

Propriedades Físico-Mecânicas de Rochas de Praia e Bancos Recifais: estudos preliminares voltados a eólicas offshore no litoral cearense

Roberto de Azevedo Ferreira Gomes¹, Cesar Ulisses Vieira Veríssimo², Alfran Sampaio Moura³,
Raphaelle Silva de Almeida⁴, Luiz Cleardo do Nascimento Penha⁵, Ana Kelly Coelho Oliveira⁶

Resumo – O Brasil tem realizado grandes investimentos em energia eólica, concentrados principalmente na Região Nordeste. Nesse contexto, o Ceará apresenta vantagens competitivas em relação a outros estados para projetos offshore, devido à baixa profundidade marinha e à infraestrutura portuária. Na plataforma marinha rasa cearense, predominam sedimentos e granulados marinhos carbonáticos, construções carbonáticas inorgânicas (beachrocks) e recifais, além de calcários e rochas siliciclásticas associadas às bacias sedimentares da Margem Equatorial Brasileira, representadas pela Bacia Potiguar e Bacia do Ceará. Os ensaios físico-mecânicos realizados nesta pesquisa englobaram unicamente beachrocks e rochas recifais. O objetivo foi analisar suas propriedades físicas e resistência mecânica em testes de compressão uniaxial. Os resultados demonstraram diferenças significativas entre os substratos estudados, considerando parâmetros como densidade aparente, porosidade, absorção de água, propagação de ondas ultrassônicas (US) e resistência à compressão uniaxial (UCS). Como esses materiais são considerados análogos às rochas onshore de substratos presentes na plataforma marinha, as informações obtidas podem ser aplicadas no planejamento e dimensionamento de fundações para futuros projetos de energia eólica offshore.

Abstract – Brazil has made substantial investments in wind energy, primarily concentrated in the Northeast region. In this context, Ceará stands out with competitive advantages over other states for offshore projects, owing to its shallow marine depths and port infrastructure. The shallow marine platform of Ceará is predominantly composed of carbonatic marine sediments and granular deposits, inorganic carbonate constructions (beachrocks), and reefal formations. Additionally, it comprises limestones and siliciclastic rocks associated with the sedimentary basins of the Brazilian Equatorial Margin, represented by the Potiguar and Ceará Basins. The physical-mechanical tests carried out in this research included only beachrocks and reef rocks. The objective was to assess their physical properties and mechanical strength under uniaxial compression tests. The results revealed significant differences among the studied substrates, considering parameters such as apparent density, porosity, water absorption, ultrasonic wave propagation velocity (US), and uniaxial compression strength (UCS). As these materials are considered analogues to onshore rocks of substrates found on the marine platform, the generated data can contribute to the planning and design of foundations for future offshore wind energy projects.

Palavras-Chave – Índices Físicos; Maciço Rochosos; Eólicas Offshore.

¹ Geól., Bolsista Petrobrás, Pós-Grad., Univ. Federal do Ceará (UFC), Tel, (85) 98543-9234, robertoazevedofg@gmail.com

² Geól., Dr, DEGEO, Univ. Federal do Ceará (UFC), Tel, (85) 98888-0071, verissimo@ufc.br

³ Geól., Dr, DEHA, Univ. Federal do Ceará (UFC), Tel, (85) 99973-5386, alfransampaio@ufc.br

⁴ Geól., MSc, Universidade de Fortaleza (UNIFOR), Tel, (85) 98871-1987, raphaelle@unifor.br

⁵ Bolsista PIBIC-IC, Graduação, Univ. Federal do Ceará (UFC), Tel, (85) 98401-5922, cleardo17@gmail.com

⁶ Bolsista PIBIC-IC, Graduação, Univ. Federal do Ceará (UFC), Tel, (85) 99866-2047, oliveirakelly33@alu.ufc.br

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores investidores em energia eólica no mundo, com mais de 1.160 parques instalados, sendo 85% concentrados na Região Nordeste, favorecida por condições ideais de vento (Business Wire, 2025). Neste contexto, o Ceará possui vantagens geotécnicas e logísticas que favorecem a instalação de turbinas offshore, com destaque para a plataforma marinha rasa e a infraestrutura do Complexo do Pecém

Em geral, os estudos existentes sobre fundações eólicas na literatura nacional concentram-se em turbinas terrestres, evidenciando a necessidade de estudos específicos que considerem as características dos solos e rochas da plataforma continental. Estudos petrofísicos realizados neste trabalho analisam rochas carbonáticas e siliciclásticas (beachrocks, arenitos e calcários) voltados à fundações eólicas offshore, uma vez que o tipo de fundação monoestaca, predominantes em águas rasas na Europa, podem não ser apropriada para substratos locais devido ao baixo atrito lateral em areias carbonáticas e a presença de rochas rígidas. Cabe destacar que alguns litotipos apresentaram resistência mecânica classificada como rochas brandas ($UCS < 12 \text{ MPa}$), o que representa um desafio técnico para a engenharia de fundações offshore, exigindo abordagens geotécnicas específicas, como soluções de reforço ou adaptação de tipologia de fundação.

