

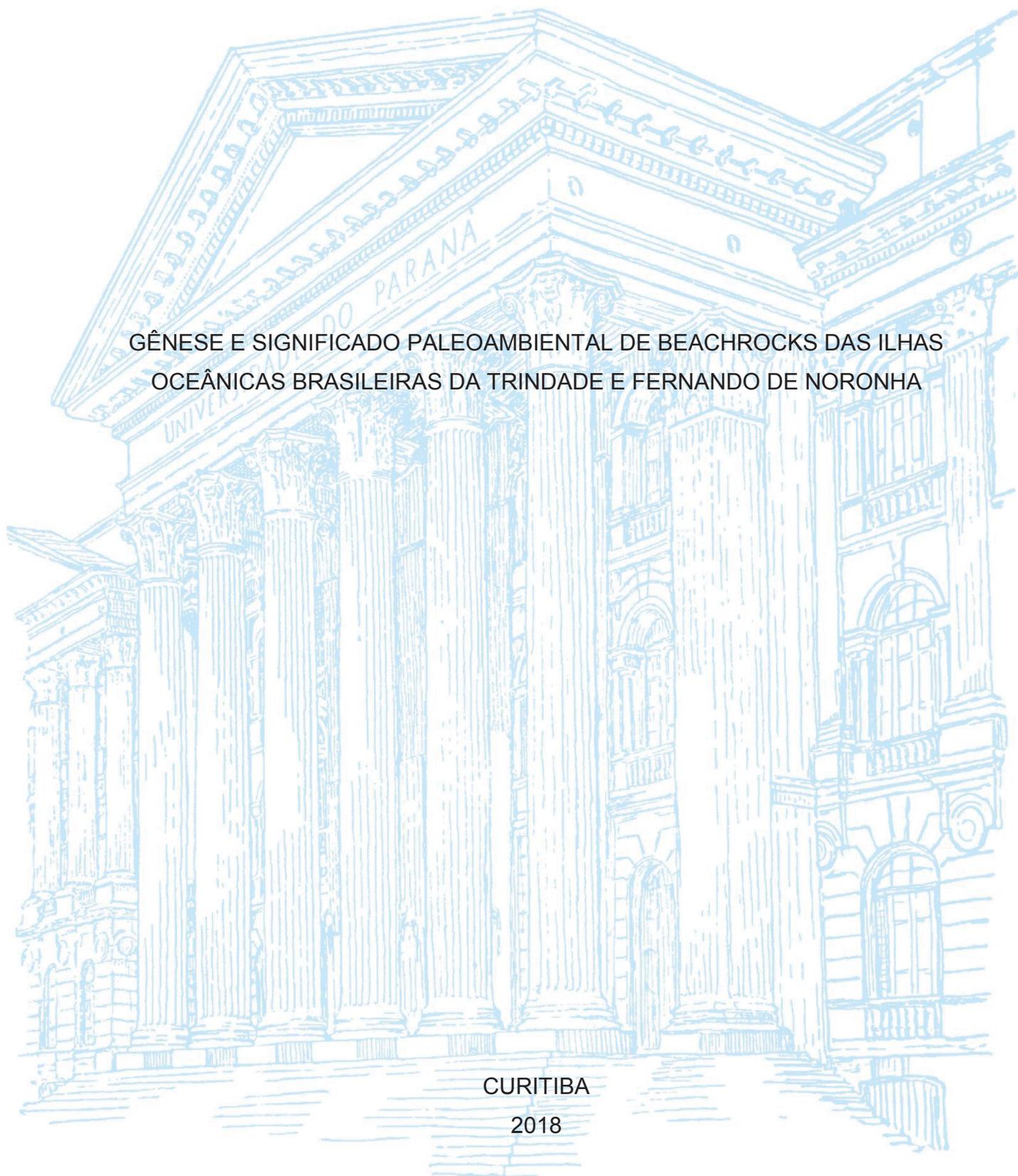
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ERIKA KIEMO PFAU SANTOS

GÊNESE E SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL DE BEACHROCKS DAS ILHAS
OCEÂNICAS BRASILEIRAS DA TRINDADE E FERNANDO DE NORONHA

CURITIBA

2018



ERIKA KIEMO PFAU SANTOS

GÊNESE E SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL DE BEACHROCKS DAS ILHAS
OCEÂNICAS BRASILEIRAS DA TRINDADE E FERNANDO DE NORONHA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia Ambiental, linha de pesquisa em Evolução, dinâmica e recursos costeiros, do Programa de Pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes
Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo José Angulo

CURITIBA
2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SA237g Santos, Erika Kiemo Pfau
Gênese e significado paleoambiental de beachrocks das ilhas oceânicas brasileiras da Trindade e Fernando de Noronha / Erika Kiemo Pfau Santos. – Curitiba, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2018.

Orientador: Luiz Alberto Fernandes.
Coorientador: Rodolfo José Angulo.

1. Arenito de praia. 2. Diagênese. 3. Carbonatos. I. Universidade Federal do Paraná.
II. Fernandes, Luiz Alberto. III. Angulo, Rodolfo José. IV. Título.

CDD: 552.5

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA

TERMO DE APROVAÇÃO

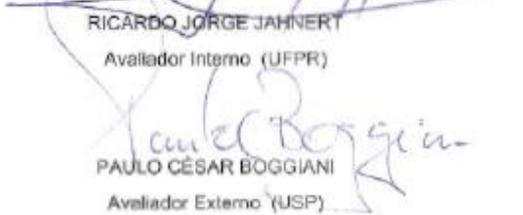
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ERIKA KIEMO PFAU SANTOS** intitulada: **GÊNESE E SIGNIFICADO PALEOAMBIENTAL DE BEACHROCKS DAS ILHAS OCEÂNICAS BRASILEIRAS DA TRINDADE E FERNANDO DE NORONHA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Maio de 2018.


LUIZ ALBERTO FERNANDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


RICARDO JORGE JAHNERT
Avaliador Interno (UFPR)


PAULO CÉSAR BOGGIANI
Avaliador Externo (USP)

À minha família e a todos que amo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao meu amor, Diógenes Magno Laube, por todos os dias de convivência, pelo apoio nos momentos alegres e de desespero. Você sempre foi meu norte nos momentos que não sabia como prosseguir. Simplesmente obrigada por ser meu cais em meio ao caos.

Aos meus orientadores Luiz Alberto Fernandes e Rodolfo José Angulo pela paciência durante estes dois anos e por todo aprendizado.

À Amanda H. Carvalho, Camila Siveira, Mayara Santana e Thaili Conte. Obrigada pelo apoio incondicional. Vocês me fizeram mais forte a cada dia. Muito mais do que amigas de pós-graduação, vocês são pessoas que quero levar comigo para a vida.

Ao Leonardo Mairink Barão, um obrigado especial por toda ajuda com os mapas, coleta de amostras e anos de convivência.

Ao Maurício Garcia pelo apoio nos momentos de pressão e por toda ajuda com as amostras coletadas em Trindade.

Aos amigos de pós-graduação pelas discussões, ensinamentos, apoio e por deixar meus dias em Curitiba mais iluminados.

Ao LECOST pelas amostras fornecidas e a todos os seus integrantes pelo apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao laboratório LabESed pela infraestrutura e especialmente ao técnico Daniel Paredes, pela ajuda com as análises das amostras.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica - UFPR pelas análises e imagens realizadas.

A equipe do LAMIR pela ajuda com as lâminas petrográficas.

A Marinha do Brasil e ao programa Protrindade por possibilitar a coleta das amostras.

Obrigada à UFPR e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia pela infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

A todos que de alguma maneira contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigada!

“Feelings are much like waves; we can’t stop them from coming but we can choose which one to surf.”

- Jonatan Martensson

RESUMO

Beachrocks são rochas sedimentares, formadas restritamente em região intermarés a partir da precipitação de cimentos de calcita magnesiana e/ou aragonita. Sua distribuição segue o gradiente latitudinal de temperatura, devido a solubilidade dos carbonatos na água. Com sua formação em faces praias, os afloramentos de *beachrocks* são utilizados em estudos sobre evolução e problemas de erosão costeira, variação no nível do mar e proveniência de carbonatos. Apesar da sua importância, ocorrências destas rochas ainda não foram estudadas com detalhe nas ilhas oceânicas brasileiras. A formação de tais ilhas está associada a processos relacionados à evolução da cadeia meso-oceânica do Atlântico. Nos casos de Trindade (20°30'S e 29°20'W) e Fernando de Noronha (03°51'S e 32°25'W), emergem como parte de uma cadeia vulcânica orientada em direção leste-oeste. O objetivo deste estudo é compreender a gênese e evolução diagenética dos *beachrocks* em Trindade e no arquipélago de Fernando de Noronha durante o Quaternário, a partir da composição das partículas e de relações entre cimentos diagenéticos e seus distintos ambientes. Foram confeccionadas 24 seções delgadas para descrições petrográficas em microscópio óptico de luz polarizada transmitida e em microscópio eletrônico de varredura. Entre as amostras analisadas apenas as localizadas nas praias das Tartarugas, do Parcel, do Andrada e na praia Vermelha da ilha da Trindade podem ser consideradas *beachrocks* em seu sentido restrito. Essas apresentaram laminação plano-paralela e inclinação de ~13° sendo interpretada como rochas cimentadas na face praias pelo espraiamento e recuo das ondas. Uma sucessão de fases diagenéticas foi observada nos *beachrocks* estudados, incluindo a precipitação de aragonita microcristalina, acicular e fibrosa, geração de clorita autigênica e presença de biofilme. Com cimentos predominantemente aragoníticos esses *beachrocks* foram formados em zona freática marinha ativa, onde a água marinha tem influência direta na cimentação devido ao espraiamento e recuo das ondas. A presença de biofilme junto aos cimentos de aragonita e clorita sugere que a formação dessas rochas ocorreu em conjunto tanto por atividade físico-química como desgaseificação do CO₂ quanto por atividade microbiológica.

Palavras – chave: arenito de praia; diagênese; carbonatos

ABSTRACT

Beachrocks are sedimentary rocks, generated strictly in the intertidal zone from the precipitation of magnesian calcite and/or aragonite. Its distribution follows the latitudinal temperature gradient due to the solubility of the carbonates in the marine water. Occupying the beach faces, the outcrops of beachrocks are used in studies of coastal evolution, sea level variation and carbonate origin. Despite their importance, occurrences of these rocks have not yet been studied with detail in the Brazilian oceanic islands. The formation of such islands is associated with processes related to the evolution of the Atlantic meso-oceanic chain. In the cases of Trindade (20°30'S and 29°20'W) and Fernando de Noronha (03°51'S and 32°25'W), they emerge as part of an east-west oriented volcanic chain. The objective of this study is to understand the genesis and diagenetic evolution of the beachrocks in Trindade and the Fernando de Noronha archipelago during the Quaternary, from the composition of the particles and the relationships between diagenetic cements and their different environments. Twenty-four thin sections were prepared for petrographic descriptions under an optical microscope of transmitted polarized light and scanning electron microscopy. Among the samples analyzed, only those located on the beaches of Tartarugas, Parcel, Andrada and Vermelha Beach on the island of Trindade can be considered beachrocks in their restricted sense. These presented plain-parallel lamination and slope of $\sim 13^\circ$ being interpreted as cemented rocks in the face beaches by the spreading and retreat of the waves. A succession of diagenetic phases was observed in the beachrocks studied, including the precipitation of microcrystalline, acicular and fibrous aragonite, generation of autigenic chlorite and presence of biofilm. With predominantly aragonite cements these beachrocks were formed in an active marine water table, where marine water has a direct influence on cementation due to the spreading and retreat of the waves. The presence of biofilm in the cements of aragonite and chlorite suggests that the formation of these rocks occurred together both physicochemical activity and CO₂ degassing as well as microbiological activity.

Keywords: beach sandstone; diagenesis; carbonates

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	11
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	11
1.2 OBJETIVO	12
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2 ÁREA DE ESTUDO	13
2.1 ILHA DA TRINDADE (IT).....	14
2.2 ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA (AFN).....	21
CAPÍTULO II.....	28
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1 PRECIPITAÇÃO E QUÍMICA DOS CARBONATOS	26
3.2 <i>BEACHROCKS</i>	28
3.2.1 Características gerais	28
3.2.2 Ocorrência	29
3.2.3 Diagênese e cimentação	32
3.2.4 Significado paleoambiental	40
3.2.5 Impactos na dinâmica costeira	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
CAPÍTULO III.....	47
5 RESULTADOS	45
5.1 INTRODUÇÃO	45
5.2 ÁREA DE ESTUDO	47
5.3 MATERIAS E MÉTODOS.....	49
5.4 CARACTERÍSTICAS DE CAMPO.....	49
5.5 RESULTADOS	51
5.5.1 Características gerais.....	51
5.5.2 Características diagenéticas.....	52
5.6 DISCUSSÃO	58
5.7 CONCLUSÕES	61
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES ADICIONAIS	62
CAPÍTULO IV.....	66
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

CAPÍTULO I

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está estruturada em quatro capítulos, sendo o primeiro (Capítulo I), composto pela introdução da dissertação, justificativas, objetivos e informações sobre a área de estudo.

O Capítulo II tem foco na fundamentação teórica e pesquisa bibliográfica realizada para o desenvolvimento deste trabalho, além dos materiais e métodos utilizados.

O Capítulo III apresenta o resultado da pesquisa em forma de artigo, como exigência do Programa de Pós-graduação, intitulado “Gênese de *beachrocks* e recifes da ilha oceânica da Trindade” e resultados complementares relacionados ao arquipélago de Fernando de Noronha.”

O Capítulo IV, trata-se de um capítulo de fechamento e considerações finais sobre a dissertação.

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Beachrocks, também conhecidos como arenitos de praia, recifes de arenito ou rochas praias, são rochas sedimentares, resultantes da litificação de sedimentos praias. Em seu sentido genético, sua formação está limitada a zonas de estirâncio (região entremarés) e se dá a partir da cimentação causada pela precipitação de carbonato de cálcio, na forma de calcita magnesiana e/ou aragonita (HOPLEY, 1986; VIEIRA; DE ROS, 2006; VOUSDOKAS et al., 2007).

A ocorrência dessas rochas é bastante comum no cenário costeiro brasileiro onde o primeiro estudo registrado foi feito por Darwin em 1841 (CABRAL-NETO, 2011). O número de trabalhos científicos abordando essa temática no Brasil tem crescido desde então e atualmente sua maior concentração está na região nordeste (e.g. CABRAL-NETO et al., 2010;

GUIMARÃES et al., 2016 e VIEIRA et al., 2017) e na região sudeste (e.g. DA SILVA et al., 2014 e CASTRO et al., 2014).

