração as propriedades específicas desses tipos de solos. Nesse sentido, esse estudo investigou os parâmetros de resistência de areias carbonáticas do litoral cearense em diferentes teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) por meio de ensaios de cisalhamento direto. Uma tendência no aumento da resistência ao cisalhamento à medida que teor de CaCO_3 aumenta foi observado, especialmente para baixas tensões normais. Além disso, observou-se um aumento no ângulo de atrito com o aumento do teor de CaCO_3 , mas isso ocorreu apenas a um certo limite de CaCO_3 , além do qual o ângulo de atrito não é significativamente aumentado.

PALAVRAS-CHAVE: Areia Calcária, Solo Carbonático, Parâmetros de Resistência, Carbonato de Cálcio

ABSTRACT: Although the coastal region of Brazil has a high incidence of soils composed of carbonate sediments, natural carbonate sands remain little studied. These soils have highly variable behavior, characterized by large variations in density and a high level of voids. Furthermore, they are normally fragile and highly comprehensible, which directly influences the behavior of the foundations. Understanding the geomechanical behavior of these soils is of utmost importance for the development of appropriate geotechnical projects taking into account the specific properties of these types of soils. In this sense, this study investigated the resistance parameters of carbonate sands from the Ceará coast at different levels of calcium carbonate (CaCO_3) through direct shear tests. A trend toward increasing shear strength as CaCO_3 content increases was observed, especially at low normal stresses. Furthermore, an increase in the friction angle was observed with increasing CaCO_3 content, but this occurred only at a certain limit of CaCO_3 , beyond which the friction angle is not significantly increased.

KEYWORDS: Carbonate sands, Carbonatic Soil, Strength Parameters, Calcium Carbonate

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de solos carbonáticos, em zonas tropicais e intertropicais do planeta, são muito comuns, incluindo o litoral brasileiro, em especial, na região nordeste. O estudo das propriedades geotécnicas desse

tipo de solo ainda não está totalmente esclarecido. Compreender as propriedades geotécnicas das areias carbonáticas é de extrema importância, por exemplo, para a construção de estruturas off-shore com projetos eficientes, em especial, torres eólicas, dada a alta incidência de ventos e a extensão litorânea. A instalação de parques eólicos, em ambiente marítimo, é cada vez mais comum dado o potencial de produção de energia elétrica brasileira e das mudanças ocorridas na matriz energética com a introdução de formas de geração de energia alternativas. Cabe salientar que atualmente o Brasil conta com vários projetos offshore em andamento, até o mês de dezembro de 2023, totalizam-se 96 processos de licenciamento ambiental de torres eólicas offshore abertos no Ibama distribuídas nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste. Parte considerável desses processos, cerca de 26%, estão localizados nos estados do Ceará (25 processos) e Rio Grande do Norte (14 processos).

As areias carbonáticas naturais possuem propriedades geotécnicas diferentes das areias quartzosas, embora ainda existam poucos estudos sobre o seu comportamento quando sujeitos a carregamentos, como o das torres eólicas off-shore. Dentre as principais características observadas nos solos carbonáticos estão: alta variabilidade, alta densidade, baixo índice de vazios, e alta fragilidade e compressibilidade. No Brasil, há uma carência de estudos sobre os solos carbonáticos naturais, embora existam algumas pesquisas, estas, geralmente são conduzidas com solos carbonáticos artificiais que não representa fielmente o comportamento dos solos naturais.

O aspecto geomecânico das areias carbonatadas marinhas é extremamente dependente de vários fatores, que por sua vez, dominam o seu comportamento. Huang & Airey, (1993) estudaram o comportamento das areias carbonáticas da plataforma no noroeste da Austrália através de ensaios triaxiais e oedométricos. A pesquisa mostrou que a compressibilidade varia conforme diferenças na mineralogia, forma e química do solo. A deformação plástica durante a compressão é devido, em grande parte, a quebra das partículas, o que explica as grandes deformações quando submetidos a tensões normais baixas.