Mapas geológicos indicam que as áreas de interesse nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte compreendem litologias cenozoicas e mesozoicas das Bacias do Ceará e Potiguar, cobertas localmente por sedimentos terciário-quaternários do Grupo Barreiras e beachrocks. (Pinéo et al. 2020). Entre os principais análogos onshore estão as Formações Jandaíra e Açu (Grupo Apodi), beachrocks e coquinas bioclásticas do litoral cearense, devido à ausência de afloramentos da Bacia do Ceará na porção continental.

Além das rochas mais antigas predominantemente carbonáticas e siliciclásticas que ocorrem nas bacias da margem equatorial brasileira (Figura 1), a plataforma marinha nordeste, é caracterizada por rochas e fácies sedimentares diversas, incluindo sedimentos bioclásticos, litoclásticos e fosforitas (Freire et al., 1997; Almeida et al., 2021).



Figura 1. Localização da plataforma marinha rasa cearense no contexto das bacias de margem equatorial brasileira (adaptado de ANP 2025).

A plataforma marinha nordeste brasileira é caracterizada por ativa produção carbonática, favorecendo o desenvolvimento de algas carbonáticas coralinas, também conhecidas como algas vermelhas as quais ocorrem em formas ramificadas ou livres (rodólitos, nódulos e seus fragmentos) e as algas calcárias verdes (*Halimeda*) (Coutinho & Moraes, 1970; Dias 2000; Santos et al. 2009). Nesta região, os sedimentos litoclásticos ou granulados marinhos terrígenos são representados por areias e cascalhos, originados pelo intemperismo e erosão de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares que chegam até o litoral, transportados através dos rios, sendo posteriormente retrabalhados por ondas e correntes marinhas. A maior parte dos depósitos litoclásticos são sedimentos reliquiais, depositados na plataforma marinha por processos continentais associados a canais fluviais e geleiras, durante eventos pretéritos de rebaixamento do nível do mar que ocorreram durante períodos glaciais (Silva et al. 2000).

Para os estados de Ceará e Rio Grande do Norte, Freire et al. (1997) e Freire & Cavalcante (1998) propõem uma classificação que leva em consideração o caráter misto dos sedimentos; representado por uma combinação de componentes bioclásticos, litoclásticos, minerais pesados e fosforitas. De acordo com referida classificação, a Plataforma Continental do Ceará (PPCE) possui oito fácies: areia bioclástica, areia litoclástica, areia biolitoclástica, cascalho bioclástico, lama terrígena, areia litobioclástica, cascalho biolitoclástico e lama calcária. A Figura 2 ilustra a distribuição das diferentes fácies na PCCE (Almeida et al. 2021). Referida figura foi utilizada para localizar os pontos de coleta onshore, uma vez que ilustra os locais em que a sedimentação rica em carbonatos na margem equatorial avança em direção a linha de costa. Nas praias de Moitas e Icapuí, onde os sedimentos bioclásticos, afloram na interface continente/mar, foram coletadas amostras de bancos recifais, objetivando a realização de ensaios laboratoriais (Figura 3A).

Figura 2. Mapa de fácies sedimentares da plataforma marinha. A seta vermelha indica os locais aproximados de coleta nas praias de Moitas (Amontada), na capital Fortaleza; e, em Icapuí, CE (adaptado de Almeida et al. 2021).

Figura 3. Construções carbonáticas orgânicas (recifes) que ocorrem junto a fácies bioclástica na praia de Moitas – oeste do Ceará (A); e de beachrocks (sabiaguaba, Fortaleza, CE (B).

Norte (Santos et al. 2007; Gomes & Vidal 2010; Cabral Neto et al. 2013), no estado de Pernambuco (Paes et al. 2016) e no Ceará (Almeida et al. 2021). Conforme trabalho desenvolvido por Mauz et al. (2015), a cimentação das rochas de praia é diferenciada em quatro categorias principais, relacionadas a fatores como precipitação de carbonatos e atividade microbiológica, sendo mais comum em climas tropicais devido às altas temperaturas e índices de evaporação da água do mar (Friedman & Sanders, 1978; Friedman et al., 1992).