Apesar da sua importância, tanto do ponto de vista científico quanto econômico, estudos sobre *beachrocks* ainda estão concentrados na região costeira continental. Nas ilhas oceânicas brasileiras, afloramentos de *beachrocks stricto sensu* só foram observados e descritos brevemente para a ilha da Trindade (e.g. ALMEIDA, 1961; ANGULO et al., 2018), embora em nenhum dos casos tenha sido o motivo principal de estudo.

Desta maneira, justifica-se a oportunidade de aprofundamento de estudos sobre sua gênese e evolução diagenética. A pesquisa adquire interesse adicional, se consideramos: (i) a influência que tais rochas exercem sobre a evolução costeira e a biota marinha (COOPER, 1991); (ii) o significado das mesmas como indicadores da posição do nível relativo do mar (HOPLEY, 1986); (iii) a possibilidade que oferecem para estudos do ambiente diagenético raso (LONGMAN, 1980) e, em consequência, de compreender melhor os seus processos formadores; (iv) inferir sobre a proveniência de carbonatos costeiros a partir do estudo de cimentos (VOUSDOUKAS et al., 2007); (v) inferir sobre mecanismos de transporte e zonas de deposição dos sedimentos e (vi) compreender os processos de formação de *beachrocks* com o intuito de gerar modelos para a possível fabricação de rochas artificiais, compostas de material natural, para estabilização da linha de costa e como medida mitigatória para problemas de erosão costeira (DANJO; KAWASAKI, 2013, 2014).

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal da pesquisa é o estudo comparativo de *beachrocks* das ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, visando verificar possíveis congruências e divergências na sua gênese e evolução diagenética, ocorridas durante o Quaternário (Pleistoceno Superior ao Holoceno).

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo principal estabelecido será alcançado segundo objetivos específicos, destacados a seguir:

- caracterizar petrograficamente os *beachrocks* das ilhas da Trindade e Fernando de Noronha,
- reconstituir suas gêneses e modificações diagenéticas,
- gerar modelos diagenéticos para os *beachrocks* das ilhas,
- estabelecer eventuais correlações sobre a sua evolução.

2 ÁREA DE ESTUDO

As ilhas oceânicas são ambientes isolados do continente e de áreas pequenas no que se refere a sua porção emersa. Cinco ilhas e arquipélagos fazem parte do território nacional: arquipélagos de São Pedro e São Paulo, Fernando de Noronha e atol das Rocas na região equatorial; ilha da Trindade e Martin Vaz na região tropical (MAPA 1).

MAPA 1 – LOCALIZAÇÃO DAS ILHAS OCEÂNICAS BRASILEIRAS, COM DISTÂNCIAS DAS CAPITAIS MAIS PRÓXIMAS



FONTE: ALMEIDA (2006)

Segundo Almeida (2006), a formação das ilhas oceânicas brasileiras está relacionada a processos relacionados com a evolução da cadeia meso-oceânica do Atlântico, onde a mesma é seccionada por falhas transformantes. Os traços inativos deixados por essas falhas constituem as zonas de fratura e estão presentes ao longo de toda a cadeia meso-oceânica, podendo se estender por centenas de quilômetros. Essas zonas representam faixas de fraqueza da litosfera oceânica, onde são formadas elevações oceânicas, *guyots* e ilhas a medida que a placa desliza por plumas mantélicas e/ou *hotspots*. Nos casos de Fernando de Noronha e Trindade suas origens coincidem, emergindo como parte de uma cadeia vulcânica orientada em direção leste-oeste (ALMEIDA, 1955, 2006).

Devido a sua origem vulcânica, as rochas encontradas em Trindade, Martin Vaz e Fernando de Noronha são extremamente ricas em sódio e insaturadas em silício, com abundantes domos e *plugs* fonolíticos e diferentes tipos de basalto; representam então a província mais alcalina entre as ilhas vulcânicas oceânicas do mundo (KLUGEL, 2009).

Na presente pesquisa serão analisados *beachrocks* de praias das ilhas da Trindade e Fernando de Noronha.

2.1 ILHA DA TRINDADE (IT)

A IT situa-se no oceano Atlântico Sul (20°30'S e 29°20'W), no paralelo de Vitória, estado do Espírito Santo, afastada a 1.170 km da costa (MAPA 1). Possui 9,28 km² em área e 67 km de diâmetro (CALLIARIA et al., 2016).

Segundo Almeida (1961), as ilhas de Trindade e Martin Vaz formam a extremidade oriental do lineamento submarino Vitória-Trindade. A IT possui cerca de 8 Ma e corresponde à parcela emergente de um vulcão de rochas alcalinas com mais de 5.500 m de altura acima do assoalho oceânico.

Sua parte emersa possui relevo extremamente acidentado como resultado dos processos intempéricos em rochas altamente heterogêneas. Em cerca de 13,5 km² (área total emersa da ilha com a sua plataforma de abrasão), existem três picos com altitude aproximada de 600 m (ALMEIDA, 2002).

Almeida (1961, 2002) caracterizou as unidades litoestratigráficas aflorantes na porção emergente da ilha e propôs sua evolução geológica,

posteriormente revista e modificada por Pires & Bongiolo (2016) (MAPA 2). Sendo elas:

Complexo de Trindade: Um conjunto heterogêneo de rochas fonolíticas intrusivas e piroclásticas, sendo a representação visível acima do nível do mar mais antiga de um evento vulcânico.

Sequência Desejado: Representada por uma intercalação de depósitos efusivos e piroclásticos, que sobrepõem o Complexo de Trindade através de uma superfície de inconformidade.

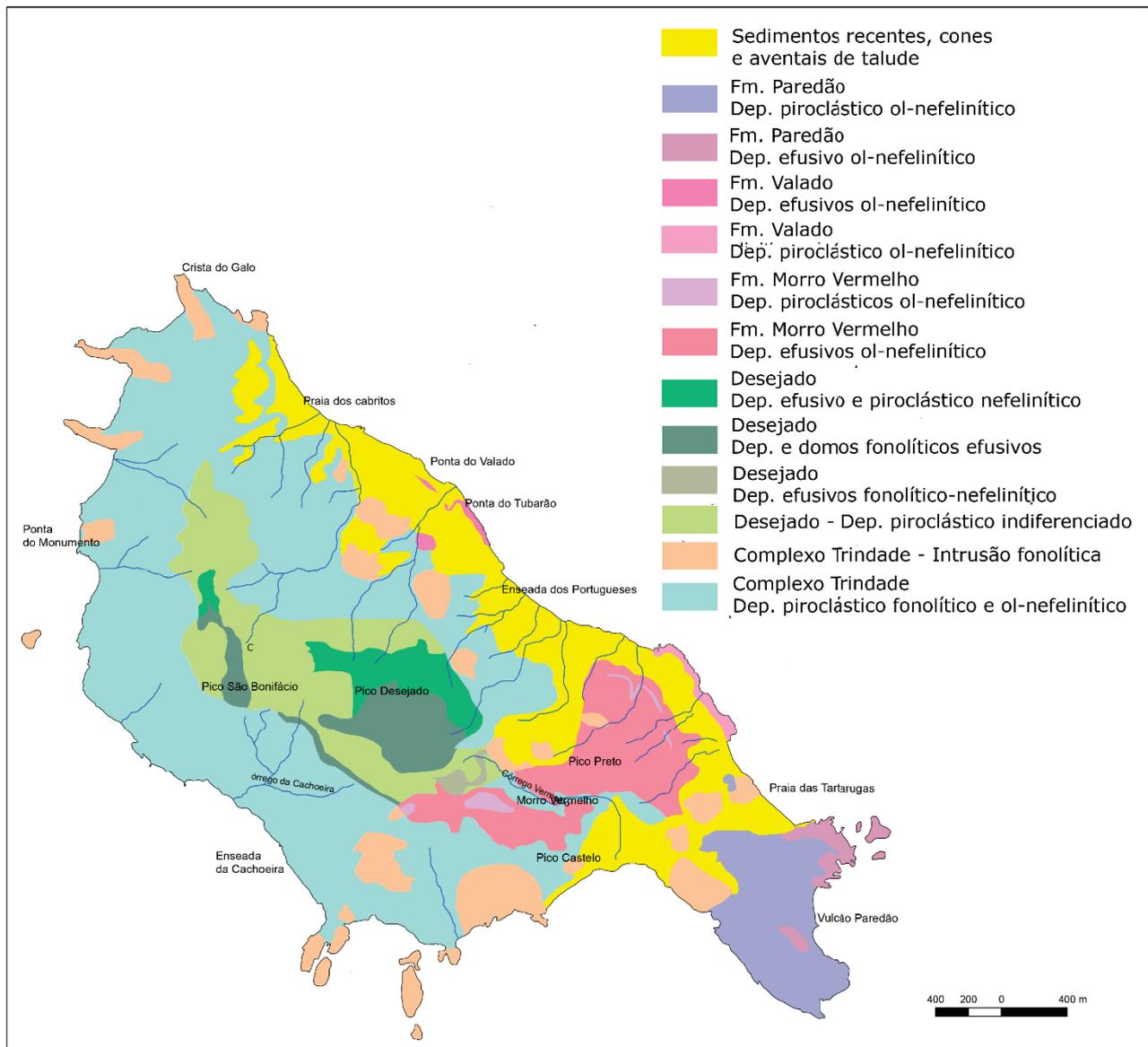
Formação Morro Vermelho: Sucessão nefelinítica que sobrepõe a Formação Desejado. É representada pela intercalação de depósitos efusivos e piroclásticos, originados de um conduto vulcânico em Morro Vermelho.

Formação Valado: Sucessão nefelinítica representada pela intercalação de depósitos efusivos e piroclásticos, em porções iguais, originadas de um conduto vulcânico localizado na porção norte da ilha.

Vulcão do Paredão: Sucessão nefelinítica de depósitos piroclásticos, intercalados com pequenos depósitos efusivos. Cone vulcânico parcialmente erodido pela ação das ondas, formando escarpas de quase 200 m, localizado na porção oriental da ilha.

Devido sua evolução geológica, é possível observar uma diferenciação nas características do relevo entre o leste e oeste da ilha. A região leste da ilha é mais baixa, com relevo tabular condicionado por estrutura dos estratos de fluxos vulcânicos, que formaram encostas mais suaves, juntamente com as praias, que aumentam a largura em direção ao sudeste (MAPA 3). Além disso a heterogeneidade das associações rochosas presentes na IT favorece a compartimentação dos ambientes praias, o controle do tamanho e composição mineral dos grãos, bem como o grau de exposição das ondas, devido à erosão diferenciada (ALMEIDA, 1961; CASTRO; ANTONELLO, 2006).

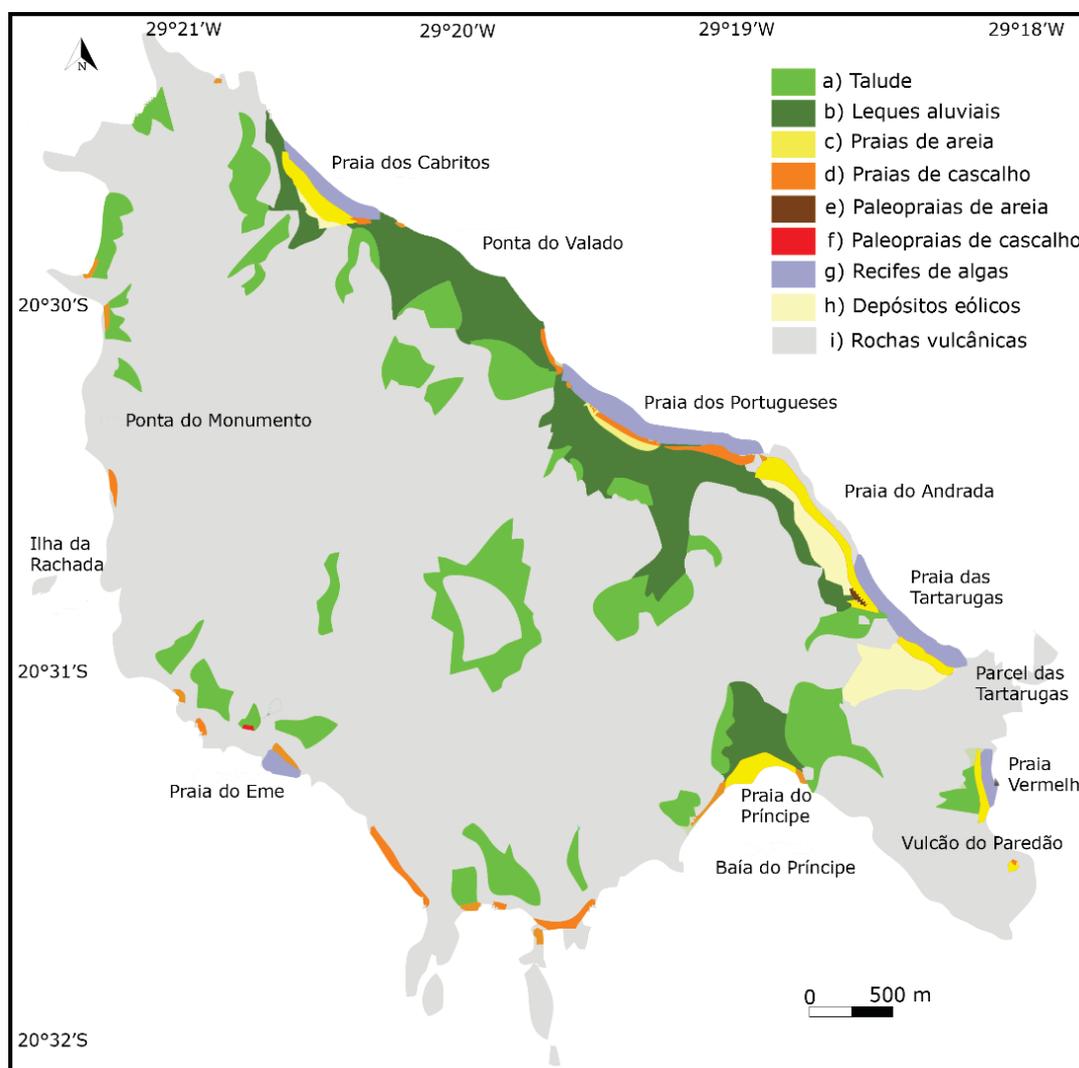
MAPA 2 - MAPA GEOLÓGICO DA ILHA DA TRINDADE COM AS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS AFLORANTES E DEPÓSITOS QUATERNÁRIOS.