Le Tirant e Nauroy (1994), estudaram sobre os solos carbonáticos visando projetos de fundações. Em seu trabalho, o tipo de partícula, distribuição do grão, grau de cimentação e as propriedades mecânicas tais como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade podem ser bastante variáveis, de região para região, mesmo para curtas distâncias. Esta variação não dificulta apenas a interpretação de resultados de investigação, mas também na previsão do comportamento de fundações. Hyodo et. al. (1996) relata que os solos carbonáticos já foram responsáveis por graves problemas de fundação em projetos offshore. O que incentivou o desenvolvimento de pesquisas nesses solos. Nota-se que é de suma importância uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a capacidade de suporte de fundações nos subsolos offshore carbonáticos e, em particular, nos solos carbonáticos nordestinos devido a demanda por projetos eólicos.

Nesse sentido, o presente artigo tem como objetivo principal avaliar a influência do teor de carbonato de cálcio nos parâmetros de resistência de areias carbonáticas naturais encontradas no litoral nordestino. Para isso, realizou-se uma avaliação preliminar do comportamento geomecânico das areias calcáreas em regiões costeiras do Ceará a partir de ensaios de cisalhamento direto com amostras em diferentes teores carbonáticos, coletadas em diferentes locais, com o objetivo de explorar a relação entre o teor de Carbonato de Cálcio e o comportamento das areias.

2 AREIAS CARBONÁTICAS

Segundo Tucker e Wright (1990), rochas carbonáticas são rochas sedimentares constituídas por mais de 50% de minerais carbonáticos, sendo os mais importantes: calcita (CaCO_3 ; trigonal), dolomita ($\text{Ca}\cdot\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$; trigonal) e aragonita (CaCO_3 ; ortorrômbica). Diferentemente, Zuffa (1985) denomina rochas que possuam entre 1/3 e 2/3 de grãos carbonáticos em relação aos siliciclásticos de arenitos híbridos, e arenitos carbonáticos ou calcarenitos aquelas com 2/3 ou mais de constituintes primários carbonáticos.

De um modo geral, as areias carbonáticas são formadas a partir de processos químicos e, principalmente, bioquímicos, que ocorrem em regiões onde o nível de profundidade é raso, as águas são quentes e de cor clara (Wilson, 1975). Formados a partir da deposição de carbonato de cálcio em corais, por algas e fragmentos de conchas. São solos que possuem características variáveis quando comparados a solos quartzosos. Dentre as características deste tipo de solo estão a alta densidade, o alto índice de vazios, e uma maior fragilidade e compressibilidade. Quando submetidos à carregamentos apresentam módulo de elasticidade elevados para baixas cargas aplicadas.

Conforme Xin-Zhi Wang (2011) a maior parte das deformações que ocorrem são plásticas, ou seja, são

irreversíveis. No que se refere a compressibilidade, os solos carbonáticos apresentam redução de volume quando submetidos a baixos carregamentos e isso se deve ao alto índice de vazios, considerando que é um solo formado pela deposição de sedimentos. Entretanto, quando submetidos a carregamentos elevados, os solos carbonáticos tendem a apresentar uma maior capacidade de carga em virtude do maior contato, entre as partículas, provocado pelo aumento de tensão normal.

2.1 Areias Carbonáticas no Ceará

No nordeste brasileiro verifica-se uma alta incidência de solos carbonáticos na região litorânea. No mapa faciológico da Figura 1 é possível observar que existe uma quantidade considerável de areias bioclásticas na faixa compreendida entre os municípios de Fortaleza e Cruz, no litoral Oeste. Nessa região há uma extensa área com areias cujo os teores de CaCO_3 são maiores que 50%. Segundo Maia de Almeida (2021), alguns locais da plataforma interna continental podem apresentar formação de carbonato de cálcio e o teor dessa substância aumenta à medida que se aproxima do talude continental. Ressalta-se que o teor de carbonato de cálcio (CaCO_3) influencia diretamente na resistência e no comportamento dos solos carbonáticos. Importante salientar que ainda há poucos estudos sobre o comportamento dos solos carbonáticos brasileiros.