As rochas de praia (beachrocks) são amplamente reconhecidas como indicadores geológicos das variações do nível relativo do mar, conforme apontado por diversos pesquisadores (Hopley, 1986; Castro et al. 2014). No caso dos beachrocks localizados mar adentro, distantes do litoral do Rio Grande do Norte, Cabral Neto et al. (2013) sugerem que essas formações representam uma antiga linha de costa atualmente a aproximadamente 25 km do litoral.

A grande espessura observada nos recifes de plataforma externa, que pode atingir até 25 m, contrasta com a média inferior a 5 m para beachrocks costeiros. Esse dado indica que grandes flutuações do nível do mar ocorreram durante a formação dessas rochas (Voutsdoukas et al., 2007). As microfácies dos beachrocks refletem a composição sedimentar dessa antiga linha de costa, predominantemente siliciclástica e bioclástica. Estudos recentes de sedimentos plataformais destacam a contribuição dos siliciclastos, derivados da composição sedimentar, para a formação dessas rochas (Vital et al., 2005).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando os locais já conhecidos do litoral cearense onde ocorrem beachrocks e bancos recifais, a partir da consulta ao mapa de litofácies publicado por Almeida et al. (2021) foram selecionados um local de coleta no litoral oeste (praia de moitas), outro no litoral leste (praia de Icapuí) e três outros na Região Metropolitana de Fortaleza incluindo as praias do Pacheco, Sabiaguaba e Porto das Dunas (Figura 2). Nestes locais, foram descritas macroscopicamente os afloramentos e coletadas amostras para estudos e ensaios de laboratório.

As amostras de partida corresponderam a blocos de rochas com dimensões aproximadas de 50 x 50 x 50 cm extraídas com alavancas ou ponteiras; ou, testemunhos cilíndricos coletados utilizando perfuradora extratora e brocas diamantadas da marca MERAX.

Os corpos de prova foram submetidos a diversos ensaios incluindo: análises petrográficas e petrofísicas, determinação de índices físicos (densidade, porosidade, absorção de água), ensaios de compressão uniaxial e ensaios elastodinâmicos. As análises petrográficas e petrofísicas foram realizadas no Laboratório de Microscopia (LME) do Departamento de Geologia em Microscópio Petrográfico OLYMPUS BX41. Antes da preparação das seções, as amostras foram impregnadas com corante azul; e, posteriormente cortadas e montadas em lâminas delgadas para as análises de descrição textural e composicional dos grãos, da matriz/cimento e da porosidade.

Os ensaios de caracterização tecnológica, foram realizados em parte do Laboratório de Geotécnica e Prospecção (LAGETEC) e outra no Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará - NUTEC através de projeto de cooperação. foram utilizados corpos de prova cúbicos e cilíndricos, obedecendo respectivamente, as normativas NBR 15845-2/2015 e NBR 15845-5/2015 ou ABNT NBR 7680-1:2015. Entre os ensaios realizados estão: os índices físicos (determinação da densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água) e; a resistência à compressão uniaxial. Seguindo as normas NBR 15845-2/2015 e NBR 15845-5/2015 foram utilizados dez corpos de prova de 5x5x5cm para os índices físicos e outros dez cubos de 7cm de aresta, para compressão uniaxial em condições secas e saturadas. A resistência de rochas utilizada no artigo obedeceu a classificação da ISRM (2007), separadas em: muito brandas (<5 MPa), brandas (5–25 MPa), médias (25–50 MPa) e resistentes (>50 MPa).

Para os ensaios elastodinâmicos foi empregado o aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Test), pertencente ao Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do NUTEC, equipado com transdutor de 54 KHz, duas possibilidades de medidas, de 0,1 a 999,9 μ s em unidades de 1 μ s, provido de alimentação através de corrente elétrica ou bateria interna. As leituras foram feitas a partir da transmissão direta de ondas ultrassônicas longitudinais a partir de um transdutor conforme apresentado pela NBR 8800/1994.

3. RESULTADOS

3.1 Análises Petrográficas

Os resultados obtidos a partir das análises petrográficas das amostras de beachrocks provenientes das praias da Barra do Ceará, Sabiaguaba, Porto da Dunas e Moitas, mostram grande variedade de componentes detríticos, aloquímicos e orgânicos em proporções variadas, cimentados por calcita microcristalina a cristalina (micrito e microesparita). Foram identificados grãos de quartzo, feldspato, fragmentos de rocha, micas, anfibólios, fragmentos de esqueletos de organismos calcários (bioclastos) e grãos sem esqueletos (Figura 4).