FONTE: Modificado de PIRES; BONGIOLO (2016).

Com relação aos depósitos quaternários, Almeida (1961) descreveu, para IT, oito unidades sedimentares: depósitos continentais de talude e leques aluviais, depósitos costeiros de areia e cascalho em praias atuais, depósitos em paleopraias de areia e cascalho, recifes de algas e depósitos eólicos (MAPA 3).

MAPA 3 - UNIDADES SEDIMENTARES QUATERNÁRIAS. DEPÓSITOS CONTINENTAIS DE: A) TALUDE E B) LEQUES ALUVIAIS; DEPÓSITOS COSTEIROS DE: C) AREIA E D) CASCALHO EM PRAIAS ATUAIS, DEPÓSITOS EM PALEOPRAIAS DE E) AREIA E F) CASCALHO, G) RECIFES E H) DEPÓSITOS EÓLICOS.



FONTE: Modificado de ANGULO et al. (2018).

A linha de costa na ilha da Trindade reflete, em seus menores detalhes, a resistência da estrutura geológica em que se estabeleceu (CASTRO, 2010). Com comprimento total da linha de costa de 21,7 km, dos quais 16,7 km (76,7%) são de encostas rochosas e 5,1 km (24%) são constituídos de 16 praias de areia e cascalho (TABELA 1) (CALLIARI et al., 2016). Dentre essas praias, as seis com maior volume de sedimentos situam-se a nordeste e sudeste da ilha: Cabritas, Calheta, Andrada, Tartarugas, Vermelha/Túnel e Príncipe (CALLIARI et al., 2016).

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA LINHA DE COSTA, A LESTE E A OESTE, DA IT, COM INDICAÇÃO DE SUA EXTENSÃO TOTAL.

	Rochoso (km)	Praias arenosas (número)	Praias arenosas (km)	Praias de areia e cascalho (número)	Praias de areia e cascalho (km)	Praias cascalhosas (número)	Praias cascalhosas (km)
Costa Leste	5,9	6	1,20	1	0,53	2	0,82
Costa Oeste	11,8	0	0	4	1,41	3	1,10
Total	16,7	6	1,20	5	1,94	5	1,92

FONTE: Modificado de CALLIARI et al. (2016).

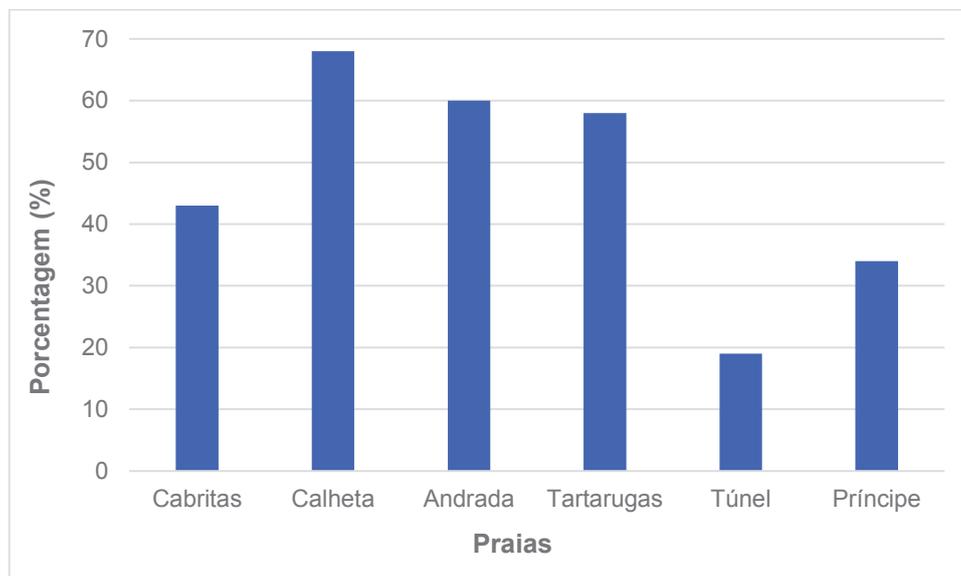
Com relação ao tamanho de grão dos sedimentos, Castro (2010) observou que as praias voltadas para o quadrante oeste-sudoeste possuem granulação de média a grossa e as praias com face voltada para leste-nordeste de fino a média.

Segundo Calliari et al. (2016), as praias a nordeste e sudeste da ilha (com maior volume de sedimentos), são compostas por fragmentos de algas calcárias provenientes dos bancos de recifes compondo entre 19 a 66% dos sedimentos e minerais pesados com porcentagens variando de 30% (Praia da Calheta) a 63% (Praia do Príncipe).

Nas praias do Príncipe e Eme, foram registradas a ocorrência de magnetita, bioclastos de aragonita, zircão, concreções hematíticas e concreções goethíticas. Já nas praias do Túnel, Tartarugas, Portugueses e Cabritos, ocorrem magnetitas, concreções hematíticas, zircão e rutilo (CASTRO, 2010). Em Tartarugas, praia mais larga da ilha, são encontradas camadas compostas por altas concentrações de minerais pesados (cerca de 90%), com 10 cm de espessura, indicando processos de seleção hidráulica na face praial (CASTRO, 2010) e lajes de *beachrocks* que emergem na maré baixa (CALLIARI et al., 2016).

Com relação a porcentagem de carbonatos, a praia da Calheta apresenta a maior concentração, com cerca de 65%, enquanto a praia Vermelha/Túnel apresenta a menor (GRÁFICO 1), com sedimentos dominados por fragmentos de rochas vulcânicas alcalinas, o que dá a cor avermelhada aos mesmos e nome à praia Vermelha.

GRÁFICO 1 - PORCENTAGEM MÉDIA DE GRÃOS DE CARBONATO DE CÁLCIO NOS DEPÓSITOS DE AREIAS DE PRAIAS DA IT.



FONTE: Modificado de CALLIARI et al. (2016).

Na Praia do Andrada, os sedimentos são constituídos por olivinas, magnetitas, piroxênios, biotita, anfibólios e rutilo (CASTRO, 2010). Na mesma praia, os derrames da Formação Morro Vermelho posicionam-se na zona de arrebenção como uma barreira natural às ondas provenientes do quadrante nordeste e sudeste (CASTRO, 2010). De modo geral, os sedimentos de praia refletem a composição mineral das rochas adjacentes, onde o processo deposicional é resultado do transporte sedimentar de curta distância entre a rocha fonte e a praia (CASTRO; ANTONELLO, 2006).

As rochas expostas e os recifes de algas coralinas na zona de surfe funcionam como fontes de material particulado que compõem os sedimentos praias, e proteção aos mesmos, pois também influenciam na energia e circulação hidrodinâmica. É possível observar a ausência desses recifes nas praias Vermelha e do Príncipe, bancos mais contínuos nas praias das Tartarugas e Cabritas, e descontínuos em Andrada e Calheta (CALLIARI et al., 2016). Isso pode ser reflexo da incidência das ondas, que segundo Calliari *et al.* (2016) é mais intensa nos setores leste e sudoeste da IT, onde as ondas provenientes de mar profundo têm pouca dissipação de energia sobre a plataforma estreita da ilha (100 m de profundidade e apenas 1 km em direção ao mar).

A IT tem clima tropical semiúmido a semiárido, com uma média de temperatura anual de 25,2°C, com máximas de 30°C em fevereiro e mínimas de 17°C em agosto (MOHR et al., 2009). As médias de temperatura mais altas ocorrem entre janeiro e abril, enquanto os valores mais baixos são verificados entre julho e outubro. Entretanto não são identificadas estações bem definidas e nem diferenças consideráveis entre os meses de verão e inverno. Esse comportamento pode ser explicado pelas características climáticas associadas a condições oceânicas, onde há maior disponibilidade de vapor de água para formar nuvens de chuva, especialmente *cumulonimbus*, e eventos de precipitação convectiva (DURÃES et al., 2016).

Durães et al. (2016) descrevem média de precipitação anual para IT de 963,5 mm, com valores máximos de 2.578 mm e mínimos de 479,1 mm. Em termos de valores médios, as estações mais chuvosas são o outono e a primavera, sendo o verão, o mais seco. Segundo os autores, assim como com a temperatura, esse comportamento pode ser associado ao clima oceânico que é propício para a formação de nuvens de chuva, ao contrário do que ocorre no continente, que está sob a influência de áreas de alta pressão atmosférica e bloqueios atmosféricos nos intervalos de latitudes tropicais, especialmente no inverno.

Entre os meses de abril e outubro, a ilha tem efeitos de frentes frias periódicas vindas da Antártica, que sobem pela Argentina até o sul do Brasil e, ao chegar na região Sudeste, se deslocam em direção ao oceano e atingem a IT, provocando mudanças abruptas nas condições do mar (CLEMENTE et al., 2009).

A IT também é influenciada diretamente pelos ventos alísio provenientes de leste (119,96° L) com uma velocidade média de 6,36 m.s⁻¹. Os ventos mais fortes que incidem na ilha são provenientes de ciclones extratropicais que geram ventos fortes de sul e sudeste (CALLIARI et al., 2016).

Angulo et al. (2018) registraram que os ventos na costa nordeste da IT sopram principalmente do Leste, com ventos fortes de leste-sudeste. Também foram registrados ventos fracos das direções norte-nordeste e ausência de ventos do sudoeste, oeste-sudoeste, oeste e oeste-noroeste. Esta ausência foi explicada pelos autores como reflexo causado pela elevação da ilha de mais de 600 m, gerando uma barreira onde a estação meteorológica foi instalada. Entre

os meses de junho a setembro, há um aumento na velocidade dos ventos, quando o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul se move em direção à costa do Brasil.

A IT está inserida em um regime de micromaré semidiurna, com uma amplitude de 1,3 m. Com relação às ondas, as mesmas chegam a ilha do sentido sul (33,7%), sudoeste (23,4%), leste (18,1%), norte (10,3%) e sudeste (10,1%), com o restante (4,4%) do *swell* de noroeste, nordeste e oeste. A altura média significativa das ondas é de 2,14 m, com períodos de 11,07 s. Ondas maiores, com altura significativa entre 4 e 6 m são menos frequentes e chegam principalmente a partir do sul, sendo geralmente formadas por ciclones extratropicais gerados no sudoeste do Atlântico (CALLIARI et al., 2016).

2.2 ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA (AFN)

O AFN (03°51'S e 32°25'W) localiza-se a 360 km a NE de Natal (MAPA 1). Com 18,4 km², é um parque nacional marinho e patrimônio da humanidade, sendo protegido legalmente pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).

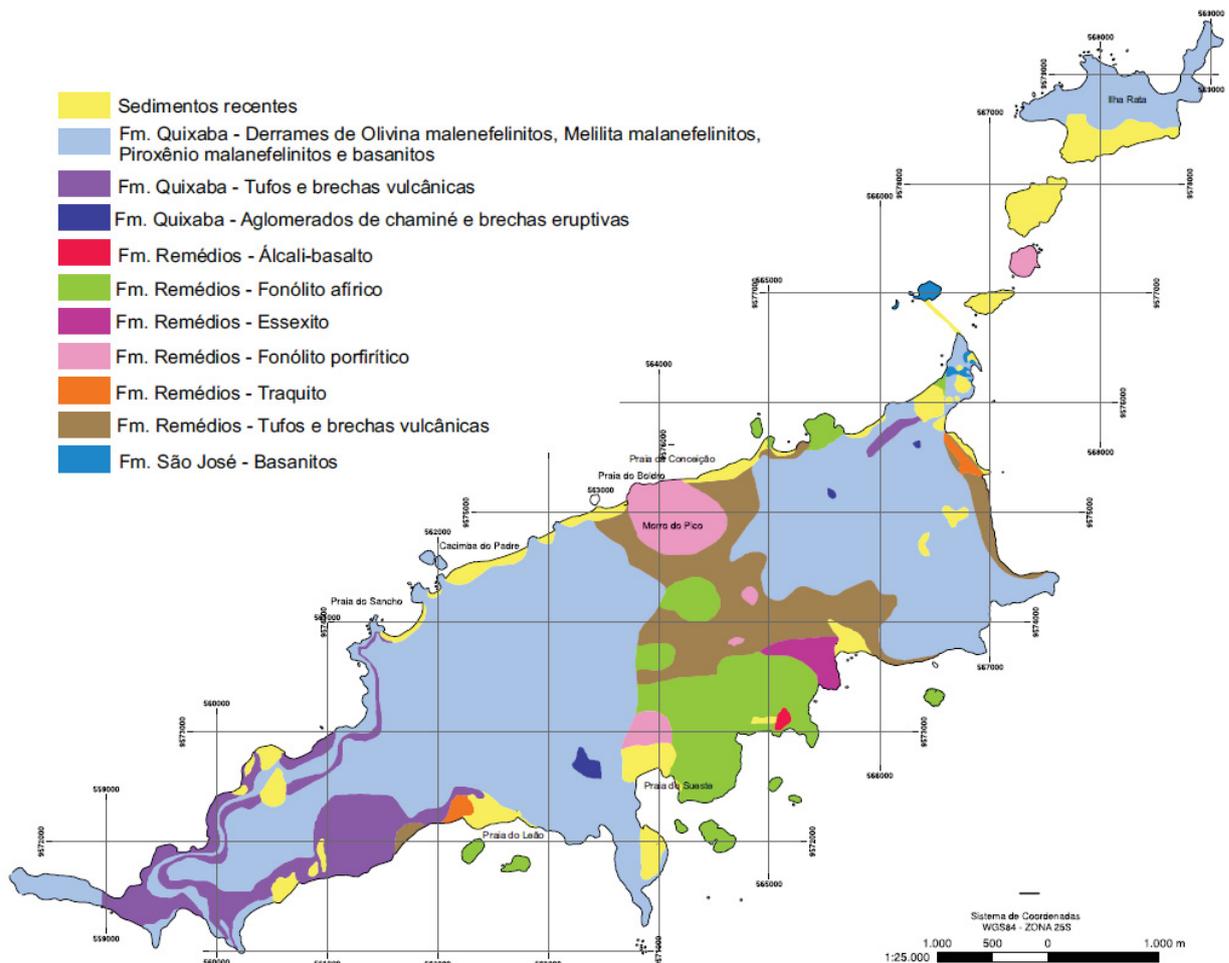
Segundo Almeida (2006), o AFN localiza-se na extremidade oriental da cadeia de Fernando de Noronha, constituída por *guyots*, cobertos por calcários biogênicos, como produto da erosão subaérea e abrasão marinha.