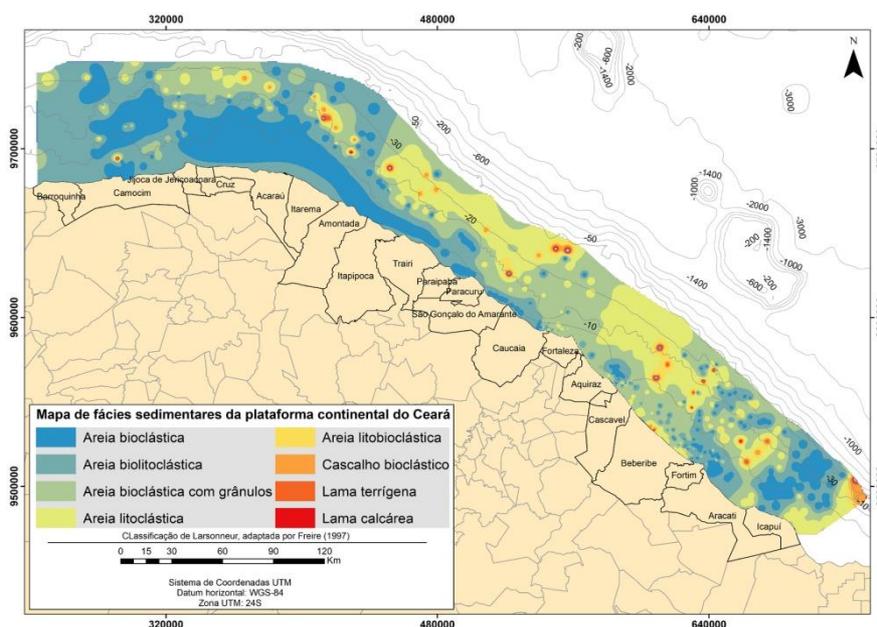


Figura 1 – Mapa faciológico da Plataforma Continental do Ceará, (Maia de Almeida, 2021).

3 LOCAIS DE COLETA

Foram coletadas amostras em três locais ao longo do litoral cearense: amostra on-shore na Praia do Pacheco (PCH2), no Município de Caucaia, distante 15 Km da capital Fortaleza e amostras on-shore (MT1 e MT2) e off-shore (PC1) na Praia de Moitas, no município de Amontada a uma distância de 192 km de Fortaleza, conforme ilustrado na Figura 2.



Figura 2 – Localização dos locais de coleta das amostras.

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Para avaliar o comportamento do solo carbonático, foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais: ensaios de Calcimetria de Bernárd e ensaios de Cisalhamento direto.

4.1 Análise Química

Os teores de carbonato de cálcio (CaCO_3) das amostras naturais analisadas foram determinados utilizando o método do Calcímetro de Bernard, que se baseia na titulação ácido-base para quantificar o CaCO_3 presente na amostra de solo. A determinação do teor de carbonato de cálcio é feita pela leitura da variação de volume devido a liberação do gás carbônico na reação química que ocorre entre o ácido clorídrico em contato com o carbonato de cálcio da amostra de solo.

De acordo com os teores encontrados, as amostras foram classificadas conforme a proposta de Larsonneur (1977) para os depósitos de sedimentos na plataforma francesa, adaptada por Dias (1996) para os sedimentos da plataforma continental brasileira. Essa classificação define quatro categorias em função do teor de carbonato de cálcio conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Concentração de CaCO_3 nas amostras.

Classificação	CaCO_3 %
Litoclásticos	$\text{CaCO}_3 < 30\%$
Litobioclástico	$30\% < \text{CaCO}_3 < 50\%$
Bilitoclástico	$50\% < \text{CaCO}_3 < 70\%$
Bioclástico	$\text{CaCO}_3 > 70\%$

4.2 Ensaio de Cisalhamento Direto

Segundo Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento direto é o mais antigo procedimento para a determinação da resistência ao cisalhamento. Baseia-se diretamente na aplicação da equação de Mohr-Coulomb (Equação 1):

$$\tau = c + \sigma \text{tg } \Phi \quad (1)$$

Inicialmente, aplica-se uma tensão normal a um plano conhecido e mede-se a tensão de cisalhamento que provoca a ruptura. O mesmo procedimento é repetido para outras tensões normais, de modo que é possível construir a envoltória de ruptura por interpolação desses pontos em um sistema de eixos tensão normal (σ) versus tensão cisalhante (τ).