Existem variações no tamanho e frequência dos poros em intervalos inferiores ao metro nos estratos. Embora não tenham sido realizados estudos quantitativos de porosidade, as análises petrográficas mostram a existência de bandas conglomeráticas com grande quantidade de poros intergranulares, intercaladas com bandas de textura fina a média menos porosa.

Em termos de composição, foram identificados grãos de quartzo, feldspato, fragmentos de rocha, micas, fragmentos de esqueletos de organismos calcários (bioclastos) e grãos sem esqueletos. Entre as amostras, predominam os grãos detríticos a exceção de duas amostras da Barra do Ceará, onde a ocorrência de componentes bioclastos é maior. A proporção de grãos litoclastos, bioclastos e cimento podem ser observados na Figura 5.

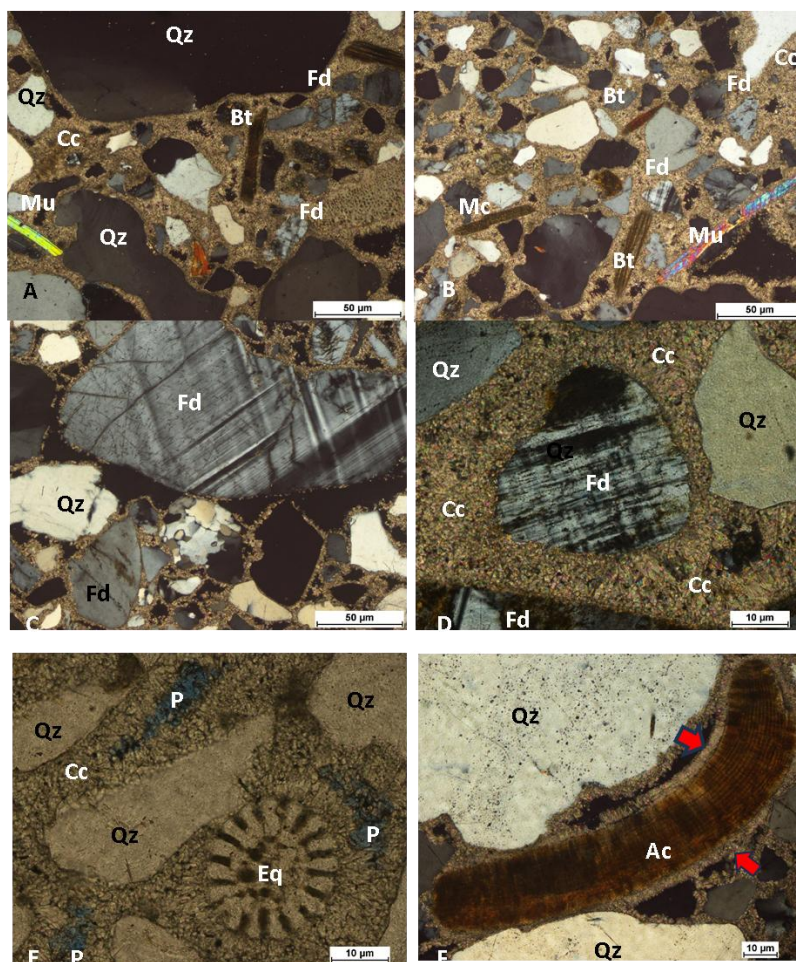


Figura 4. Seções delgadas dos beachrocks de Sabiaguaba. A e B. Obj 5X, luz polarizada. Grãos de quartzo (Qz), micas (muscovita (Mu) e biotita (Bt)) e feldspato (Fd) subarredondados e angulosos envolvidos por cimento de calcita microcristalina (Cc). C e D. Obj 5X e 10X, luz pol. Grãos de feldspato maclados subarredondados e grãos de quartzo angulosos cimentados por calcita microcristalina (Cc). E. Obj 10X, luz pol. Provável alga coralinácea (Ac) entre grãos de quartzo. Observar a franja de cristais prismáticos (setas vermelhas), regular e isópaca, com orientação sub-perpendicular dos cristais envolvendo os grãos de quartzo e o fóssil. F. Obj. 10X, luz pol. Provável fragmento de equinoide (Eq) entre grãos de quartzo, cimentados por calcita microcristalina.

Tabela 5. Porcentagem estimada da porosidade e dos componentes presentes nas amostras, a partir das análises petrográficas.

