

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE AFLORAMENTOS DE BEACHROCKS NA COSTA CEARENSE

Konstantinos Polemis Júnior
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, konstantinos@alu.ufc.br

Cesar Ulisses Vieira Veríssimo
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, verissimo@ufc.br

Alfran Sampaio Moura
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, alfransampaio@ufc.br

Samuel Porfírio Pinheiros Barros
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, samuelbarros21@gmail.com

Mateus Calvalcante Gomes
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, mateuscg15@alu.ufc.br

RESUMO: Este trabalho é um estudo preliminar que faz parte de um projeto desenvolvido entre a PETROBRAS e a Universidade Federal do Ceará (UFC), que busca compreender o comportamento geotécnico dos solos arenosos no litoral nordestino, visando sua aplicação em fundações offshore de torres eólicas. *Beachrocks* são rochas sedimentares variando de friáveis a bem cimentadas, constituídas por sedimentos de tamanho cascalho, areia e silte, cimentados por minerais carbonáticos e formados ao longo de zonas costeiras. Na costa do Ceará, particularmente na Plataforma Continental, o estudo desses beachrocks é de especial interesse para projetos de energia eólica offshore. Este trabalho investiga a caracterização mineralógica dos beachrocks na região, ressaltando a importância de suas propriedades geológicas para a engenharia de fundações. Amostras indeformadas foram coletadas das praias do Pacheco, Barra do Ceará, Sabiaguaba e Porto das Dunas, no Ceará, para análises petrográficas. Observou-se uma variedade de grãos detríticos, como quartzo, feldspato, micas, fragmentos de rocha, além de bioclastos e resíduos de algas, cimentados por calcita microcristalina. A porosidade variou de 4% a 19%, com tipos como intergranular, intrapartícula, shelter, vug e brecha. A maturidade relativamente baixa dos beachrocks sugere cimentação acelerada, preservando os componentes detríticos e a textura original dos sedimentos. A heterogeneidade influencia diretamente as propriedades geotécnicas dos materiais. Amostras da Barra do Ceará mostraram predomínio de bioclastos, enquanto na Praia do Pacheco, a composição era mais diversa, com menor teor de carbonato e matriz argilosa sericítica. Os resultados destacam a complexidade mineralógica e textural dos beachrocks no litoral cearense e a necessidade de avaliações detalhadas para sua utilização em fundações de energia eólica offshore. Este estudo fornece dados essenciais sobre porosidade e composição mineral dos beachrocks, análogos aos materiais de fundação de aerogeradores offshore, orientando ensaios mecânicos específicos necessários para avaliar a resistência e deformabilidade desses materiais.

PALAVRAS-CHAVE: *Beachrocks*, propriedades geotécnicas, porosidade, análises petrográficas, energia eólica offshore.

ABSTRACT: This study is a preliminary study that is part of a project developed between PETROBRAS and the Federal University of Ceará (UFC), aiming to understand the geotechnical behavior of sandy soils in the northeastern coast, for their application in offshore wind turbine foundations. Beachrocks are sedimentary rocks ranging from friable to well-cemented, composed of gravel-sized sediments, sand, and silt, cemented by carbonate minerals and formed along coastal zones. On the coast of Ceará, particularly on the Continental Shelf, the study of these beachrocks is of special interest for offshore wind energy projects. This work investigates the mineralogical characterization of beachrocks in this region, emphasizing the importance of