Os ensaios de cisalhamento direto, determinação de densidade e índices de vazios máximos e mínimos foram conduzidos com material passante na peneira de 4,8 mm da ABNT. Os ensaios para determinação de $e_{m\acute{a}x}$ e $e_{m\acute{i}n}$ foram realizados para nortear a definição da compacidade dos corpos de prova que foram ensaiados

no cisalhamento direto. Os ensaios de cisalhamento foram realizados com deslocamento constante, a uma velocidade de, aproximadamente, 0,2 mm/min com interrupção do equipamento quando o deslocamento horizontal atingiu 16% da dimensão do corpo de prova. As tensões normais aplicadas foram de 50, 100 e 200 kPa, respeitando os estágios de inundação e adensamento das amostras.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados nas amostras naturais.

5.1 Análise Química

Na Tabela 2, são mostrados os teores de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) das amostras, determinados por meio do ensaio com o Calcímetro de Bernard. Observa-se que as amostras obtidas apresentam teores que variam de 4,1% a 93,7 % de CaCO_3 . Essa variação nos valores reflete a significativa variação na composição das amostras em relação ao teor de CaCO_3 , fornecendo uma melhor compreensão da distribuição desse componente nas diferentes localidades estudadas.

Tabela 2: Concentração de CaCO_3 nas amostras do Pacheco, Moitas e da Plataforma Continental (PC).

Local	Nomenclatura	CaCO_3 (%)	Classificação
Pacheco	PCH 2	4,1	Litoclástico
Moitas	MT2	22	Litoclástico
	MT1	30,2	Litobioclástico
PC	PC 1	93,7	Bioclástico

5.2 Ensaio de caracterização

Na tabela 3 são apresentados a densidade real dos grãos (Gs), os índices de vazios máximo e mínimo ($e_{\text{máx}}$ e $e_{\text{mín}}$) e as densidades mínima e máxima ($\rho_{\text{mín}}$ e $\rho_{\text{máx}}$) das amostras ensaiadas. Notavelmente, observa-se que a densidade real dos grãos (Gs) tende a aumentar conforme o teor de carbonato de cálcio (CaCO_3) aumenta. Destaca-se que os valores encontrados para o Gs e os índices de vazios são consistentes com as referências da literatura, conforme citado em estudos anteriores como Salem et al., (2013) nas areias do Egito, Gomes (2020) e Barroso & Moura (2023) nos solos do litoral nordestino brasileiro.

Tabela 3: Índices físicos das amostras.

	PCH2	MT1	MT2	PC1
	4,1%	22%	30,2%	93,7%
Gs	2,64	2,66	2,65	2,71
$e_{\text{máx}}$	0,81	0,84	1,16	0,85
$e_{\text{mín}}$	0,52	0,63	0,91	0,69
$\rho_{\text{mín}}$ (g/cm ³)	1,51	1,45	1,23	1,48
$\rho_{\text{máx}}$ (g/cm ³)	1,80	1,64	1,39	1,62

5.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Nas Figuras 3, 4 e 5, estão apresentadas as curvas de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal para as amostras analisadas, em diferentes valores de tensão normal: 50, 100 e 200 kPa, respectivamente. No geral, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto revelaram que os solos carbonáticos estudados apresentam deformação volumétrica considerável para baixos valores de tensão normal. Tal fato se deve a alta compressibilidade provocada pela porosidade, irregularidades na forma dos grãos e fragilidade dos mesmos.