Litotipo	Amostra	Porosidade (%)	Bioclastos (%)	Litoclastos (%)	Cimento
Beachrock friável	48C	7	13	87	Microesparita
Beachrock friável	BC-B1	19	62	38	Micrita
Beachrock friável	BC-B2	14	57	43	Micrita
Beachrock maciço	BC-T	14	8	92	Microesparita
Beachrock maciço	PC-01	10	8	92	Micrita
Beachrock maciço	COF-01	6	6	94	Microesparita
Beachrock maciço	COF-02	4	10	92	Microesparita
Beachrock maciço	COF-03	5	9	94	Microesparita

As observações macroscópicas mostram a diferença de porosidade secundária existente entre as amostras de beachrocks, predominando maior porosidade em estratos de textura granular, areno-conglomerática (Figura 6).

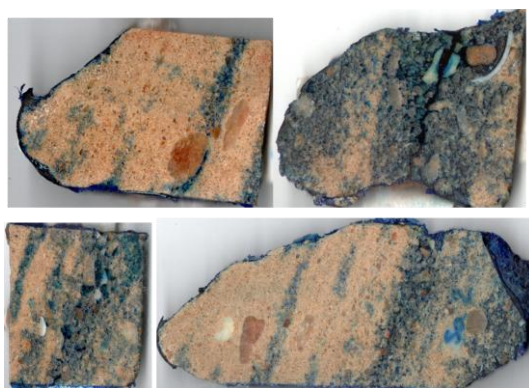


Figura 6. Beachrocks da praia de Sabaguaba, impregnadas (corante azul) para estudos petrográficos. Observar relação entre textura areno-conglomerática e aumento de porosidade.

Quantidade maior de poros foi observada nas amostras de recifes e rodolitos associadas a facies bioclástica. Neste caso, tanto a porosidade primária como a secundária é bem desenvolvida com vazios no interior das redes de células, na porção ventral do tallus e nas zonas adjacentes as linhas de crescimento dos filmes carbonáticos (Figura 7).

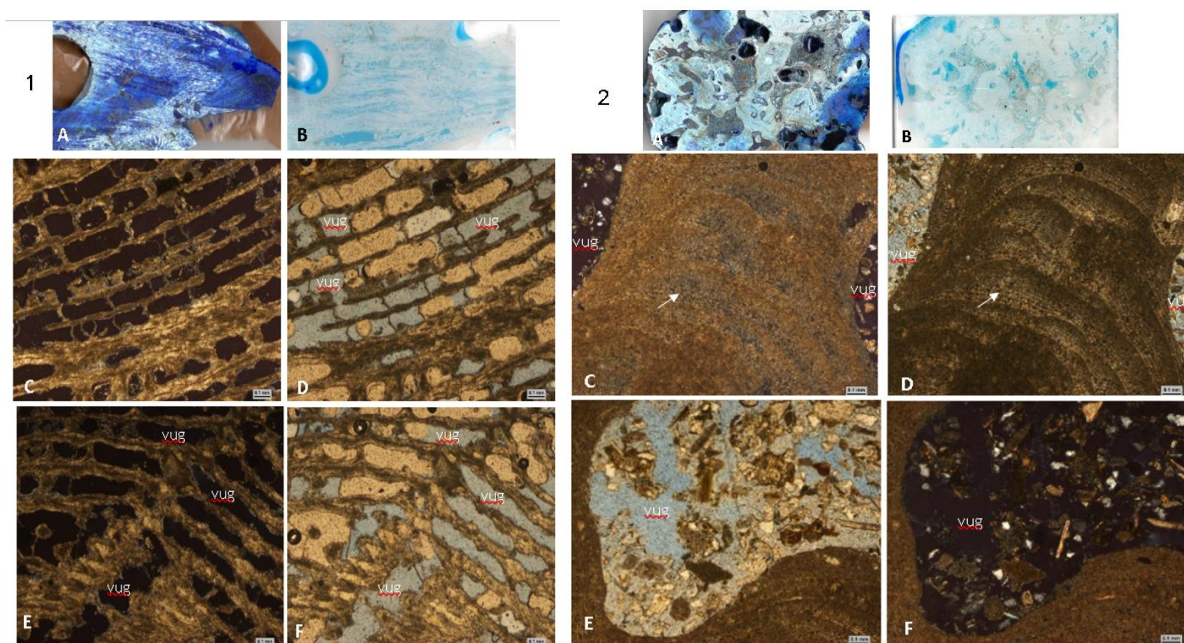


Figura 7. 1. A e B: Fragmento recifal e respectiva seção delgada impregnada (corante azul) para análise petrográfica; C, D, E e F: seção transversal a região ventral do tallus ilustrando rede de células e porosidade (vug) associada. 2. A e B: Amostra de rodolito e respectiva seção delgada

impregnada com corante azul para análise petrográfica. C e D: detalhe das linhas de crescimento submilimétricas (seta branca) do rodolito entre duas cavidades (vug) preenchidas por grãos detríticos, bioclastos e algas. E e F: vazios preenchidos por pequenos grãos de quartzo, outros grãos detríticos, bioclastos e algas.