their geological properties for foundation engineering. Undisturbed samples were collected from the beachrocks of Pacheco Beach, Barra do Ceará, Sabiaguaba, and Porto das Dunas, Ceará, for petrographic analyses. A variety of detrital grains, such as quartz, feldspar, micas, and rock fragments, as well as allochemical components like bioclasts and algal residues, were observed, predominantly cemented by microcrystalline calcite. Porosity ranged from 4% to 19%, with types such as intergranular, intraparticle, shelter, vug, and breccia. The relatively low maturity of the beachrocks suggests rapid cementation, preserving detrital components and the original texture of the sediments. This heterogeneity directly influences the geotechnical properties of the materials. Samples from Barra do Ceará showed a predominance of bioclasts, while those from Pacheco Beach had a more diverse composition, with lower carbonate content and a sericitic clay matrix. The results highlight the mineralogical and textural complexity of beachrocks on the Ceará coast and the need for detailed evaluations for their use in offshore wind energy foundations. This study provides essential data on the porosity and mineral composition of beachrocks, analogous to the materials found at offshore wind turbine foundation sites, guiding specific mechanical tests needed to assess the strength and deformability of these materials.

KEYWORDS: Beachrocks, geotechnical properties, porosity, petrographic analyses, offshore wind energy.

1 INTRODUÇÃO

A exploração da energia eólica offshore na costa do Ceará requer análises precisas das características geológicas submarinas, notavelmente a composição e distribuição dos *beachrocks* e areias carbonáticas. A pesquisa de França *et al.* (1976), destacando a variação na concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3) em sedimentos marinhos de profundidades entre 10 e 50 metros, revela a heterogeneidade do subsolo marinho. Com frações de CaCO_3 variando de 5% a mais de 95%, esses dados sublinham a presença significativa de areia carbonática ao longo da costa cearense. Além disso, informações fornecidas por Araújo (2018) indicam que regiões com até 40 metros de profundidade se estendem por 40 km mar adentro, apresentando potencial para desenvolvimento de energia eólica offshore.

Este contexto é enriquecido pelos estudos de Almeida *et al.* (2015, 2016), que identificam *beachrocks* antigos como indicadores de variações no nível do mar durante o Quaternário, estendendo-se do litoral de Pernambuco ao oeste do Ceará. Estas formações, situadas a até 60 metros de profundidade e distantes cerca de 50 km da costa atual, são consideradas registros de antigas linhas de costa, fornecendo *insights* valiosos sobre as condições geológicas históricas e atuais.

Dessa forma, o presente estudo se dedica à caracterização mineralógica dos *beachrocks* na costa cearense, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre essas formações geológicas. Ao investigar as características físicas desses *beachrocks* e sua relação com as areias carbonáticas, busca-se fornecer uma base de dados relevante para o planejamento e implementação de infraestrutura de energia eólica offshore, considerando as especificidades geotécnicas e geológicas desse tipo de material como elemento de fundação de aerogeradores dos parques eólicos marinhos.

Os *beachrocks* estudados são análogos relevantes para os materiais que serão encontrados em locais de fundação de aerogeradores offshore. A caracterização detalhada de suas propriedades mineralógicas e texturais fornecerá uma base importante para direcionar futuros ensaios mecânicos específicos, como ensaio coluna ressonante, ensaio triaxial com bender elements, ensaio de cisalhamento cíclico, ensaio triaxial cíclico e ensaio torsional cíclico. Esses dados preliminares são cruciais para uma compreensão inicial do comportamento dos substratos marinhos, especialmente devido à complexidade dos materiais carbonáticos e às exigências específicas das fundações offshore.

2 FORMATOS ESPECÍFICOS

2.1 Localização e Seleção das Áreas de Estudo

O foco deste estudo é a caracterização mineralógica de arenitos de praia (*beachrocks*) na Plataforma Continental do Ceará (PCCE), abrangendo as Bacias Potiguar e do Ceará. A PCCE destaca-se por seu padrão

sedimentológico diversificado, incluindo grãos siliciclásticos reliquiaes e uma mistura de carbonatos e siliciclásticos. Este cenário é complementado por feições geomorfológicas diversas, como mapeado por Maia de Almeida *et al.* (2021).