Observa-se que para uma tensão normal de 50 kPa (Figura 3), os corpos de prova (cps) de areias com teores de CaCO_3 até 22% apresentaram menor resistência em comparação aos que possuem teor de CaCO_3 superior a 30%. Destaca-se também uma resistência maior para o teor de 30% em relação ao de 93% de CaCO_3 . Além disso, os teores mais baixos de CaCO_3 resultaram em deslocamentos mais pronunciados sob tensões cisalhantes baixas, como evidenciado nas amostras PCH2 e MT2, com teores de 4,1% e 22,0% de CaCO_3 , respectivamente. Essa tendência se altera com o aumento da tensão normal para 100 e 200 kPa (Figuras 4 e 5), onde os cps com teores entre 20% e 30% de CaCO_3 mostraram maior resistência ao cisalhamento em comparação à amostra com mais de 90% de CaCO_3 . Os resultados indicam que para tensões normais mais elevadas, como 200 kPa, as tensões cisalhantes de ruptura tendem a se igualar. Entretanto, para cps com 93,7% de CaCO_3 , a ruptura ocorreu em deformações mais elevadas. Por outro lado, os cps com 4,1% de CaCO_3 apresentaram as menores tensões cisalhantes de ruptura em todas as tensões normais consideradas.

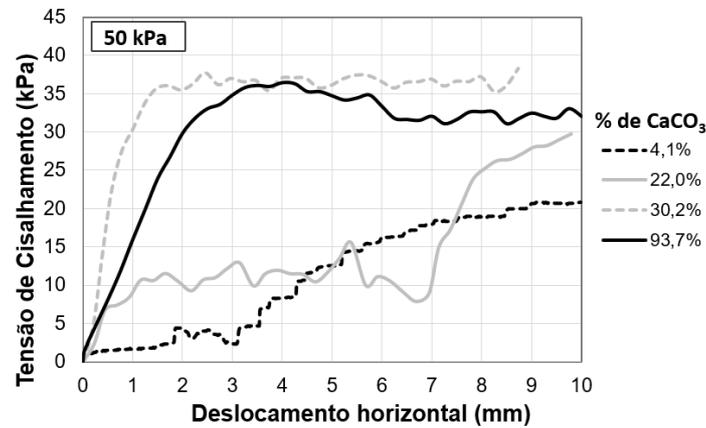


Figura 3 – Curvas de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal para tensão normal de 50 kPa.

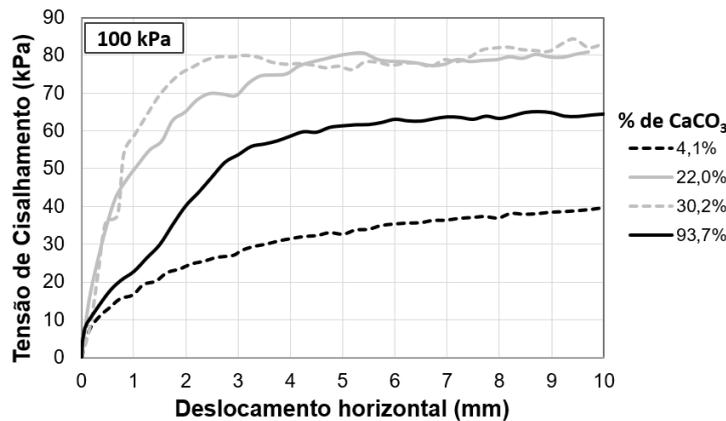


Figura 4 – Curvas de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal para tensão normal de 100 kPa.

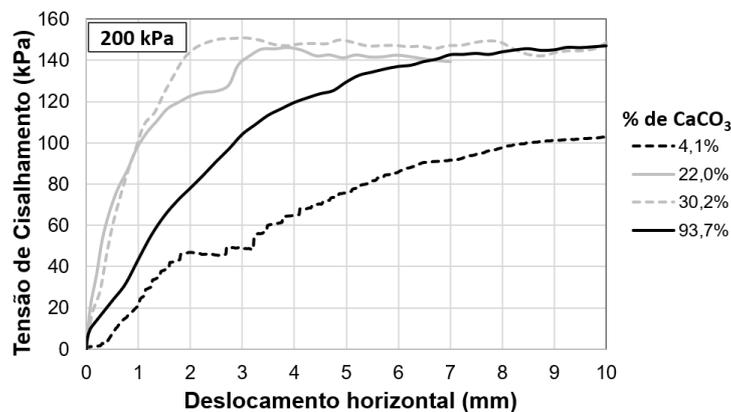


Figura 5 – Curvas de tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal para tensão normal de 200 kPa.