3.2. Densidade Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água

A Figura 8 ilustra os ensaios para a determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água realizados nos corpos de prova cúbicos de 5X5X5 dos beachrocks e recifes, obtidos a partir da equação:

$$\delta a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1$$

$$\alpha a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sec})} \times 100 \quad \eta a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100$$

Cujos parâmetros δa , αa e ηa correspondem, respectivamente, a densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Enquanto os parâmetros M_{sec} , M_{sat} e M_{sub} : a massas seca, saturada e submersa.



Figura 8. Ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água (índices físicos) em amostras de beachrocks e construções carbonáticas biogênicas (recifes).

Os resultados obtidos encontram-se na Figura 9 e mostram valores mais baixos de densidade para a amostra de recife/corais de origem biogênica (1491,71 kg/m²), seguida da amostra de beachrock contendo grãos siliciclásticos e bioclastos que apresenta maior friabilidade (1858,52 kg/m²); e, por último para a amostra de beachrock maciço da foz do rio Pacoti (2312,27kg/m²).

Os parâmetros absorção e porosidade mostram correlação inversa para as amostras de beachrock, com menores valores para amostra maciça (2,95% e 6,886%) em relação a amostra friável (12,6786% e 23,518%). Por outro lado, as amostras de origem biogênica (recife) apresentaram os valores mais variados de absorção e porosidade (11,288% e 16,82%).

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE, POROSIDADE E ABSORÇÃO D'ÁGUA EM ROCHAS PARA REVESTIMENTO							
Beachrock Maciço	EXEMPLAR	PESO SECO (g)	PESO SATURADO (g)	PESO SUBMERSO (g)	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	POROSIDADE (%)	ABSORÇÃO (%)
	1	298,75	303,01	184,62	2523,44	3,60	1,43
	2	311,34	313,75	182,52	2372,48	1,84	0,77
	3	295,06	300,84	181,39	2470,15	4,84	1,96
	4	255,59	270,32	156,87	2252,89	12,98	5,76
	5	280,71	294,27	172,87	2312,27	11,17	4,83
	Média				2386,25	6,89	2,95
Beachrock Friável	Desvio Padrão				111,03	4,90	2,21
	Coef. De Variação				4,65	0,71	0,75
	EXEMPLAR	PESO SECO (g)	PESO SATURADO (g)	PESO SUBMERSO (g)	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	POROSIDADE (%)	ABSORÇÃO (%)
	1	229,70	254,31	136,25	1945,62	20,85	10,71
	2	234,60	264,54	136,99	1839,28	23,47	12,76
	3	224,22	254,34	131,95	1832,01	24,61	13,43
	4	207,74	236,38	123,10	1833,86	25,28	13,79
	5	222,20	250,41	129,77	1841,84	23,38	12,70
Recifes	Média				1858,52	23,52	12,68
	Desvio Padrão				48,85	1,69	1,19
	Coef. De Variação				2,63	0,07	0,09
	EXEMPLAR	PESO SECO (g)	PESO SATURADO (g)	PESO SUBMERSO (g)	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	POROSIDADE (%)	ABSORÇÃO (%)
	1	194,91	222,29	90,73	1481,53	20,81	14,05
	2	190,07	207,46	81,39	1507,65	13,79	9,15
	3	190,58	213,92	85,30	1481,73	18,15	12,25
	4	185,90	203,47	79,34	1497,62	14,15	9,45
	5	169,40	188,95	75,26	1490,02	17,20	11,54
	Média				1491,71	16,82	11,29
	Desvio Padrão				11,13	2,92	2,03
	Coef. De Variação				0,75	0,17	0,18

Figura 9. Resultado dos ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água (índices físicos) em amostras de beachrocks e construções carbonáticas biogênicas (recifes).

3.3. ENSAIOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

Os ensaios com ondas ultrassônicas foram realizados em equipamento marca PUNDIT Proceq 200 pertencente ao NUTEC. Os resultados mostram relação entre velocidade de propagação de ondas V_p , densidade e porosidade nas amostras estudadas (Figura 10). As ondas longitudinais propagam mais rapidamente em amostras mais compactas e densas e com menores valores de porosidade e absorção, o que sugere, no caso dos beachrocks que a cimentação carbonática promove o fechamento dos poros. Com relação a amostra de recife (biogênica) a velocidade de propagação mostrou valores intermediários entre os beachrocks friáveis e maciços.