Para a coleta de amostras e realização do estudo, selecionaram-se especificamente as praias de Pacheco, Barra do Ceará, Sabiaguaba e Porto das Dunas, todas localizadas na região costeira do estado do Ceará, Brasil. Esta escolha foi motivada pela necessidade de investigar *beachrocks* em locais que exemplificassem a complexidade sedimentológica e geomorfológica da Plataforma Costeira do Ceará (PCCE), proporcionando uma base sólida para entender os processos de formação dos *beachrocks* e suas propriedades geotécnicas. A seleção intencional dessas praias permite um estudo abrangente dos *beachrocks*, refletindo a heterogeneidade da PCCE e garantindo uma análise detalhada de suas características mineralógicas.

2.1.1 Praia do Pacheco

Na Praia do Pacheco, localizada nas coordenadas 3°41'20.86"S e 38°37'25.13"O, foram coletadas amostras de arenitos que afloram predominantemente durante a maré baixa. Esta área é marcada por formações rochosas onde predominam seixos, grãos de quartzo, feldspatos caulinizados, e outros componentes detríticos, incluindo concreções ferruginosas, sem a presença visível de conchas ou bioclastos macroscópicos. Os arenitos da Praia do Pacheco apresentam feições de alveolização e cavidades (Figura 1, esquerda), sugerindo a ação de processos de dissolução química. As análises químicas revelaram baixos valores de carbonato, indicando que estes sedimentos são parte da base da Formação Barreiras, distanciando-se dos *beachrocks* quaternários comuns. A limitada ocorrência de bioclastos e a presença de nódulos ferruginosos corroboram essa classificação. As amostras foram obtidas manualmente (Figura 2, direita), com o uso de marreta, formão e alavanca, direcionadas para análise petrográfica detalhada.



Figura 1. Arenitos da Praia do Pacheco: a. Alveolização e cavidades por dissolução; b. Método de coleta das amostras.

2.1.2 Praia da Barra do Ceará

Na Barra do Ceará, localizada nas coordenadas 3°46'41.51"S e 38°25'48.27"O, observam-se extensos bancos descontínuos de arenitos de praia (Figura 2a), caracterizados por altos teores de carbonato e uma abundância de bioclastos. Estes arenitos apresentam uma notável estratificação, incluindo padrões plano-paralelos e cruzados de grandes dimensões. Além disso, os estratos mostram uma ampla variação textural, desde frações de areia fina a média, intercaladas com camadas conglomeráticas e bioclásticas, evidenciando a complexa dinâmica sedimentar da área. Para a coleta de amostras nesta região, utilizaram-se testemunhos cilíndricos obtidos por meio de uma máquina extratora equipada com uma serra copo de 4 mm de diâmetro (Figura 2b).



Figura 2. Arenitos de praia na Barra do Ceará: a. Bancos descontínuos com bioclastos e estratificação; b. Coleta de testemunhos cilíndricos.

2.1.3 Praia de Sabiaguaba

Localizada nas coordenadas $3^{\circ}41'37.92''S$ e $38^{\circ}35'40.85''O$, a Praia de Sabiaguaba destaca-se pela presença de *beachrocks* ao longo da margem direita da foz do rio Ceará. Estas formações apresentam bancos de grande continuidade, caracterizados por elevados teores de carbonato e uma rica concentração de bioclastos. Os arenitos identificados nesta região exibem uma marcante estratificação plano-paralela, conforme demonstrado na Figura 3. Além da notável estratificação, os arenitos de Sabiaguaba apresentam uma ampla gama de variações texturais. Os estratos siliciclásticos predominam, abrangendo desde frações de areia fina a média, e são intercalados com camadas conglomeráticas e bioclásticas, refletindo a dinâmica sedimentar diversificada da área.