Na análise das envoltórias de ruptura, conforme ilustrado na Figura 6, observa-se uma variação no ângulo de atrito das amostras em relação ao teor de carbonato de cálcio presente em sua composição. Adicionalmente, nota-se que não há intercepto coesivo em nenhuma das amostras, o que está de acordo com os resultados esperados para areias fofas. De modo geral, verifica-se uma tendência no aumento no ângulo de atrito conforme o teor de CaCO_3 aumenta. Entretanto, entre as amostras analisadas, aquela com teor de carbonato em 22% exibiu um ângulo de atrito superior às demais, possivelmente devido à angularidade dos grãos e embricamento entre as partículas devido as suas rugosidades. Resultados indicam valores mais elevados nos solos com maior teor de CaCO_3 . Destaca-se que os ângulos de atrito entre as amostras com 22%, 30,2% e a amostra com 93,7% de CaCO_3 não apresentaram alteração significativa, o que pode-se sugerir que, após um determinado percentual de CaCO_3 , pode ocorrer uma possível uma redução na resistência, indicando uma possível mudança na resposta mecânica do solo.

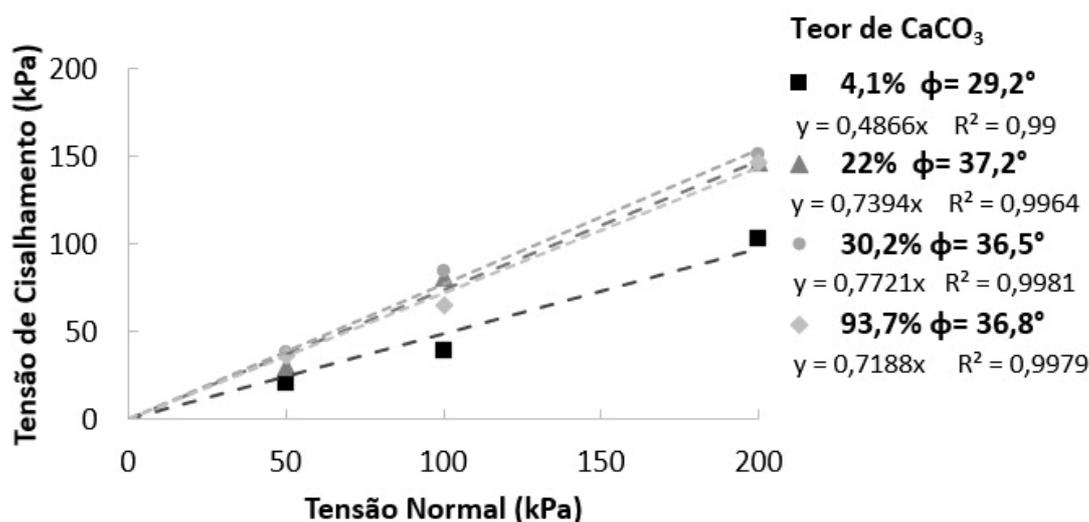


Figura 6 – Envoltória de ruptura e ângulos de atrito (ϕ).

5 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, conclui-se que o teor de carbonato de cálcio exerce influência nas propriedades mecânicas das areias carbonáticas estudadas, especialmente no que diz respeito à resistência ao cisalhamento. A partir dos resultados de cisalhamento direto, observou-se uma tendência no aumento da tensão cisalhante de ruptura com o teor de CaCO_3 para baixas tensões normais (50 kPa). Essa tendência se modifica para maiores tensões normais. Para tensões normais mais elevadas as tensões de cisalhante de ruptura tendem a ficar muito próximas. No entanto, para os CP's de 93,7% de CaCO_3 , a tensão cisalhante de ruptura ocorreu em deformações mais elevadas