Composto por uma ilha principal, com 10 km de comprimento e média de 2 km de largura, e outras 18 pequenas ilhas, o AFN é formado por rochas vulcânicas e subvulcânicas subsaturadas, acentuadamente sódico-alcálicas (ALMEIDA, 2006).

Durante a década de 50, Almeida realizou algumas pesquisas no arquipélago, que foram posteriormente sumarizadas em Almeida (2002, 2006). Nessas pesquisas, o autor descreve a formação das ilhas como resultado de dois episódios vulcânicos principais. O mais antigo originou a Formação Remédios (piroclastos ligados a vulcanismo fonolítico, penetrados por diques, *plugs* e domos de fonólito, álcali-basalto, traquiandesito e outras rochas básicas e ultrabásicas). O segundo evento gerou a Formação Quixaba (derrames e piroclastos de composição ankaratrítica e diques de nefelinito). Almeida (1955) distinguiu uma terceira unidade litoestratigráfica que acreditou ser a mais nova,

constituída pelo derrame de nefelina basanita da ilha de São José, nomeando-a de Formação São José (MAPA 4).

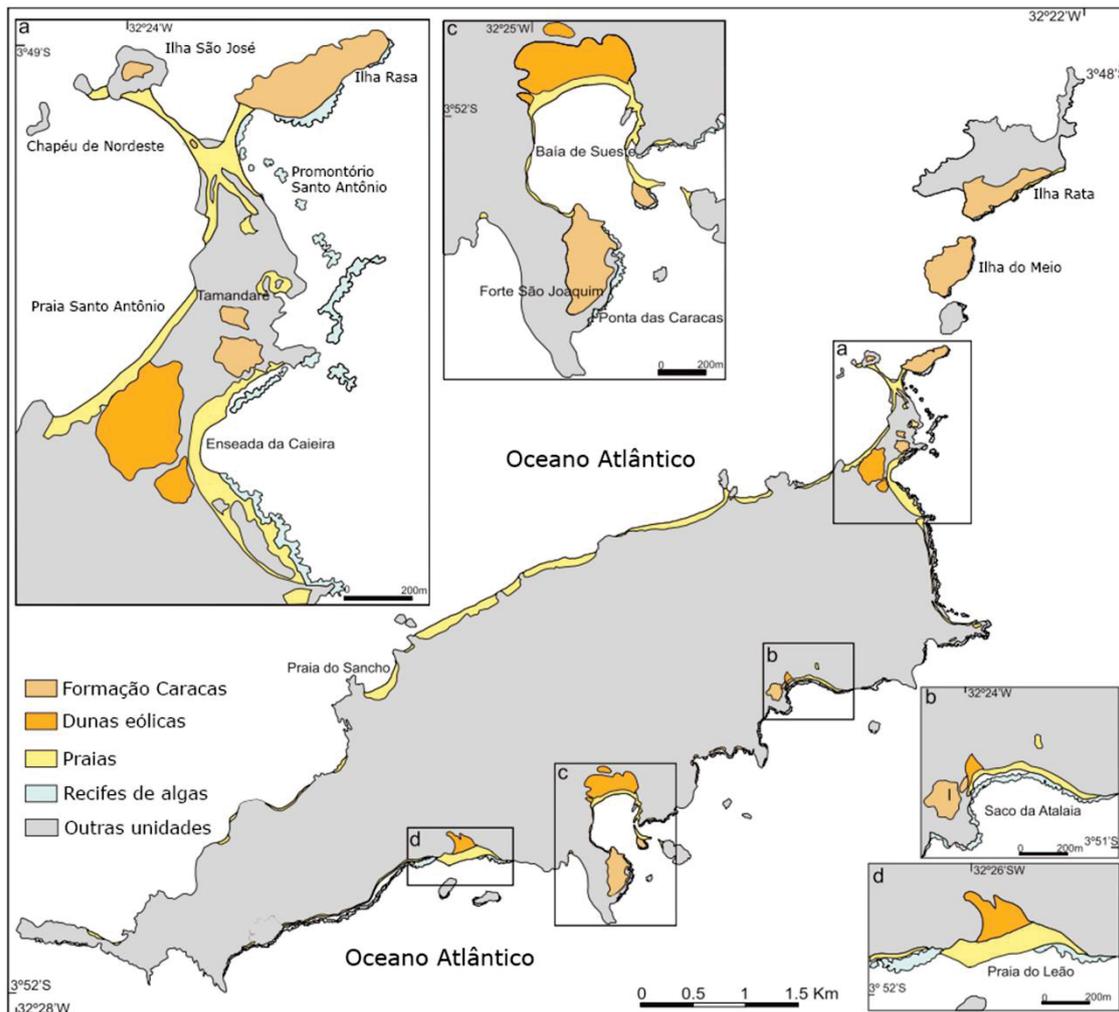
MAPA 4 - MAPA GEOLÓGICO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA, COM A REPRESENTAÇÃO DAS FORMAÇÕES QUIXABA, REMÉDIOS E SÃO JOSÉ, ALÉM DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES RECENTES.



FONTE: Adaptado de LOPES (2002)

Após o término do vulcanismo no final do Plioceno, iniciou-se um ciclo erosivo que entalhou a plataforma insular. Com as oscilações do nível do mar durante o Pleistoceno, houve a exposição da plataforma, que propiciou o desenvolvimento de um campo de dunas tangidas pelos ventos alísios de SE, com areias de origem biogênica compostas por carbonato de cálcio e minerais das rochas magmáticas, que posteriormente se consolidaram formando os calciaarenitos das Caracas (ALMEIDA, 2006; 2002) (MAPA 5).

MAPA 5 - REPRESENTAÇÃO DAS UNIDADES QUATERNÁRIAS DESCRITAS POR ALMEIDA (1955).



FONTE: Modificado de ANGULO et al. (2013).

A linha de costa do arquipélago apresenta formas erosivas como entalhes e terraços de abrasão de ondas, estruturas biogênicas como recifes de algas calcárias, e deposicionais como praias de areia e cascalho, e dunas eólicas (ANGULO et al., 2013) (MAPA 5). Com cerca de 37 km de costa, a ilha principal apresenta 28,5 km de extensão rochosa, praias predominantemente pequenas, em baías, e bem expostas aos seus respectivos regimes de ondas, compostas de areia e cascalho (TABELA 2). As praias arenosas ocorrem principalmente na costa mais protegida das ondas, a noroeste, mas também ocorrem em locais protegidos na costa sudeste, sendo constituídas de bioclastos calcários na fração areia fina a média, moderadamente a bem selecionada (BARCELLOS et al., 2011; MANSO et al., 2011).

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA LINHA DE COSTA, A SUL E A NORTE, DE FERNANDO DE NORONHA, COM INDICAÇÃO DE SUA EXTENSÃO TOTAL.

	Rochoso (km)	Praias de areia (número)	Praias de areia (km)	Praias de cascalho (número)	Praias de cascalho (km)
Costa Sul	18,7	5	1,5	9	1,8
Costa Norte	9,8	10	3,4	8	1,7
Total	28,5	15	4,9	17	3,5

FONTE: Modificado de CALLIARI et al. (2016).

As praias de cascalho ocorrem principalmente na costa sul e leste da ilha. São compostas principalmente de seixos e matacões formados principalmente de rochas vulcânicas e secundariamente de arenitos calcários e bioclastos calcários (ANGULO et al., 2013). São praias reflexivas, com inclinações abruptas e predominantemente expostas à ação das ondas (CALLIARI et al., 2016). Permanecem sobre os terraços de abrasão de ondas e suas partes superiores são frequentemente sobrepostas por uma praia de areia (ANGULO et al., 2013; CALLIARI et al., 2016).

A costa norte da ilha possui praias arenosas mais numerosas e extensas, formando uma faixa quase contínua de 4 km de extensão, nos quais são encontradas sete praias entre Cacimba do Padre e Cachorro (CALLIARI et al., 2016). De maneira geral, os sedimentos encontrados nessas praias tendem a ser mais grossos, compostos por areia média moderadamente a bem selecionada (MANSO et al., 2011).

A costa sul tem 14 praias, apenas cinco delas arenosas: Caieira, Atalaia, Baía do Sudeste e Praia do Leão (CALLIARI et al., 2016). Também nessa região, são encontrados recifes de algas calcárias, que estão presentes nas costas expostas ao sul e leste da ilha. Esses recifes formam piscinas na zona entremarés e alguns crescem como uma plataforma sobre o piso entalhado, que emerge apenas na presença de baixos níveis de maré de sizigia (ANGULO et al., 2013).

Com relação ao clima, o AFN está inserido em um contexto oceânico de clima tropical úmido, com uma média de temperatura anual de 26,4°C e uma variação de 25,7°C a 27,1°C (TEIXEIRA et al., 2003). A precipitação anual é de cerca de 1420 mm, com duas estações bem definidas, sendo a mais chuvosa

entre abril e julho e a seca entre setembro a dezembro (RAO et al., 1993). Rao et al. (1993), em uma análise cuidadosa da mudança sazonal dos ventos ao longo da costa, sugeriram que as chuvas de outono e inverno estariam associadas com os ventos de sudeste que sopram perpendicularmente a costa, onde a intensidade e a localização da Alta Subtropical do Atlântico Sul tem um importante efeito sobre as chuvas de ENE (este-nordeste) no Brasil, modulando a força e direção dos ventos ao longo da costa, o que gera uma influência determinante na chuva.

Os ventos predominantes no Atlântico Sul equatorial são os de sudeste, com uma velocidade média de $6,6 \text{ m.s}^{-1}$, com maior intensidade de julho a setembro (11 m.s^{-1}), e ventos provenientes de sudeste e leste durante o verão austral (MANSO et al, 2011).

O AFN possui regime de micro a meso-maré semidiurna com amplitude de maré de sizígia de 2,5 m e de quadratura de 1,3 m (CALLIARI et al., 2016). Com relação ao clima de ondas, é dominado a maior parte do ano por ondas formadas pelos alísios de sudeste. Segundo Manso et al. (2011), durante o verão as ondas podem chegar até 5m na costa nordeste, enquanto no inverno chegam a uma altura de 1,6 m ao longo da costa sudeste.

CAPÍTULO II

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 PRECIPITAÇÃO E QUÍMICA DOS CARBONATOS

Alguns fundamentos sobre sistemas carbonáticos marinhos, assim como sobre precipitação e dissolução de carbonatos, devem ser considerados para compreender a formação de *beachrocks*.

Os oceanos contêm mais de 70 elementos dissolvidos, dos quais nove são considerados elementos maiores (concentrações acima de 10 $\mu\text{mol.kg}^{-1}$): sódio (Na), magnésio (Mg), cálcio (Ca), potássio (K), estrôncio (Sr), cloro (Cl), enxofre (S) (predominantemente como sulfato (SO_4^{2-}), bromo (Br) e carbono (C) (principalmente como bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-})). Estes elementos constituem mais de 90% do total de sais dissolvidos nos oceanos (MILLIMAN, 1974).

A precipitação carbonática a partir da água do mar tem início quando o dióxido de carbono (CO_2) atmosférico é dissolvido nos oceanos a partir da bomba de solubilidade, sendo ela física (causada por turbulências principalmente em águas frias) ou biológica (causada em sua maioria por processos fotossintéticos) (EMERSON; HEDGES, 2008). O CO_2 dissolvido, forma então o ácido carbônico (H_2CO_3), que se dissocia em íons de bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) (reação 1) (GISCHLER, 2007). Essa dissociação é fortemente dependente do pH, onde águas mais ácidas tendem a diminuir a estabilidade dos carbonatos, favorecendo então a dissolução (EMERSON; HEDGES, 2008).



A alcalinidade da água do mar é definida pela concentração de CO_3^{2-} , HCO_3^- e de ácido bórico (HBO_3^{2-}), ou seja, pelo domínio da eficácia das bases

sobre a eficácia dos ácidos, conseqüentemente a alcalinidade dos carbonatos também dependerá da presença de CO_3^{2-} e HCO_3^- . Em condições comuns, o HCO_3^- será o íon carbonático mais abundante na água do mar, com concentrações de cerca de 140 mg.L^{-1} , sendo o cálcio o terceiro cátion mais abundante, onde o sódio e magnésio se encontram em primeira e segunda posição respectivamente (MILLIMAN, 1974).

O cálcio pode reagir com íons bicarbonato para formar carbonato de cálcio (reação 2), como a aragonita (CaCO_3), a calcita altamente magnesiana ou a calcita magnesiana (10 – 20 mol% MgCO_3), que são importantes precipitados marinhos, sendo que a aragonita e calcita magnesiana com 12mol% MgCO_3 são termodinamicamente equivalentes. Nesta reação, a remoção de CO_2 , através da fotossíntese para produção de matéria orgânica por exemplo, induziria a precipitação carbonática.



Da mesma forma, a reação reversa da respiração ou decaimento da matéria orgânica (por simplicidade expressa em CH_2O) resultará na dissolução do carbonato de cálcio (reação 3) (GISCHLER, 2007).



Variações de temperatura, pH e salinidade resultam em aumento ou diminuição da solubilidade dos carbonatos na água. Aumentos na temperatura, pH e salinidade deslocam o equilíbrio da reação, resultando em precipitação do carbonato de cálcio, enquanto o aumento da pressão resultaria no aumento da solubilidade, levando a sua dissolução. Dessa forma, como consequência do gradiente latitudinal de temperatura, a saturação do carbonato de cálcio na água do mar aumenta em direção ao Equador (GISCHLER, 2007; EMERSON; HEDGES, 2008), o que influencia diretamente a distribuição dos *beachrocks*.

Para ambientes de água doce, a quantidade de íons dissolvidos na água é muito mais baixa se comparada com a água do mar, fazendo assim com que a diagênese em ambiente meteórico seja mais lenta que em ambiente marinho,

favorecendo os processos de dissolução devido a subsaturação em carbonatos (GISCHLER, 2007).

3.2 BEACHROCKS

Desde os primeiros trabalhos envolvendo depósitos praias cimentados (e.g. CHAMISSO, 1821 *apud* GISCHLER, 2007), inúmeras são as definições empregadas por diversos autores para definir estas rochas, incluindo a de *beachrocks*. A partir de trabalhos como o de Ginsburg (1953), percebeu-se a necessidade de estudos que incluíssem investigação petrográfica e mineral detalhada dos *beachrocks* para então compreender melhor os seus processos de formação.