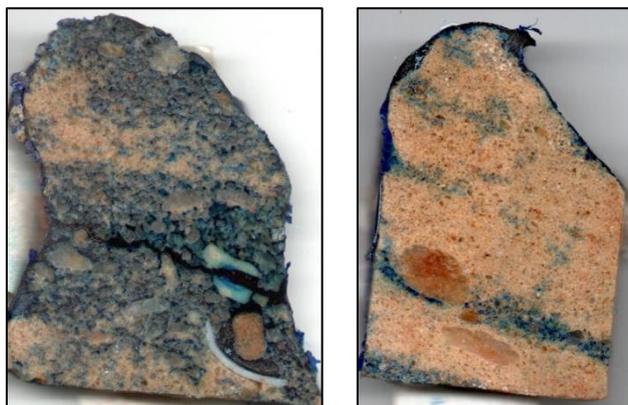


Figura 3. Amostras dos arenitos de praia na Sabiaguaba com sua estratificação e porosidade evidenciadas por impregnação com corante azul.

2.1.4 Porto das Dunas

No Porto das Dunas, localizado nas coordenadas $3^{\circ}49'22.55''S$ e $38^{\circ}24'6.77''O$, as amostras foram coletadas principalmente na margem esquerda do rio Pacoti, onde os *beachrocks* afloram sob uma camada de sedimentos arenosos. Os bancos de arenito exibem um padrão ortogonal de fraturamento com fraturas orientadas NE-SW e NW-SE, evidenciando a complexidade estrutural da área. As formações rochosas, constituídas de camadas maciças e estratos estratificados, foram documentadas e as amostras retiradas com marreta e alavanca, conforme ilustrado na Figura 4. A análise revelou uma predominância de litoclastos, incluindo seixos e grãos de quartzo. Menos frequentes, os bioclastos são observados em camadas conglomeráticas e porosas, destacando a heterogeneidade sedimentar e a influência biológica na composição dos *beachrocks* do Porto das Dunas.



Figura 4. *Beachrocks* no Porto das Dunas: Estruturação e Composição Litoclástica e Bioclástica.

2.2 Análise Petrográfica

As amostras de *beachrocks* coletadas nas praias de Pacheco, Barra do Ceará, Sabiaguaba e Porto das Dunas foram submetidas a análises petrográficas após impregnação com corante azul de metileno para destacar a porosidade. Posteriormente, foram seccionadas e montadas em lâminas delgadas, preparadas para exame detalhado das características texturais e composicionais dos grãos, bem como da matriz/cimento e porosidade. Essas análises foram realizadas nos Laboratórios de Geotecnia e Prospecção (LAGETEC) e de Microscopia (LME) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Foram empregues a Lupa Binocular Eletrônica Nikon 5218 e o Microscópio Petrográfico Binocular OLYMPUS BX41, equipados com objetivas de ampliações variadas (4X, 10X, 40X, 100X) e oculares de 10X. O equipamento inclui também uma platina móvel e acessórios essenciais para a petrografia, como lâminas de mica e quartzo, polarizadores, analisadores e a lente de Amice Bertrand, possibilitando uma análise profunda das amostras para investigar a textura, composição e porosidade dos arenitos, evidenciando as variações entre os diferentes locais estudados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Petrográfica dos *Beachrocks*

As análises petrográficas revelaram uma diversidade de componentes nos arenitos de praia das localidades estudadas, identificando grãos detríticos, aloquímicos e orgânicos preservados. Quartzo, feldspato, fragmentos de quartzito, micas, bioclastos e algas coralináceas, cimentados predominantemente por calcita espática e microcristalina, constituem a mineralogia básica dessas rochas. A natureza do cimento, sendo o componente autigênico principal das rochas carbonáticas, demonstra a importância dos processos diagenéticos, com a precipitação química de calcita a partir de fluidos intersticiais, conferindo coesão ao material sedimentar. As dimensões dos cristais de cimento variam significativamente, refletindo condições ambientais e diagenéticas distintas.