Os resultados obtidos revelam uma tendência clara de aumento no ângulo de atrito à medida que o teor de CaCO_3 aumenta nas amostras de solo. No entanto, chama atenção o fato de que, após atingir um certo percentual de CaCO_3 , não foi observada uma alteração significativa nos ângulos de atrito. Isso sugere a existência de um limite no teor de CaCO_3 , além do qual o ângulo de atrito não apresenta elevação significativa. Ademais, é de fundamental importância a realização de estudos mais aprofundados com uma maior variedade de amostras abrangendo diferentes teores de carbonato de cálcio. Resultados indicam valores mais elevados nos solos com mais teor de CaCO_3 . Os resultados indicam a complexidade do comportamento mecânico dos solos carbonáticos. Dessa forma, observa-se a importância de pesquisas mais amplas de forma a obter-se uma compreensão mais precisa desses tipos de solos.

Os resultados obtidos são importantes, sobretudo, para a elaboração de projetos de engenharia mais confiáveis, destacadamente para estruturas offshore, como aerogeradores. Dessa forma, ressalta-se a necessidade premente de estudos mais amplos sobre o comportamento dos solos carbonáticos, principalmente, no litoral nordestino cuja perspectiva de instalação de parques eólicos offshore já se transformou em realidade.

Dessa forma, estudos nesses tipos de solos fornecerão uma base mais consistente para o desenvolvimento de projetos adaptados às características específicas desses tipos de ocorrências.

AGRADECIMENTOS

Este estudo recebeu apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da PETROBRÁS, a quem os autores expressam o seu sinceros agradecimentos. Agradecimentos especiais são estendidos ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – DEHA, da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo seu apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dias, G.T.M. – 1996 - *Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas*. Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia Vol.3.
- Barroso & Moura (2023). *Proposition of correlations for the dynamic parameters of carbonate sands*. *Soil. Rocks*, São Paulo, 2023. Doi: 10.28927/SR.2023.001422
- Gomes, N. F. (2020). *Parâmetros Geotécnicos Estáticos E Dinâmicos De Areias Quartzosa E Carbonatadas*. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Huang, J. T. & Airey, D. W. (1993). *Effects of cement and density on an artificially cemented sand*, Proc. Int. Conf Hard Soils and Soft Rocks, Athens 1, 553- 560
- Hyodo, M., Aramaki, N., Itoh, M., & Hyde, A. F. L. (1996). *Cyclic strength and deformation of crushable carbonate sand*. In Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Vol. 15).
- Le Tirant, P., Nauroy, J. F., *Foundations in Carbonate Soils*, Éditions Technip, Paris, 1994.
- Larsonneur, C. – 1977 - La cartographie de's dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise du points et utilisée em Manche.
- Maia De Almeida, N.; Freire, G.S.S.; Morais, J.O.; Ximenes Neto, A.R.; Abreu Neto, J.C.; Pessoa, P.R.S.; Ferro, I.M.M.; Pinheiro, L.S. 2021. Plataforma Continental do Ceará. In: Vital, H.; Dias, M.S.; Bastos, A.C. (Org). Plataforma Continental Brasileira, Série II. Rio de Janeiro: P2GM, 2021, v.1, p. 71-121.
- Pinto, C. De S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 246 p.
- Poulos, H.G. (1988). “*The Mechanics Of Calcareous Sediments*”. Submitted to John Jaeger Memorial Address.
- Salem, M., Elmamlouk, H., & Agaiby, S. (2013). *Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.001>
- Tucker, M. E., and V. P. Wright, 1990, *Carbonate sedimentology: Oxford, Blackwell Scientific Publication*, 492p.
- Wilson, J.L. 1975. *Carbonate facies in geologic history*. Berlin: Springer-Verlag.
- Xin-Zhi Wang, Yu-Yong Jiao, Ren Wang, Ming-Jian Hu, Qing-Shan Meng, Feng-Yi Tan, 2011. *Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea*, Engineering Geology, Volume 120, Issues 1–4, 2011, Pages 40-47, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.011>.
- Zuffa, G. G., 1985, *Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results*, in G. G. Zuffa, Provenance of Arenites: Dordrecht, NATO-ASI Series, v. 148 p. 165-189.