Até o presente momento, a formação e os mecanismos de precipitação dos cimentos que formam essas rochas ainda são bastante discutidos, contudo, todas as definições convergem para um ponto em comum e, em geral, as definem como sendo, em seu sentido restrito, uma “rocha sedimentar, friável a bem cimentada, formada em zona litorânea (especialmente em região de intermarés) pela cimentação de sedimentos praias por carbonato de cálcio (calcita magnésiana e/ou aragonita)” (HOPLEY, 1986).

Neste capítulo apresenta-se uma síntese sobre as principais características dos *beachrocks* a partir de informações de diversos estudos realizados ao redor do mundo, juntamente com as suas principais zonas de ocorrência, seus processos de formação e seu significado paleoambiental.

3.2.1 Características gerais

Com respeito às suas formas, os *beachrocks* tendem a apresentar corpos rochosos paralelos a costa e com ângulo de mergulho/inclinação (entre 5 a 15°) em sua estratificação interna semelhante à da linha de costa onde foram formados. Dessa maneira, são comumente encontrados em regiões de dinâmica costeira intensa como afloramentos pequenos e descontínuos, devido à exposição a agentes intempéricos (ventos, ondas e marés), e em recifes de centenas de metros, com cerca de 5 a 20 m de largura e 100 a 200 m de comprimento (GISCHLER, 2007; VOUSDOUKAS et al., 2007; MCLEAN, 2011).

Ao longo do seu perfil vertical, os *beachrocks* apresentam estratos de espessura fina, com poucos decímetros, preservando a estratificação original da praia onde a rocha foi formada e tendendo a ser maior em áreas com maiores flutuações do nível do mar (VOUSDOUKAS et al., 2007).

O tamanho e a natureza dos grãos que compõem o arcabouço dos *beachrocks* são bastante diversificados, variando de cascalhos a areias, de origem clástica ou biogênica, dependendo, portanto, dos sedimentos depositados na praia onde foram formados. Em alguns casos, são descritos materiais considerados “erráticos”, como fragmentos de artefatos humanos e lixo, refletindo essencialmente a composição sedimentar da praia em que foi formada no momento da sua cimentação (VOUSDOUKAS et al., 2007; CABRAL-NETO et al., 2010; CABRAL-NETO et al., 2013; MCLEAN, 2011;).

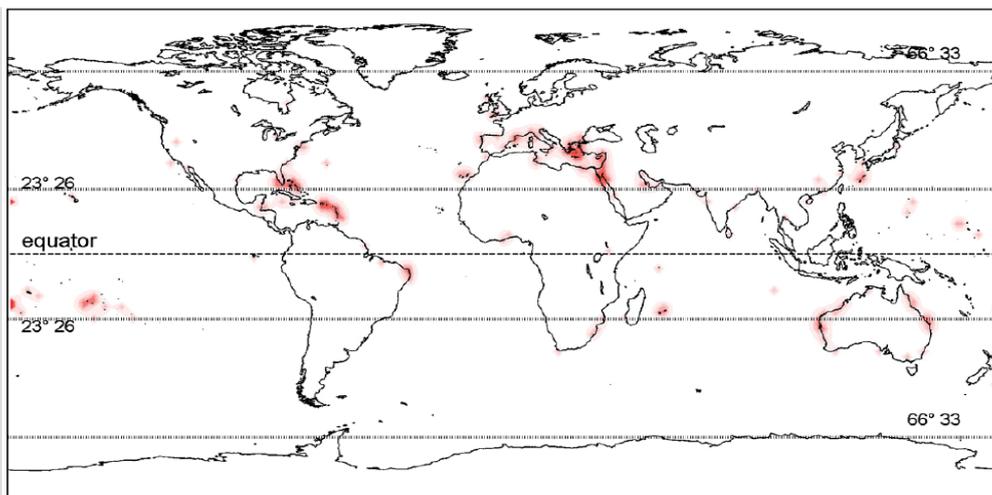
A matriz sedimentar de um *beachrock* também reflete o ambiente em que foi formado e, em menor escala, o ambiente no qual se encontra exposto (VOUSDOUKAS et al., 2007).

O tempo de litificação dos sedimentos praias que dão origem aos *beachrocks* é bastante curto se comparado a outras rochas sedimentares. A litificação completa pode ocorrer em meses até poucas dezenas de anos, e sua formação envolve diferentes processos e ambientes sedimentares (VOUSDOUKAS et al., 2007). A rápida litificação favorece a preservação de grande parte das estruturas sedimentares presentes nos *beachrocks* e, até mesmo, pela preservação dos artefatos e materiais “erráticos”.

3.2.2 Ocorrência

Com relação a sua distribuição, Danjo & Kawasaki (2014) e Vousdoukas et al. (2007), analisando diversos estudos, constataram que as principais regiões de ocorrência dessas rochas são os mares do Caribe e do Mediterrâneo, as costas tropicais a subtropicais do Atlântico, e os atóis dos oceanos Índico e Pacífico, ou seja, associados a locais com águas mais quentes (MAPA 6). No litoral brasileiro estão dispostos, principalmente, entre a costa do Espírito Santo e do Ceará, e tiveram seus primeiros estudos registrados por Darwin (1841 *apud* CABRAL-NETO, 2011).

MAPA 6 - DISTRIBUIÇÃO DE *BEACHROKS* NO MUNDO. AS ÁREAS VERMELHAS CORRESPONDEM AOS LOCAIS COM ESTUDOS REALIZADOS SOBRE O ASSUNTO.



FONTE: VOUSDOKAS et al.(2007).

Apesar da maior parte dos registros estarem localizados nas regiões tropicais e subtropicais, trabalhos mais recentes indicam que a formação de *beachrocks* também é comum em regiões de clima temperado, típico de altas latitudes (KNEALE; VILES, 2000; REY et al., 2004; ARRIETA et al., 2011). Ocorrência de *beachrocks* em regiões polares não foi relatada até os dias atuais.

Estudos também indicam a existência de depósitos de *beachrocks*, em região costa-afora da plataforma continental adjacente ao Rio Grande do Norte (SANTOS et al., 2007; CABRAL-NETO et al., 2010, 2013), em ambiente de supramaré (KELLETTAT, 2006) e em lagos da Nova Zelândia com cimentação de sílica (JONES et al., 1997) embora estes não possam ser considerados *beachrocks stricto sensu*, pois diferem da descrição de “rochas formadas na zona entremarés a partir da precipitação de cimentos carbonáticos”.

É importante ressaltar que a ocorrência de *beachrocks* é mais comum ao longo de costas que apresentam regime de micro maré (variação inferior a 2 m) a mesomaré (amplitude de maré entre 2 e 4 m), sugerindo assim que uma grande variação de maré pode inibir a precipitação e formação dessas rochas. Em relação à latitude, apesar de ocorrerem distribuídos em diversas regiões do globo, os afloramentos de *beachrocks* tendem a se concentrar em regiões tropicais a subtropicais, entre as latitudes de 20° e 40°. Contudo, não se deve descartar a hipótese de que essa concentração pode resultar de que estudos

sobre *beachrocks* foram mais desenvolvidos nestas regiões (VOUSDOUKAS et al., 2007; CABRAL-NETO, 2011).

Nas ilhas oceânicas brasileiras, afloramentos de *beachrocks stricto sensu* só foram descritos para a ilha da Trindade (ILUSTRAÇÃO 1) (ALMEIDA, 1961; ANGULO et al., 2018) e citado sem muita discussão para Fernando de Noronha na praia de Boldró (ILUSTRAÇÃO 2) (CALLIARI et al., 2016), embora em nenhum dos casos tenha sido o foco principal de estudo. Almeida (1961) descreve os afloramentos na face praial das praias das Tartarugas e de Andrada, cerca de 3,5m acima do nível médio do mar, inferindo então que essas rochas foram formadas em um nível do mar mais alto que o atual. Angulo et al. (2018) também descrevem *beachrocks* na face praial das Tartarugas, com laminação plano-paralela constituídas de litoclastos e bioclastos (principalmente fragmentos de algas calcárias) nas frações areia média a grossa, cimentadas por aragonita acicular e em alguns casos por calcita equigranular. Considerando-se que as fácies com laminação encontradas pelos autores correspondem a face praial, foi possível interpretar que tais rochas formam-se entre 0,8 m abaixo e 2,8 m acima do nível do mar.

ILUSTRAÇÃO 1 - EXPOSIÇÃO DE BEACHROKS NA PRAIA DAS TARTARUGAS, ILHA DA TRINDADE.



FONTE: O autor (2018)

ILUSTRAÇÃO 2 - IMAGENS AÉREAS DA PRAIA DE BOLDRÓ EM FERNANDO DE NORONHA, QUE MOSTRAM (A) FACE PRAIAL EM CONDIÇÕES DE INVERNO, QUANDO A PRAIA ESTÁ SOB INFLUÊNCIA DE PEQUENAS ONDAS, E (B) FACE PRAIAL ERODIDA AO FINAL DO INVERNO, ONDE FICA EXPOSTO UM AFLORAMENTO DE *BEACHROCK* DEVIDO A AÇÃO DAS ONDAS.



FONTE: CALLIARI et al. (2016).

Para o arquipélago de Fernando de Noronha, Angulo et al. (2013) descrevem arenitos com características semelhantes às de *beachrocks*, porém não afirmam tratar-se de *beachrocks* em seu sentido restrito.

3.2.3 Diagênese e cimentação

Diagênese é o conjunto de processos físicos, químicos e biológicos pós-deposicionais onde os sedimentos originais e as águas de poros intersticiais em rochas sedimentares reagem até alcançar o equilíbrio textural e geoquímico com o meio ambiente (WORDEN; BURLEY, 2003).

Esses processos ocorrem à medida que o ambiente evolui em termos de temperatura, pressão e química durante o ciclo de deposição, soterramento e elevação da bacia sedimentar. Como tal, a diagênese engloba modificações pós-deposicionais que variam desde intemperismo em ambientes subaéreos,

oxidação na coluna d'água, compactação e litificação de sedimentos até chegar ao metamorfismo de baixa temperatura (WORDEN; BURLEY, 2003).

A necessidade de se estabelecer uma relação dos processos diagenéticos com a profundidade e condições em que estes ocorrem, levaram Choquette & Pray (1970) a proporem a divisão do campo diagenético em três estágios principais, que também foi sumarizado e apresentado posteriormente em diversos trabalhos, como em Flügel (2010), por exemplo. Sendo assim, os estágios descritos foram:

Eogenético: São os processos diagenéticos iniciais, que ocorrem próximos a superfície, entre a deposição dos sedimentos e o soterramento, onde a química das águas intersticiais é controlada principalmente pelo ambiente deposicional. Neste estágio, os sedimentos são instáveis e a sua porosidade é modificada por dissolução, cimentação e dolomitização.

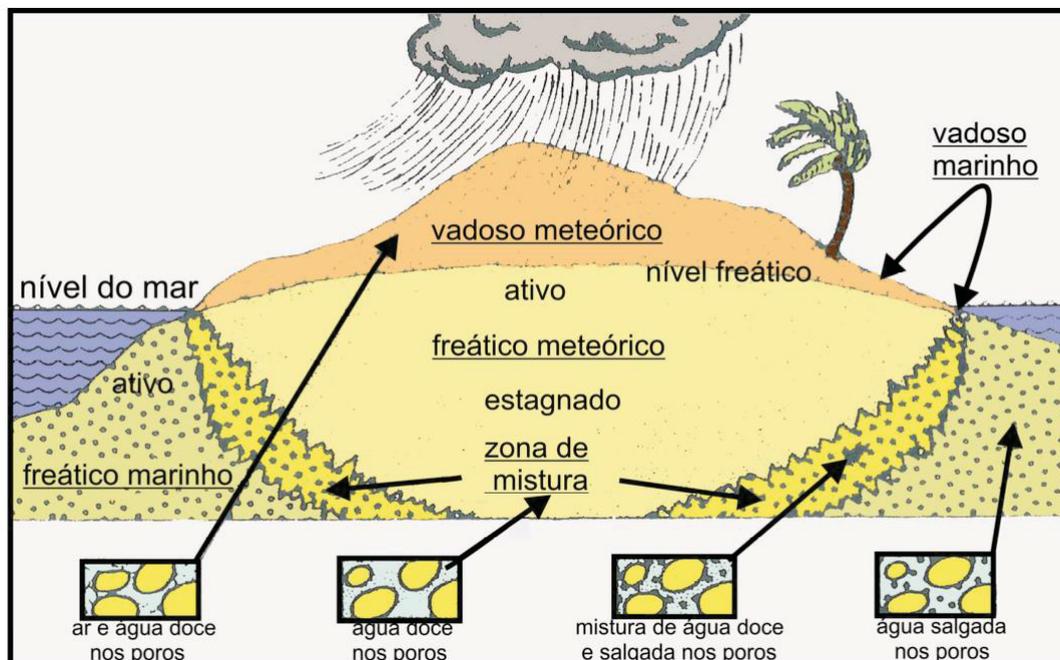
Mesogenético: processos que ocorrem durante o soterramento, longe da influência direta dos processos relacionados à superfície. São caracterizados por modificações lentas de porosidade, sendo algumas vezes intensos devido à compactação ou a processos relacionados. Em outras palavras, a zona mesogenética corresponde ao ambiente diagenético de soterramento profundo.

Telogenético: O termo refere-se ao estágio em que as rochas mineralogicamente estáveis da zona mesogenética são expostas. Essas exposições podem ocorrer devido à elevação tectônica ou a oscilações no nível do mar, sendo posteriormente afetadas por processos meteóricos superficiais.

A formação dos *beachrocks* ocorre durante a eodiagênese, onde os processos diagenéticos superficiais influenciam diretamente a formação da rocha. Em 1980, Longman subdividiu o ambiente eogenético de Choquette & Pray (1970) em quatro meios (freático marinho, vadoso meteórico, freático meteórico e de mistura meteórico/marinho), propondo uma nova abordagem para ambiente marinho raso com o intuito de estudar os efeitos deste ambiente nas rochas carbonáticas. Esses meios foram separados pois cada um apresenta particularidades com respeito à composição química do fluido, resultando na formação de produtos diagenéticos distintos (ILUSTRAÇÃO 3). Cada um desses meios será sintetizado e apresentado a seguir, de acordo com as características apresentadas por Longman (1980).