3.1.1 Praia do Pacheco

A caracterização petrográfica dos afloramentos na Praia do Pacheco indica uma composição mineralógica dominada por quartzo, plagioclásio, K-feldspato, microclínio, anfibólio e fragmentos de rocha, com presença ocasional de bioclastos. Os grãos, predominantemente subangulares e de baixa esfericidade, junto a uma seleção granulométrica pobre, sugerem um ambiente deposicional de transporte limitado. A matriz argilosa sericítica e o cimento ferruginoso diferenciam estes sedimentos dos *beachrocks* quaternários, apontando para uma origem mais antiga, possivelmente do Grupo Barreiras. A porosidade, identificada em 6% e principalmente do tipo brecha, indica uma baixa concentração de espaços vazios e um estágio inicial de compactação. As condições deposicionais de baixa energia e rápida cimentação na Praia do Pacheco limitaram a preservação de características originais e bioclastos. A predominância de litoclastos (95%) sobre bioclastos (5%) sugere uma fonte detrítica significativa. A Figura 5 ilustra a diversidade granulométrica, textura sedimentar e variações diagenéticas como o cimento ferruginoso e, localmente, micrítico, que influenciam na porosidade e estrutura das rochas..

3.1.2 Praia da Barra do Ceará

Os beachrocks na Barra do Ceará, com uma porosidade de 19%, refletem um ambiente deposicional dinâmico e rico. Eles contêm uma diversidade de quartzo, feldspatos, anfibólio e fragmentos rochosos intercalados com bioclastos significativos. A textura dos grãos, variando de subangulares a subarredondados, e a ausência de uma matriz coesa sugerem rápida acumulação e mínima seleção. O cimento micrítico predominante e a porosidade intrapartícula e shelter indicam condições diagenéticas favoráveis à preservação dos poros e cimentação carbonática, potencializada pela recristalização de componentes biológicos. A Figura 6 captura a interação entre grãos angulosos e subarredondados de quartzo e feldspato, conchas de gastrópodes e cimento carbonático, mostrando a complexidade dos processos formadores dos beachrocks. A predominância de bioclastos (62%) sobre litoclastos (38%) sugere forte influência biológica na formação e preservação dos beachrocks.

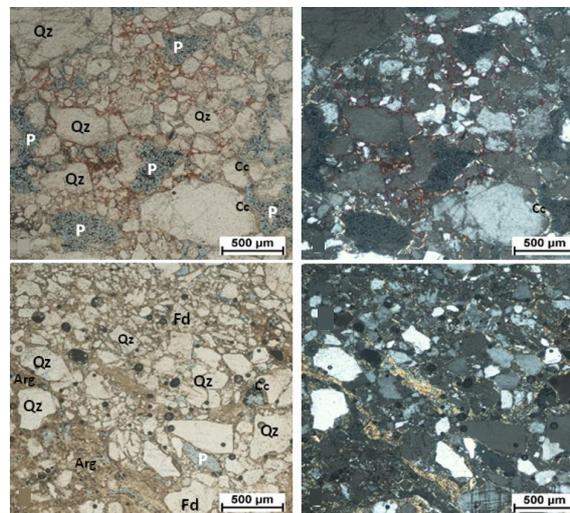


Figura 5. Grãos de quartzo com cimento ferruginoso e micrítico.

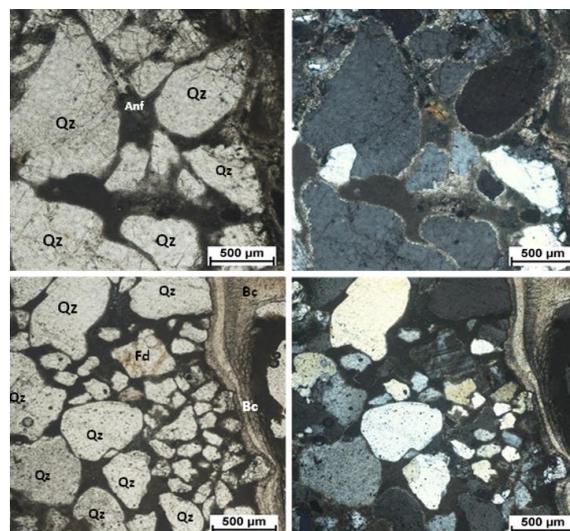


Figura 6. Interação de grãos de quartzo e feldspato com fragmentos de conchas e cimento carbonático.