Beachrock friável (m/s)

1° Bloco - 2582 / 2671 / 2631
2° Bloco - 2436 / 2405 / 2662
3° Bloco - 2856 / 3690 / 3006
4° Bloco - 1699 / 1711 / 2341
5° Bloco - 2965 / 2916 / 2325
Média - 2631

Beachrock maciço (m/s)

1° Bloco - 5735 / 5597 / 5688
2° Bloco - 5642 / 5688 / 5735
3° Bloco - 5642 / 5735 / 5830
4° Bloco - 5782 / 5688 / 5735
5° Bloco - 5688 / 5642 / 5597
Média - 5688

Corais Moitas (m/s)

1° Bloco - 3358 / 3845 / 3364
2° Bloco - 3233 / 4293 / 3683
3° Bloco - 2976 / 4119 / 3225
4° Bloco - 3702 / 3887 / 4215
5° Bloco - 3414 / 4215 / 3332
Média - 3683

Litotipo	Vp médio (m/s)	Desvio padrão	Coef. de variação
Beachrocks frágeis	2631	± 828	0,31
Beachrocks maciços	5688	± 87	0,015
Recifes (biogênicos)	3683	± 595	0,16

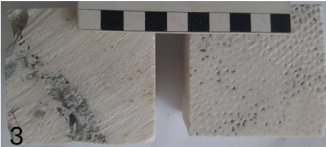
Figura 10. Valores de propagação de ondas longitudinais (V_p) em três direções, nas amostras cúbicas de recifes, beachrocks friáveis e maciços, com respectivos dados estatísticos

3.4. Ensaios de Resistência a Compressão Uniaxial

Ensaios de resistência e compressão uniaxial foram realizados em Máquina Universal marca EMIC do Lab. de Materiais de Construção Civil (LMCC) com capacidade de 300 kw.

Os resultados dos ensaios de resistência são apresentados na Figura 11 e permitem fazer correlações entre índices físicos, propagação de ondas e resistência, com as amostras mais friáveis e de maior porosidade apresentando menor resistência a compressão uniaxial (1,96 a 4,73 Mpa) comparativamente a amostra com menor porosidade e absorção e maior densidade e cimentação carbonática, a qual apresentou valores maiores de resistência (31,84 a 68,29 Mpa).

A amostra de recife da praia de Moitas mostrou valores entre: 3,45 e 15,65Mpa, com grande coeficiente de variação e desvio padrão, apresentando valores baixos situados na mesma faixa dos beachrocks friáveis; e, outros valores intermediários, entre friáveis e os maciços (Figura 11).

	Beachrock Friável	Amostra	Resistência à Compressão Uniaxial (Mpa)
		1A	4,735
		2A	2,959
		3A	2,020
		4A	1,959
	Beachrock Maciço	5A	4,082
		Média	3,151
		1B	31,837
		2B	68,286
		3B	63,204
	Calcario Biogênico	4B	45,367
		5B	49,551
		Média	51,649
		1C	12,408
		2C	15,653
		3C	10,735
		4C	3,451
		5C	7,612
		Média	9,972

Litotipo	UCS médio (MPa)	Desvio padrão	Classificação ISRM ¹
Beachrocks friáveis	3,15	± 1,05	Muito branda a branda
Beachrocks maciços	51,65	± 13,17	Média resistência
Recifes (biogênicos)	9,97	± 4,93	Branda

Figura 11. Amostras de beachrocks friáveis (1), beachrocks maciços (2) e de Recifes (3), com respectivos valores de resistência a compressão uniaxial, dados estatísticos e classificação.

4. CONCLUSÕES

Um aspecto interessante observado para todos os beachrocks analisados, é o baixo grau de maturidade, com a preservação de determinados grãos detríticos, especialmente feldspatos e micas, assim como de restos orgânicos (fósseis de algas) e bioclastos. Este fato sugere a rápida cimentação carbonática, preenchendo os poros existentes, revestindo os grãos, e os protegendo da alteração intempérica. As seções delgadas revelaram grãos de quartzo, feldspato, micas, bioclastos, litoclastos e algas calcárias. Os beachrocks friáveis mostraram maior porosidade intergranular que os maciços. Os recifes apresentaram alta porosidade interna associada à estrutura celular.

A análise comparativa entre os índices físicos e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas mostra que as ondas longitudinais propagam mais rapidamente em amostras mais compactas e densas e com menores valores de porosidade e absorção, o que sugere, no caso dos beachrocks que a cimentação carbonática promove o fechamento dos poros.