Freático marinho: Meio onde todos os poros estão preenchidos por água do mar, podendo ser dividido entre ativo e estagnado. O meio ativo apresenta grande circulação da água do mar entre os poros, principalmente na interface água/sedimentos, resultando em intensa cimentação e preenchimento por calcita altamente magnésiana na forma micrítica e por aragonita na forma fibrosa/acicular. Já em meio estagnado, a circulação de água do mar é menor, resultando em formação de produtos diagenéticos incipientes, sendo os principais a micritização do arcabouço e a cimentação intrapartícula (ILUSTRAÇÃO 4A).

ILUSTRAÇÃO 3 - MEIOS DIAGENÉTICOS DESCRITOS POR LONGMAN (1980).



FONTE: SIMIONI (2011)

Vadoso meteórico: Também conhecido como meio vadoso, está situado acima do nível freático, onde tanto o ar quanto a água doce meteórica podem estar no espaço entre os poros. Neste meio, a água tende a ser aprisionada entre os grãos por capilaridade ou abaixo destes como pêndulos. É dividido entre meio de solução e precipitação. O meio de solução é o topo do meio vadoso, mas pode se estender por vários metros dependendo da profundidade do nível freático; seu principal produto diagenético é a dissolução do CaCO_3 causada pelo fluido subsaturado em carbonato de cálcio, formando

vazios (*vugs*) e moldes. Enquanto o meio de precipitação fica mais próximo do freático, logo abaixo do meio de solução, e pode ocorrer precipitação a partir da evaporação ou desgaseificação, onde a água da chuva, anteriormente subsaturada, percola pelo meio de solução se tornando saturada em calcita, formando assim calcita equigranular (*equant*), cimentos pendulares e menisco (ILUSTRAÇÃO 4B).

Freático meteórico: Entre o meio vadoso e o de mistura, é a região em que todo o espaço poroso é preenchido com água meteórica, que apresenta quantidades variáveis de CaCO_3 . Pode ser dividido entre três: de dissolução, saturado ativo e saturado estagnado. O primeiro meio possui processos e produtos semelhantes aos descritos no meio vadoso meteórico, ou seja, é uma região de intensa dissolução gerando porosidade vulgular e/ou móldica, em decorrência da subsaturação da água. O meio saturado ativo é caracterizado pela circulação ativa de água doce saturada entre os poros, podendo ocorrer a cimentação de calcita na forma de lâminas (*bladed*) e equigranular. No meio saturado estagnado, a água supersaturada em CaCO_3 praticamente não percola entre os poros, portanto há pouca cimentação e neomorfismo principalmente de aragonita (ILUSTRAÇÃO 4).

Meio de mistura: Transição entre os meios freático marinho e freático meteórico. Caracterizado pela presença de água salobra, devido a mistura de água doce e marinha (ILUSTRAÇÃO 3). Um dos processos descritos para essa região é a formação de dolomita em condições de salinidade menor, e calcita magnesiana no caso de maior salinidade.

Ambientes como a zona entremarés, onde ar e água salgada preenchem os poros, também são reconhecidos por Longman (1980), porém chamado de meio vadoso marinho. Para o autor, esse meio é caracterizado por rápida desgaseificação do CO_2 , resultando em cimentação por aragonita acicular/fibrosa e calcita magnesiana fibrosa e microcristalina. Alguns cimentos com hábitos pendulares e meniscos também são comuns nesta zona (GISCHLER, 2007).

A partir das relações entre o material precipitado em seus distintos ambientes, como a composição e a forma dos cimentos carbonáticos, é possível interpretar quais os ambientes diagenéticos de formação dos *beachrocks*. Porém, muitas são as teorias para explicar a sua formação. Para isso é

necessária compreensão dos mecanismos de formação dessas rochas. De maneira geral, eles podem ser divididos em duas grandes linhas, a de precipitação físico-química (inorgânica) e a biológica. Segundo Gischler (2007), o mecanismo de formação mais comum citado na literatura é a precipitação direta de cimentos a partir da água do mar ou de água doce, com posterior litificação devido a processos biológicos e precipitação de cimento pela mistura de águas.

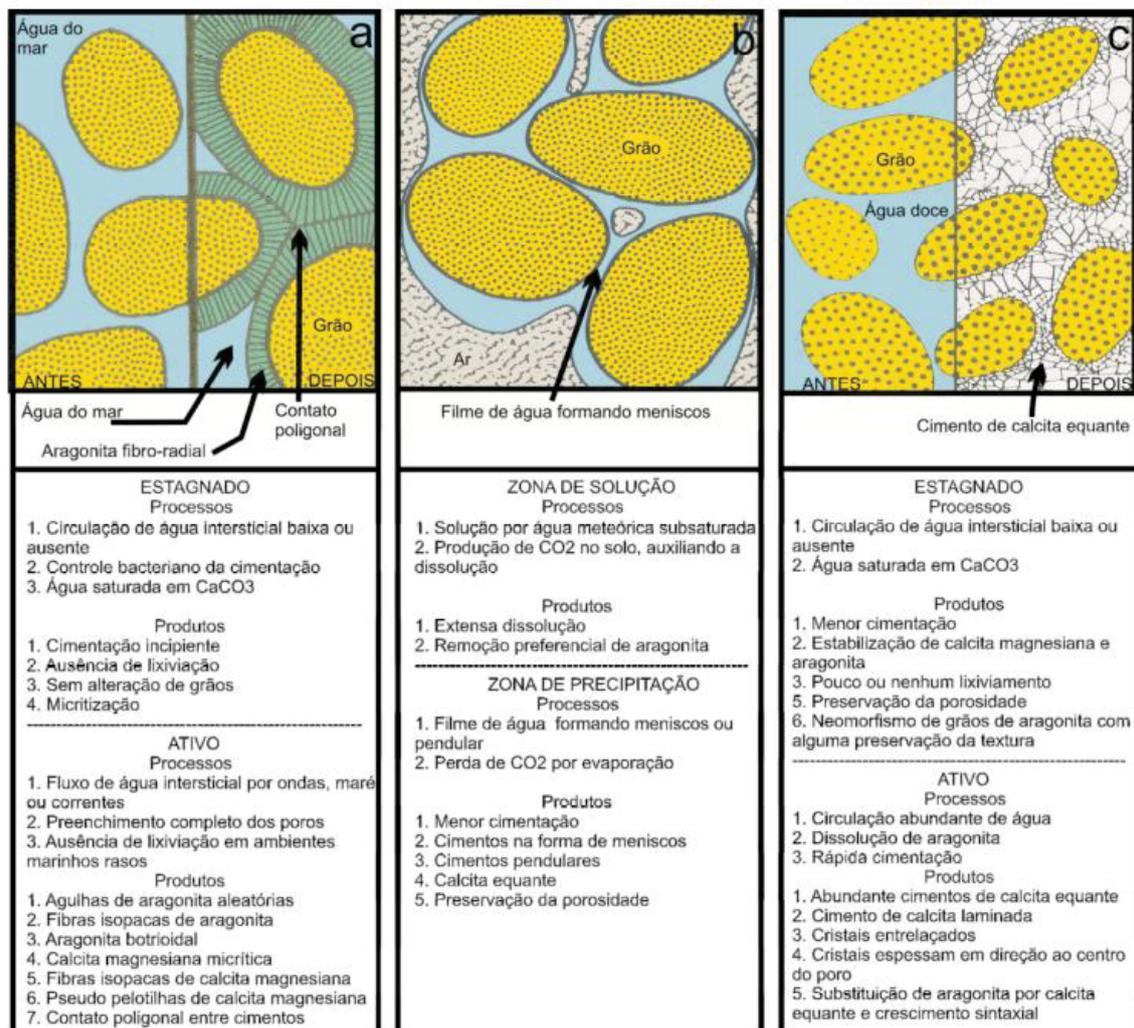
A precipitação direta de cimentos pode ocorrer tanto em água doce quanto salgada, desde que em águas supersaturadas em carbonato de cálcio. No caso de águas meteóricas, a precipitação dependeria não só do nível de saturação, mas também da temperatura da água subterrânea e da geologia regional, influenciando na disponibilidade de íons devido ao intemperismo das rochas ao redor. Emery & Cox (1956) levantam a ideia de que a constituição das rochas seria importante pois em seu estudo no Havaí, os autores notaram que a formação dos *beachrocks* só ocorria nos locais onde a fonte do carbonato era de origem marinha, em regiões entremarés com permanente encharcamento e dessecação da face praial, ou freática nos casos em que a água passava por rochas calcáreas, embora também houvesse rochas vulcânicas na região.

Uma das hipóteses é que para que haja precipitação direta de cimento carbonático, os sedimentos deveriam ser ricos em carbonatos, podendo providenciar as condições necessárias para que o processo de cimentação se inicie. Esse processo seria favorecido pelo aumento da temperatura, levando a uma diminuição da solubilidade dos carbonatos, pela desgaseificação do CO₂ e pela evaporação da água nos interstícios (GISCHLER, 2007). Segundo Vadouskas et al. (2007), a precipitação direta ainda é um dos modelos mais aceitos na literatura, com a maior parte dos relatos descrevendo a precipitação de aragonita e/ou calcita magnesiana de origem marinha.

Alguns autores (e.g. CHAVES; SIAL, 1998) indicam que a precipitação de carbonatos em *beachrocks* também ocorre a partir da mistura entre águas. Como a solubilidade do CaCO₃ decresce com a salinidade, a mistura da água marinha com a água doce poderia resultar na saturação e consequente precipitação de carbonatos (MILLIMAN, 1974). Cimentos de origem marinha e meteórica podem coexistir no mesmo local, indicando precipitação a partir da mistura de águas marinhas e meteóricas (VOUDOUSKAS et al., 2007). Segundo

Chaves & Sial (1998), o encontro entre o limite freático e o nível do mar perto da superfície, resultou na precipitação de cimento, devido ao fluxo de água rica em CaCO_3 durante a maré baixa e à inclinação entre o terraço de maré e o limite inferior da praia. Já Hanor (1978), afirma em seu estudo, comparando a cimentação a partir da precipitação por desgaseificação e por mistura de águas, que a mistura entre água salina e água doce teria pouca influência na precipitação direta. Para o autor a migração vertical do fluido na zona freática, ocasionada pela oscilação da maré, seria o suficiente para induzir a desgaseificação do CO_2 das águas subterrâneas que fluem em direção aos oceanos.

ILUSTRAÇÃO 4 - PRINCIPAIS MEIOS DIAGENÉTICOS PROPOSTOS POR LONGMAN (1980) E SEUS RESPECTIVOS PROCESSOS E PRODUTOS. (A) MEIO FREÁTICO MARINHO, (B) MEIO VADOSO METEÓRICO E (C) MEIO FREÁTICO METEÓRICO.



FONTE: SIMIONI (2011).

A influência biológica na precipitação de cimentos carbonáticos nos *beachrocks* é outra hipótese a se considerar. Os processos biológicos mais frequentemente citados são: a fotossíntese de algas e bactérias, a degradação microbiana de matéria orgânica, a ação de ligação de algas incrustantes e a calcificação bacteriana. Segundo Voudoukas et al. (2007) o consumo de CO₂ através de processos biológicos seria responsável pelo controle da pressão parcial do CO₂ e consequente precipitação de CaCO₃. Para Webb et al. (1999) a formação de *beachrocks* não seria controlada apenas por fatores físico-químicos relacionados a cristalização e precipitação dos cimentos, mas a condições que influenciem determinado tipo de cianobactéria, que produziria então a matéria orgânica necessária para induzir a nucleação do CaCO₃. Os autores afirmam isso após analisar cimentos micríticos associados a material orgânico, agrupamentos e filamentos bacterianos encontrados nos arenitos de praia das Ilhas Heron. Neumeier (1999) realizou diversos estudos de formação simuladas em laboratório que indicaram que, apesar de os mecanismos e parâmetros abióticos terem um papel significativo na precipitação carbonática, a atividade microbiana é responsável pelo controle principal e início da precipitação. O autor também sugeriu que partículas micríticas suspensas na água intersticial podem ser aprisionadas no muco orgânico e posteriormente cimentadas por processos bióticos ou abióticos e que a precipitação micrítica pode ser promovida por substratos orgânicos e metabolismo microbiano.

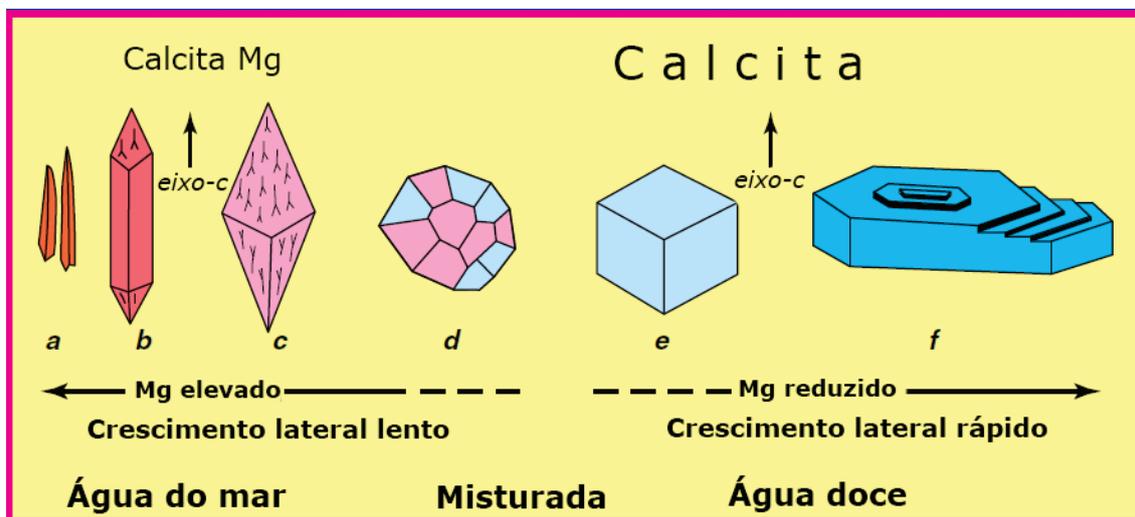
Voudouskas et al. (2007) concluíram que a cimentação dos *beachrocks* é um processo complexo e de difícil interpretação, ainda existindo incertezas sobre as condições ideais e necessárias para que haja a precipitação dos cimentos carbonáticos.