3.1.3 Praia de Sabiaguaba

Na Praia de Sabiaguaba, as análises petrográficas dos beachrocks mostram uma composição mineralógica de quartzo, feldspato, muscovita, fragmentos de rocha, bioclastos e algas. A porosidade, entre 5% e 10%, é predominantemente intergranular, indicando boa conexão porosa entre os grãos. O cimento,

variando de esparítico a microesparítico, e a ausência de uma matriz sólida sugerem grãos mantidos juntos pela precipitação de calcita carbonática. A textura dos grãos, de subarredondados a angulosos, e a porosidade moderada indicam deposição e cimentação rápidas, limitando a compactação dos sedimentos. Essas características são visualizadas na Figura 7, que mostra seções delgadas das amostras sob diferentes ampliações e iluminação, destacando a variação textural dos grãos e o preenchimento poroso pela resina azul. A predominância de quartzo, feldspatos e muscovita, com bioclastos em menor proporção (82% litoclastos e 18% bioclastos), reflete a influência da área fonte nas características sedimentares dos beachrocks. A presença de cimento calcítico sugere que a cimentação desempenhou um papel crucial na consolidação desses sedimentos.

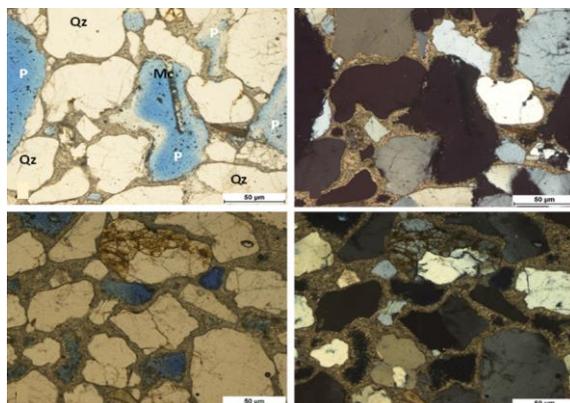


Figura 7. Grãos de quartzo e plagioclásio com cimento ferruginoso e micrítico em matriz argilosa.

3.1.4 Porto das Dunas

No Porto das Dunas, as rochas estudadas têm uma composição mineralógica diversificada, predominando quartzo, feldspatos, muscovita, anfibólio e fragmentos de rocha, com poucos bioclastos. A análise petrográfica revelou uma porosidade de 8%, predominando os tipos shelter e vug. A forma subarredondada e baixa esfericidade dos grãos sugere um transporte moderado antes da deposição. A granulometria moderadamente bem selecionada e a ausência de uma matriz evidente indicam que a cimentação, através de cimento esparítico e microesparítico, foi crucial na consolidação dos sedimentos. A Figura 8 detalha as características microestruturais dos beachrocks do Porto das Dunas, mostrando grãos de quartzo subarredondados, bioclastos e cimento carbonático envolvendo os poros. Essa configuração sugere baixa compactação, com grãos separados por cimentação carbonática, refletindo um ambiente que favoreceu a rápida cimentação e preservação da porosidade. A proporção de 90% litoclastos e 10% bioclastos enfatiza o caráter detrítico dos sedimentos, enquanto a uniformidade na cimentação sugere um processo diagenético contínuo e homogêneo.