Os beachrocks maciços demonstraram elevada resistência, adequada para projetos de fundação, similar às rochas de média a alta resistência, enquanto os beachrocks friáveis e recifes apresentaram resistência limitada (UCS < 12 MPa), exigindo alternativas de fundação ou reforço geotécnico. Outro fato a ser destacado é que a cimentação carbonática representa um fator crítico na redução da porosidade e aumento da resistência, como observado nas análises de Vp e UCS.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto “Estudo do comportamento geotécnico do solo calcário e seção rasa carbonática da Costa Brasileira para Parques Eólicos Offshore” - “PD-00553-0069/2021”, uma parceria entre UFC e PETROBRAS, no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL.

5. REFERÊNCIAS

- 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.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/dados-georreferenciados-das-bacias-sedimentares-brasileiras> acesso em: 20 abril 2025.
- BUSINESS WIRE. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20250226375941/pt>. Acesso em 20 abril 2025.
- CABRAL NETO, I; CÓRDOBA, V.C.; VITAL, H. Morfologia, Microfaciologia e diagênese de beachrocks costa-afora adjacentes à costa norte do Rio Grande do Norte, Brasil. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 32, n.3, p.471-490, 2013
- CASTRO, J.W.A.; SUGUIO, K.; SEOANE, J.C.S.; CUNHA, A.M.; DIAS, F.F. 2014. Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 86(2): 671-683.
- COUTINHO, P.N.; MORAIS, J.O. 1970. Distribución de los Sedimentos em la Plataforma Continental Norte y Nordeste del Brasil. Arq. Cien. Mar., v.10(1): 79-90.
- DIAS, G.T.M. 2000. GRANULADOS Bioclásticos: algas calcárias. Rev. Bras.Geof. 18(3): 307-318.
- FRIEDMAN, G.M. & SANDERS, J.E. 1978. Principles of Sedimentology. NY, John Wiley, 792p.
- FREIRE, G. S. S.; CAVALCANTI, V. M. M.; MAIA, L. P.; LIMA, S. F. 1997. Classificação dos Sedimentos da Plataforma Continental do Estado do Ceará. In: Simp. Geol. Nordeste; Fortaleza. Anais... Fortaleza, p. 209-211.
- FREIRE, G. S. S. & CALVALCANTI, V. M. M., 1998. A Cobertura Sedimentar Quaternária da Plataforma Continental do Estado do Ceará. Fortaleza, 42.
- GOMES, M.P.; VITAL, H. 2010. Revisão da compartimentação geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. Revista Bras. Geociências. 40(3): 321-329.
- HOPLEY, D. 1986. Beach-rock as a Sea-level Indicator. In: VAN de PLASSCHE, O. (Ed.), Sea-Level Research: A Manual for the Collection and Evaluation of Data. Norwich: Geo-Books.
- ISRM. 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.). Ankara: Turkish National Group of ISRM.
- MAUZ, B.; VACCHI, M.; GREEN, A.; HOFFMANN, G. & COOPER, A. 2015. Beachrock: a Tool for Reconstructing Relative Sea Level in the Far-field. Marine Geology, 362: 1-16.
- PINÉO, T.R.G.; PALHETA, E.S.M.; COSTA, F.G.; VASCONCELOS, A.M.; GOMES, I.P.; GOMES, F.E.M.; BESSA, M.D.M.R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J.L.R.; FREIRE, D. P. C. Mapa Geológico do Estado do Ceará. Escala 1:500.000. Fortaleza: CPRM. 2020. Mapa
- SANTOS, C.L.A.; VITAL, H.; AMARO, V.E.; KIKUCHI, R.K.P. 2007. Mapeamento de recifes submersos na costa do RN, NE Brasil: Macau a Maracanaú. Rev. Bras.Geof. 25(1): 27-36.
- SANTOS, J.R.; AMARAL, R.F.; ARAÚJO FILHO, L.P. 2009. Sedimentology characterization of continental shelf east of Rio Grande do Norte, Brazil. In 9th International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management CoastGIS'09. Itajaí, SC.
- SILVA, C.G.; FIGUEIREDO JR., A.G.; BREHME, I. 2000. Granulados litoclásticos. Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 18(3): 319-326.
- VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E. 2005. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira - área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n.3, p. 233-241.
- VOUSDOKAS, M. I.; VELEGRAKIS, A. F.; PLOMARITIS, T. A., 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. Earth-Science Reviews, v. 85, n. 1- 2, p. 23.