Assim como nos ambientes e nas formas de precipitação, podemos resumir, de maneira geral, a origem dos agentes cimentantes. Os cimentos provenientes da água marinha pura podem ser calcita rica em Mg ou aragonita, enquanto os agentes cimentantes originados a partir de água doce são dominados por calcita pobre em Mg. Experimentos como o de Neumeier (1999) demonstraram que a precipitação do cimento de aragonita é favorecida em condições de águas mais quentes enquanto que cimento de calcita rica em Mg ocorre preferencialmente em condições mais frias. Além disso os cimentos são

controlados principalmente pela taxa de cristalização, pela razão Mg/Ca e pelas taxas de Na presentes no fluido a partir do qual precipitam (FOLK,1974). O magnésio impede o crescimento lateral da calcita, assim, em ambientes ricos em magnésio, como ambientes marinhos rasos, o cimento CaCO_3 precipita preferencialmente como aragonita acicular e fibrosa, e calcita altamente magnesiânica fibrosa, microcristalina ou rômbrica a romboédrica (ILUSTRAÇÃO 5), enquanto em ambientes meteóricos o cimento CaCO_3 precipita na forma de calcita espática e calcita pouco magnesiânica euédrica, devido aos baixos teores de Mg (FOLK, 1974). Segundo Milliman (1974), a ocorrência preferencial entre o tipo calcítico ou o aragonítico dependerá exclusivamente dos parâmetros físico-químicos (temperatura, salinidade, pH e abundância de Mg) do ambiente diagenético.

Sendo assim, Voudoukas et al. (2007) afirmaram que o tipo de agente cimentante pode ser usado para estudos de ambientes de sedimentação de carbonatos costeiros, uma vez que calcita pobre em Mg normalmente se precipita a partir de água doce enquanto que aragonita a partir de água marinha.

ILUSTRAÇÃO 5 - HÁBITO DE CRESCIMENTO DA CALCITA EM FUNÇÃO DA RAZÃO Mg/Ca. NOTE QUE MENORES CONCENTRAÇÕES DE Mg FAVORECEM MAIOR CRESCIMENTO LATERAL DA CALCITA.



FONTE: Traduzido de MOORE & WADE (2013).

3.2.4 Significado paleoambiental

Vousdoukas et al. (2007) analisaram inúmeros estudos sobre diversos locais do globo a respeito especificamente de *beachrocks*. Dentre os trabalhos por eles analisados estão estudos sobre gênese e aplicabilidade dessas rochas. Segundo Hopley (1986), o uso de *beachrocks* como indicadores do nível do mar tem um grande significado paleoambiental. Para Evelpidou & Pirazzoli (2015), eles são indicadores geomorfológicos deposicionais de paleonível marinho e devido ao fato de serem formados principalmente na região entremarés, têm sido amplamente utilizados em conjunto com outros indicadores de nível do mar para identificar oscilações, refletindo a manutenção da linha de costa durante um determinado período de tempo (e.g.: KINDLER; BAIN, 1993; FERREIRA JÚNIOR et al., 2011; KELLY et al., 2014; MAUZ et al., 2015, entre outros).

Outros indicadores usados em associação com os *beachrocks* são os biomarcadores presentes (e em outros depósitos costeiros) para reconstruírem as curvas de variações do nível do mar, principalmente para o Holoceno (ÂNGULO; SOUZA, 2014).

Apesar do seu significado como indicador de paleonível marinho, é necessário o uso cuidadoso dessas rochas nas discussões sobre paleoambiente, pois podem ser confundidos com outros sedimentos cimentados próximos a regiões costeiras, que não têm formação restrita à zona entremarés (HOPLEY, 1986; KELLETAT, 2006).

Segundo Hopley (1986), a utilização destas rochas como indicadores de nível do mar pretéritos possui maior confiabilidade se estiverem em região de pequena variação de marés, em depósitos grossos onde a migração ascendente da água do aquífero freático por capilaridade é limitada ou onde o aquífero freático é inexistente ou insignificante, como regiões áridas e pequenas ilhas. Alguns cuidados são citados pelo autor para a utilização deste material: (a) verificar se o material cimentado se trata de arenito de praia verdadeiro; (b) analisar cuidadosamente os cimentos, pois os aragoníticos são melhores indicativos de paleoníveis marinhos; (c) o nível mais alto de cimentação deve ser horizontal, sem inclinação ou possível relação com um lençol freático regional, pois um nível de cimentação friável é duvidoso; (d) verificar se há estruturas de praia no afloramento; (e) datar extensivamente tanto constituintes biogênicos,

como cimentos. Quanto maior a diferença entre as datas destes dois constituintes, menor a confiabilidade.

3.2.5 Impactos na dinâmica costeira

A presença de *beachrocks* em ambientes costeiros afeta largamente a dinâmica atuante após a sua formação. Embora o estudo dessas rochas seja fundamentalmente importante para entender grande parte dos produtos gerados pelos processos modeladores da costa, pouca atenção tem sido dada a esse enfoque (CABRAL-NETO, 2011).

Segundo Voudoukas et al. (2007), em sua revisão, existem cinco impactos diretos que a presença dos *beachrocks* exercem sobre o ambiente costeiro. As rochas mitigam a erosão de praia, estabilizam o perfil praiial; alteram os processos hidrodinâmicos próximos à costa; mudam o suprimento sedimentar e causam mudanças no caráter poroso do assoalho oceânico.

Para Cooper (1991), o maior impacto causado pelo processo de formação dessas rochas é provocar a diminuição no suprimento sedimentar de uma praia. Essa redução ocorreria devido ao aprisionamento dos sedimentos que estavam expostos à dinâmica costeira pela cimentação. A partir de então, tais sedimentos serão reintroduzidos ao ciclo sedimentar somente após ação de agentes intempéricos. No entanto, o processo erosivo ocorre a taxas bastante inferiores se comparado ao processo de formação de *beachrocks* e essa diferença seria suficiente para provocar um déficit de sedimentos (COOPER, 1991).

Porém, os impactos causados pelos *beachrocks* nem sempre são negativos. Devido a sua ação como uma barreira natural resistente a ação das ondas, atenuando os efeitos causados sobre a zona costeira, autores como Danjo & Kawasaki (2013) têm estudado os mecanismos de formação dos *beachrocks* como uma ferramenta para a fabricação de rochas artificiais com o intuito de reduzir a energia das ondas em direção à costa e dessa maneira conter processos erosivos na região.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa integra um projeto maior intitulado *Paleoníveis marinhos, paleoclima, paleogeografia e riscos ambientais nas ilhas oceânicas brasileiras* (CNPq 457714/2013-1).

Durante a execução deste estudo, foi feita inicialmente uma revisão bibliográfica, com a compilação de publicações sobre *beachrocks* e seus registros em contexto global, atividade permanente durante a pesquisa, além de estudos sobre ambientes e produtos diagenéticos. Após tal revisão, foi realizada a descrição petrográfica de 24 seções delgadas de rochas, com microscópio óptico de luz polarizada transmitida, para identificar e caracterizar petrofácies e suas relações, mediante componentes essenciais (arcabouço, matriz, cimento, porosidades primária e secundária), além dos tipos e fases de cimentação.

As lâminas foram preparadas a partir de amostras de afloramentos de arenitos cimentados, nas praias de Chapéu Nordeste, Ponta de Santo Antônio, Caieira, Ilha Rasa e Praia do Leão em Fernando de Noronha, e nas praias das Tartarugas, Cabrita, Parcel, Andrada e Praia Vermelha na Ilha da Trindade (QUADRO 1). As amostras foram impregnadas com resina epóxi com corante azul, com o intuito de evidenciar e possibilitar a quantificação de poros da rocha.

Foram realizados colorações com a solução de Feigl's (FRIEDMAN, 1971), no Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar da Universidade Federal do Paraná (LabESed – UFPR). A coloração foi realizada com o intuito de identificar com mais precisão os cimentos de aragonita e calcita, onde posteriormente foram descritas em microscópio óptico de luz polarizada.

A descrição e quantificação das características texturais e estruturais da rocha, como granulação, grau de seleção, grau de arredondamento, esfericidade e contatos entre grãos, além das porcentagens entre arcabouço, matriz e cimento, foram feitos com o auxílio de tabelas de comparação e livros de referência. Os hábitos dos cimentos foram descritos a partir da nomenclatura de Flügel (2010) e Folk (1974).

QUADRO 1: LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS.

AMOSTRA	ORIGEM	LOCAL DE AMOSTRAGEM
FN01	FERNANDO DE NORONHA	Chapéu de Nordeste
FN02	FERNANDO DE NORONHA	Chapéu de Nordeste
FN03	FERNANDO DE NORONHA	Ponta de Santo Antônio
FN04	FERNANDO DE NORONHA	Ponta de Santo Antônio
FN05	FERNANDO DE NORONHA	Enseada da Caieira
FN06	FERNANDO DE NORONHA	Enseada da Caieira
FN07	FERNANDO DE NORONHA	Chapéu de Nordeste
FN08	FERNANDO DE NORONHA	Ilha Rasa
FN09	FERNANDO DE NORONHA	Enseada da Caieira
FN10	FERNANDO DE NORONHA	Praia do Leão
TR01	TRINDADE	Praia do Parcel
TR02	TRINDADE	Praia do Parcel
TR03	TRINDADE	Praia das Tartarugas
TR04	TRINDADE	Praia dos Cabritos
TR05	TRINDADE	Praia dos Cabritos
TR06	TRINDADE	Praia do Parcel
TR07	TRINDADE	Praia do Parcel
TR08	TRINDADE	Praia das Tartarugas
TR09	TRINDADE	Praia Vermelha
TR10	TRINDADE	Praia das Tartarugas
TR11	TRINDADE	Praia das Tartarugas
TR12	TRINDADE	Praia do Parcel
TR13	TRINDADE	Praia das Tartarugas
TR14	TRINDADE	Praia do Andrada

FONTE: O autor (2018)

Após caracterização inicial das amostras por microscopia óptica de luz polarizada, foram separados fragmentos com aproximadamente 1 cm³ para análises em microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o intuito de observar aspectos tridimensionais das amostras e sanar dúvidas sobre microtexturas, composição e hábito de revestimentos de poros por cimentos, auxiliando na identificação dos processos e constituintes diagenéticos envolvidos na gênese dos *beachrocks*. Foram analisadas apenas as fraturas frescas destes fragmentos, para evitar interferências de artefatos. As mesmas foram metalizadas com ouro (material transmissivo) para aumentar a condutividade e evitar o acúmulo de cargas superficiais quando analisadas. Nas análises, utilizou-se o MEV TESCAN VEGA3 LMU, com resolução de 3 nm e que permite magnificações de até 300Kx, do Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná (CME - UFPR). Foram utilizadas as funções de estereoscopia de elétrons secundário e espectrometria de energia dispersiva de

raio-x (EDS) com detector SDD de 80 mm², com resultados processados pelo programa Mex da Alicona e com o software AZ Tech (Advanced) respectivamente.

A análise com MEV é realizada com uso de feixe de elétrons de alta energia produzido a partir de um canhão de elétrons, que incide sobre a superfície exposta da amostra. Ali ocorre excitação dos átomos do material analisado pelos elétrons incidentes, gerando imagens obtidas a partir da reflexão dos elétrons.

A espectrometria por dispersão de energia (EDS) corresponde a resposta em raios-x característica de cada elemento químico à emissão do feixe de elétrons. O feixe arranca elétrons das camadas menos energéticas do átomo, sendo substituído pela migração de um elétron mais energético. Durante essa migração há liberação de energia, emitida como fótons que apresentam comprimentos de onda característicos para cada elemento químico, possibilitando dessa maneira a identificação do elemento no espectro obtido pela análise.

CAPÍTULO III

5 RESULTADOS

GÊNESE DE *BEACHROCKS* E RECIFES DA ILHA OCEÂNICA DA TRINDADE

Santos, Erika K. P.; Fernandes, Luiz A.; Angulo, Rodolfo J.; Souza, Maria C.

RESUMO

Beachrocks são rochas sedimentares, formadas restritamente em região de intermarés a partir da precipitação de cimentos de calcita magnesiana e/ou aragonita. Devido à sua ocorrência/gênese em faces praias, as exposições de *beachrocks* são utilizadas em estudos sobre evolução e problemas de erosão costeira, variação no nível do mar e proveniência de carbonatos. As ocorrências destas rochas nas ilhas oceânicas brasileiras ainda não haviam sido estudadas sistematicamente. A ilha da Trindade (20°30'S e 29°20'W) emerge como partes da cadeia vulcânica Vitória – Trindade, orientada em direção leste-oeste. Relatam-se aqui resultados do estudo sobre a gênese e evolução diagenética de *beachrocks* da ilha da Trindade formados durante o Quaternário. Foram analisadas 14 seções delgadas por petrografia microscópica óptica de luz polarizada transmitida e por microscopia eletrônica de varredura. Entre as amostras analisadas apenas as provenientes das praias das Tartarugas, do Parcel, do Andrada e Vermelha da ilha da Trindade foram consideradas *beachrocks* em seu sentido restrito. As rochas apresentaram laminação plano-paralela e inclinação de ~13°. Foram consideradas como rochas formadas por cimentação de sedimentos da face praial pelo espraiamento e recuo das ondas. Nos *beachrocks* estudados identificaram-se as seguintes fases diagenéticas: 1) precipitação de aragonita microcristalina, acicular e fibrosa, 2) geração de clorita autigênica e presença de biofilme. O cimento predominantemente aragonítico dos *beachrocks* precipitaram-se em zona freática marinha ativa, onde a água marinha tem influência direta na cimentação devido ao espraiamento e recuo das ondas. A ocorrência de biofilme associados aos cimentos de aragonita e clorita sugere que a formação dessas rochas ocorreu como produto de processos físico-químicos, como desgaseificação do CO₂, assim como por atividade microbiológica. Não foi possível observar correlação direta entre a gênese dos *beachrocks* e das bioconstruções. Nas ilhas oceânicas os recifes agem como barreira hidrodinâmica e como fonte de sedimentos carbonáticos para os arenitos na face praial.

Palavras-chave: diagênese; arenito de praia; petrografia

5.1 INTRODUÇÃO

Beachrocks são rochas sedimentares resultantes da litificação de sedimentos praias a partir da precipitação de carbonato de cálcio em zona intermaré (Hopley, 1986). Sua ocorrência está, em sua maioria, limitada a regiões costeiras tropicais, entre 35° N e 35° S de latitude (Vousdoukas *et al.*, 2007). A importância dessas rochas está associada principalmente a estudos de

impacto e evolução da linha de costa (Cooper, 1991), ao seu papel como indicador de nível do mar (Hopley, 1986) e a estudos dos processos de cimentação por carbonatos em águas rasas (Longman, 1980).