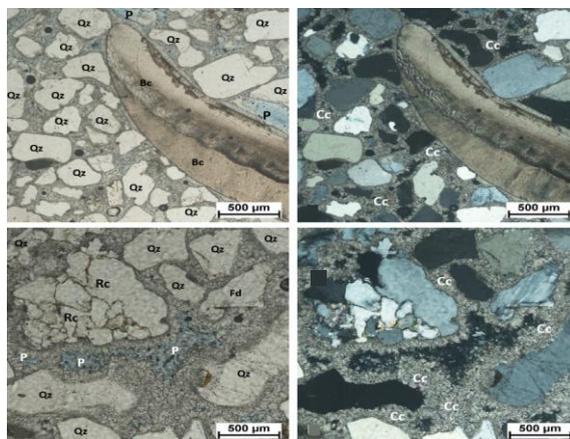


Figura 8. Grãos subarredondados de quartzo, bioclastos e feldspato com cimento carbonático.

4 CONCLUSÃO

Os estudos petrográficos dos *beachrocks* das praias da Barra do Ceará, Sabiaguaba, e Porto das Dunas demonstram uma interação complexa entre processos sedimentares, biológicos e diagenéticos. A variedade mineralógica destas rochas, incluindo quartzo, feldspato, micas, anfibólios, bioclastos e fragmentos de rocha, reflete a diversidade dos ambientes deposicionais e das fontes sedimentares. Os cimentos de calcita destacam a importância dos processos diagenéticos que influenciam as propriedades porosas e mecânicas das rochas.

A análise da amostra da Praia do Pacheco revela baixos teores de carbonato e uma matriz argilosa sericítica, indicando uma distinção geológica possivelmente relacionada ao Grupo Barreiras. As variações nos tipos de porosidade observadas oferecem perspectivas sobre os ambientes deposicionais e diagenéticos, sugerindo que os processos de corrosão e carstificação podem ocorrer em sedimentos mais antigos.

Os dados petrográficos, ainda preliminares, mostram uma composição e textura variada dos *beachrocks*, com uma dinâmica deposicional distinta entre as praias. A porosidade, variando de 4% a 19%, junto com os diferentes tipos identificados, ressalta a complexidade das estruturas porosas e sua influência nas propriedades hidráulicas e mecânicas das rochas.

Os resultados deste estudo fornecem uma base preliminar essencial para a compreensão inicial do comportamento dos *beachrocks*, servindo como um ensaio de campo preliminar que apoia futuras investigações geotécnicas. A caracterização mineralógica e textural detalhada dos *beachrocks* permitirá direcionar os estudos futuros, incluindo ensaios mecânicos específicos, necessários para avaliar a resistência, deformabilidade e outras propriedades geotécnicas críticas dos materiais em fundações de aerogeradores offshore. Esses dados são fundamentais para garantir um planejamento mais seguro e eficiente dos projetos de energia eólica na costa do Ceará.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001 – e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem o apoio financeiro da PETROBRAS, efetivado através de termo de cooperação de P&D que atende à obrigação ANEEL. A gratidão também é estendida ao programa de pós-graduação do departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental e ao programa de pós-graduação do departamento de Geologia, ambos da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo seu apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, N.M, FREIRE, G.S., SOUTO, M.V.S.; NORMANDO, M.N. 2016. *Mapeamento de estruturas submersas e sedimentologia utilizando dados SRTM Plus e Landsat 8: região adjacente ao Rio Jaguaribe, Plataforma Leste do Ceará*. Revista de Geologia, v. 29, nº 1, p. 133-146.
- ALMEIDA, N.M, VITAL, H; GOMES, M.P. 2015. *Morphology of submarine canyons along the continental margin of the Potiguar Basin, NE Brazil*. Marine and Petroleum Geology, v.68, p.307-324.
- ARAÚJO, I. R. F. de. *Platô do Ceará: Uma Plataforma Carbonática Isolada e Afogada da Margem Equatorial Brasileira*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, 2018.
- FRANÇA, A. M. C.; COUTINHO, P. N.; SUMMERHAYES, C. P. *Sedimentos superficiais da margem continental nordeste brasileira*. Revista Brasileira de Geociências., v. 6, p. 71-88, 1976.
- 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.