A ocorrência dos *beachrocks* é bastante comum no cenário costeiro brasileiro, onde o primeiro estudo registrado foi feito por Darwin em 1841 (Cabral Neto, 2011). Sua maior concentração está na região costeira continental no nordeste (e.g. Vieira *et al.*, 2017; Guimarães *et al.*, 2016 e Cabral Neto *et al.*, 2010) e na região sudeste (e.g. da Silva *et al.*, 2014 e Castro *et al.*, 2014) do país. Nas ilhas oceânicas brasileiras, afloramentos de *beachrocks stricto sensu* só foram observados e descritos brevemente para a ilha da Trindade (IT) (e.g. Almeida, 1961; Angulo *et al.*, 2018) e para Fernando de Noronha (Calliari *et al.*, 2016), embora em nenhum dos casos tenha sido o motivo principal de estudo.

Apesar dos diversos estudos realizados ao redor do mundo (Danjo & Kawasaki, 2014; Arrieta *et al.*, 2011; Vousdoukas *et al.*, 2007), os processos responsáveis pela formação dos *beachrocks* por cimentação carbonática ainda são controversos, podendo ser tanto de natureza físico-química quanto biológica (bioinduzida). Dentre as hipóteses mais comuns encontradas na literatura estão a mistura de águas marinha e meteórica (Moore, 1973), desgaseificação do CO₂ (Gischler, 2007), evaporação (Hanor, 1978) e por atividade biológica direta ou indireta (McCutcheon *et al.*, 2016; Webb *et al.*, 1999).

Entre os organismos capazes de auxiliar na precipitação de carbonatos e, portanto, no processo de cimentação, estão bactérias, cianobactérias e algas (Krumbein, 1979). McCutcheon *et al.* (2016) ressaltam que os *beachrocks* são *habitats* favoráveis para o desenvolvimento de microorganismos endolíticos na zona intermaré, podendo haver associação dessas rochas com recifes (e.g. Kumar *et al.*, 2012).

Segundo Gischler (2007), o mecanismo de formação mais aceito na literatura seria uma combinação entre precipitação físico-química direta, com influência de processos biológicos.

A seguir apresentam-se resultados de estudos realizados, com ênfase em petrologia microscopia óptica e eletrônica de varredura, sobre a gênese de *beachrocks* da ilha oceânica da Trindade, formados durante o intervalo Pleistoceno Superior ao Holoceno.

5.2 ÁREA DE ESTUDO

As ilhas oceânicas são ambientes isolados do continente com pequenas áreas emersas. Fernando de Noronha e Trindade têm origem relacionada a evolução da cadeia meso-oceânica do Atlântico, emergindo como parte de cadeias vulcânicas orientadas em direção leste-oeste (Almeida, 2006; 1955).

Devido a sua origem vulcânica, as rochas encontradas em Trindade são extremamente ricas em sódio e insaturadas em silício, com abundantes domos e *plugs* fonolíticos e diferentes tipos de basalto. Constituem a província mais alcalina entre as ilhas vulcânicas oceânicas do mundo (Klugel, 2009).

A IT situa-se no oceano Atlântico Sul (20°30'S e 29°20'W), no paralelo de Vitória, estado do Espírito Santo, afastada a 1.170 km da costa. Possui 9,28 km² em área e 67 km de diâmetro (Calliari *et al.*, 2016).

Almeida (1961) caracterizou as unidades litoestratigráficas aflorantes na ilha, que posteriormente foram revisadas e modificadas por Pires & Bongioiolo (2016), identificando cinco grandes eventos de vulcanismo (Figura 1). As rochas mais antigas da ilha pertencem ao Complexo de Trindade, constituído por rochas fonolíticas intrusivas e piroclásticas. A Formação Desejado corresponde a uma intercalação de depósitos efusivos e piroclásticos. A Formação Morro Vermelho é uma sucessão nefelinítica que sobrepõe à Formação Desejado, constituída por depósitos efusivos e piroclásticos do conduto vulcânico em Morro Vermelho. A Formação Valado caracteriza-se por depósitos aluviais do Córrego do Valado, e intercala piroclastos e depósitos efusivos em porções iguais. O Vulcão do Paredão é caracterizado por um cone vulcânico parcialmente erodido pela ação das ondas, localizado na porção oriental da ilha e composto por uma sucessão nefelinítica de depósitos piroclásticos intercalados com pequenos depósitos efusivos.

Os Depósitos Holocênicos correspondem à uma pequena parcela das unidades estratigráficas ocorrentes na ilha. Almeida (1961) descreveu oito unidades sedimentares quaternárias, sendo elas: depósitos continentais de talude e leques aluviais, depósitos costeiros de areia e cascalhos em praias atuais e paleo-praias, bioconstruções e depósitos eólicos (Figura 1).

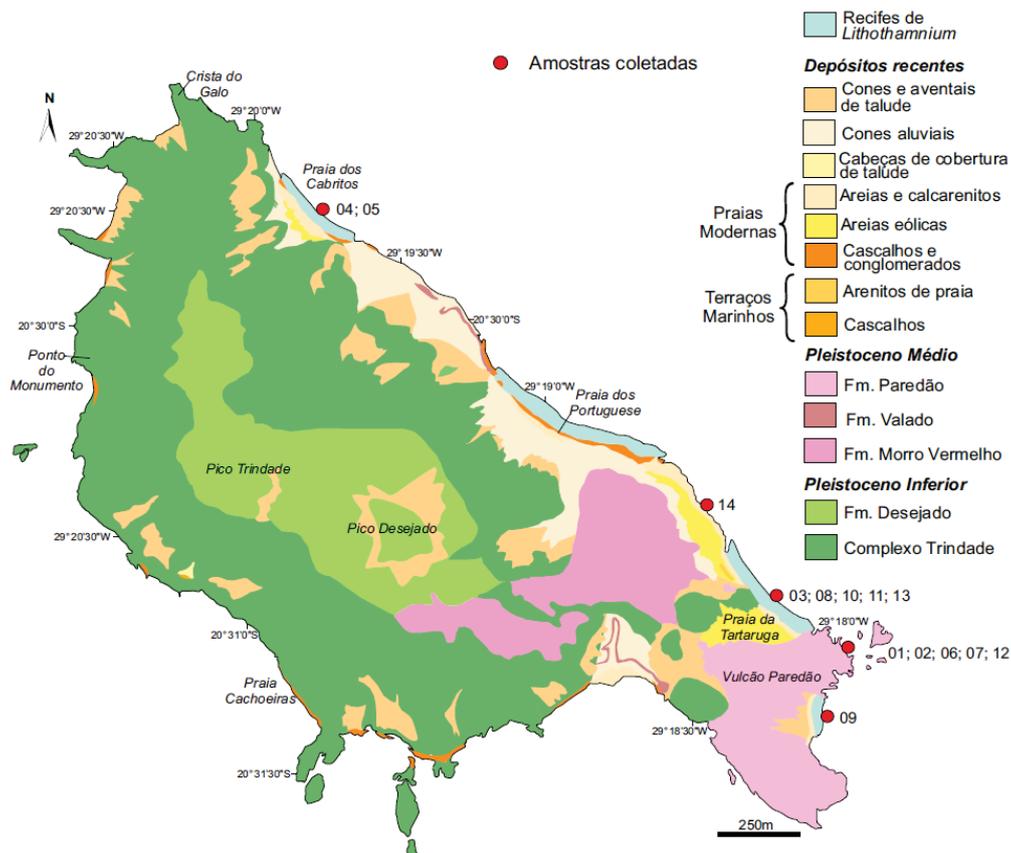


Figura 1 - Mapa geológico da Ilha da Trindade com as unidades litoestratigráficas aflorantes, depósitos quaternários, com locais do presente estudo e amostragem. Modificado de Pires & Bongioiolo (2016) e Almeida (1961).

Com comprimento total da linha de costa de 21,7 km, dos quais 16,7 km (76,7%) são de encostas rochosas e 5,1 km (24%) são constituídos de 16 praias de areia e cascalho (Calliari *et al.*, 2016). Dentre essas praias, as seis com maior quantidade de sedimentos situam-se a nordeste e sudeste da ilha: Cabritas, Calheta, Andrada, Tartarugas, Vermelha/Túnel e Príncipe (Calliari *et al.*, 2016).

De modo geral, os sedimentos das praias na IT refletem a composição mineral das rochas adjacentes, onde o processo deposicional é resultado do transporte sedimentar de curta distância entre a rocha fonte e a praia (Castro & Antonello, 2006). Os recifes na zona de surfe também funcionam como fontes de material particulado que compõem os sedimentos praias, e proteção aos mesmos, pois também influenciam na energia e circulação hidrodinâmica (Calliari *et al.*, 2016).

A IT está inserida em um regime de micromaré semidiurna, com uma amplitude de 1,3 m. Com relação às ondas, as mesmas chegam a ilha com altura

média de 2,14 m, com períodos de 11,07 s. Ondas maiores, com altura entre 4 e 6 m são menos frequentes e chegam principalmente a partir do sul, sendo geralmente formadas por ciclones extratropicais gerados no sudoeste do Atlântico (Calliari *et al.*, 2016).

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa analisou arenitos e recifes expostos em maré baixa, amostrados em diferentes praias das ilhas da Trindade (Figura 13), como parte de projeto mais abrangente, de identificação de *beachrocks* das ilhas oceânicas e discussão de sua gênese. Os locais de descrição de campo e amostragem adotados na pesquisa estão descritos em Angulo *et al.* (2018). Foram confeccionadas 14 seções delgadas, impregnadas com resina epóxi tingida com corante azul e analisadas com microscópio óptico de luz polarizada transmitida (Leica DMLP), com intuito de descrever características texturais e composicionais do arcabouço, matriz, porosidade e cimentos, para caracterização petrográfica e discussão de processos diagenéticos.

O método de coloração de Feigl descrito em Friedman (1971) foi usado para determinar a composição mineral de cimentos e partículas de aragonita e calcita.

Fragmentos de aproximadamente 1 cm³, retirados de fraturas frescas, foram metalizados com ouro para análise com microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN VEGA3 LMU, com resolução de 3 nm e ampliações de até 300Kx, para observação de microtexturas, hábitos minerais, de revestimento de poros por cimentos, relações entre componentes e porosidade das amostras. Nas seções de análise com MEV foram utilizadas as funções de emissão de elétrons secundários e espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) com detector SDD de 80 mm², com resultados processados pelo programa Mex da Alicona e com o software AZ Tech (Advanced).

5.4 CARACTERÍSTICAS DE CAMPO

As lajes de *beachrocks* na IT ocorrem principalmente a nordeste e sudeste da ilha. As praias arenosas de Cabritos, Andrada, Tartarugas e Vermelha

apresentam uma face praial de inclinação acentuada (7° - 13°). Os *beachrocks* ocorrem entre 0,8 m abaixo e 2,8 m acima do nível do mar (Figura 2). Consistem de arenito conglomerático com componentes siliciclásticos e bioclásticos, cimento carbonático e laminação plano-paralela com mergulho de $\sim 13^{\circ}$ para leste. Os bioclásticos encontrados são principalmente fragmentos de recifes de algas calcárias. As laminações plano-paralelas sub-horizontais foram interpretadas como correspondendo a formas planares geradas pelo espriamento e recuo das ondas na face praial.

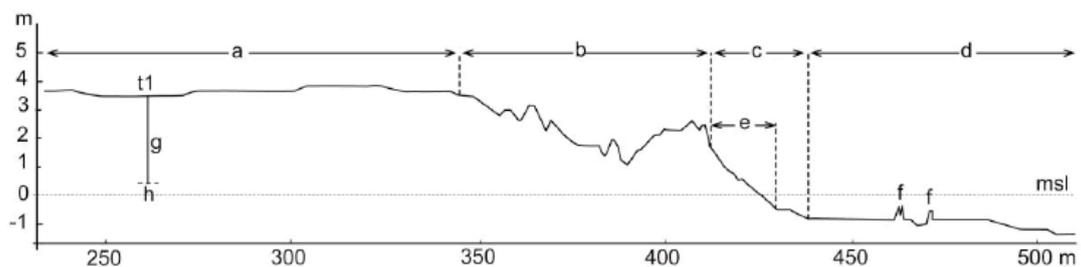


Figura 2 - 1 Perfil topográfico da praia de Tartarugas evidenciando a proximidade entre os arenitos de praia e os recifes. Onde (a) Planície eólica, (b) costas, (c) face praial, (d) recife de algas, (e) afloramento de praias, (f) paleo-recifes, (g) fácies de areia de paleo-praia (h) paleo-recife de algas e (t) trincheira. (msl) Média do nível do mar (Angulo *et al.*, 2018).

Os recifes ocorrem nas praias de Cabritos (Figura 3A), Portugueses, Andrada, Vermelha e Tartarugas (Figura 3B). São encontrados abaixo do nível de maré baixa da sizígia e têm superfícies com inclinação suave ($\sim 1^{\circ}$) em direção ao mar. Formados principalmente por tubos de vermetídeos.



Figura 3 - Recifes de vermetídeos localizados nas praias de Cabritos (a) e Tartarugas (b) (Angulo *et al.*, 2018).

5.5 RESULTADOS

5.5.1 Características gerais

Os *beachrocks* da IT, localizados nas praias das Tartarugas (TR03, TR08 e TR13), do Parcel (TR01, TR02, TR06, TR07, TR12), do Andrada (TR14) e na praia Vermelha (TR09) são arenitos constituídos por areia média a grossa, com contatos pontuais entre grãos e cimento carbonático aragonítico. Em média, apresentam 60 a 70% arcabouço, 30 a 40% de cimento e 5 a 10% de poros. O arcabouço é composto principalmente por fragmentos líticos de rochas vulcânicas, fragmentos de *beachrocks*, minerais pesados como zircão e rutilo e grãos monominerálicos. Os bioclastos são, predominantemente, fragmentos de: algas vermelhas (Figura 4F), equinodermos (Figura 4C), gastrópodes, esponjas, bivalves, foraminíferos (Figura 4A) e cocolitoforídeos. Os espaços intergranulares são revestidos com cimento aragonítico.

Os recifes da IT, localizados nas praias dos Cabritos (TR04 e TR05) e das Tartarugas (TR10 e TR11), são compostos, em média, por 50 a 60% de algas calcárias e tubos de vermitídeos; 20 a 30% de matriz micrítica com bioclastos (Figura 4D) de foraminíferos, equinodermos, ostracodes e espículas de esponjas; cerca de 5% de cimento de calcita e 15 a 20% de poros. Nesta unidade os grãos terrígenos são encontrados em quantidades traço.

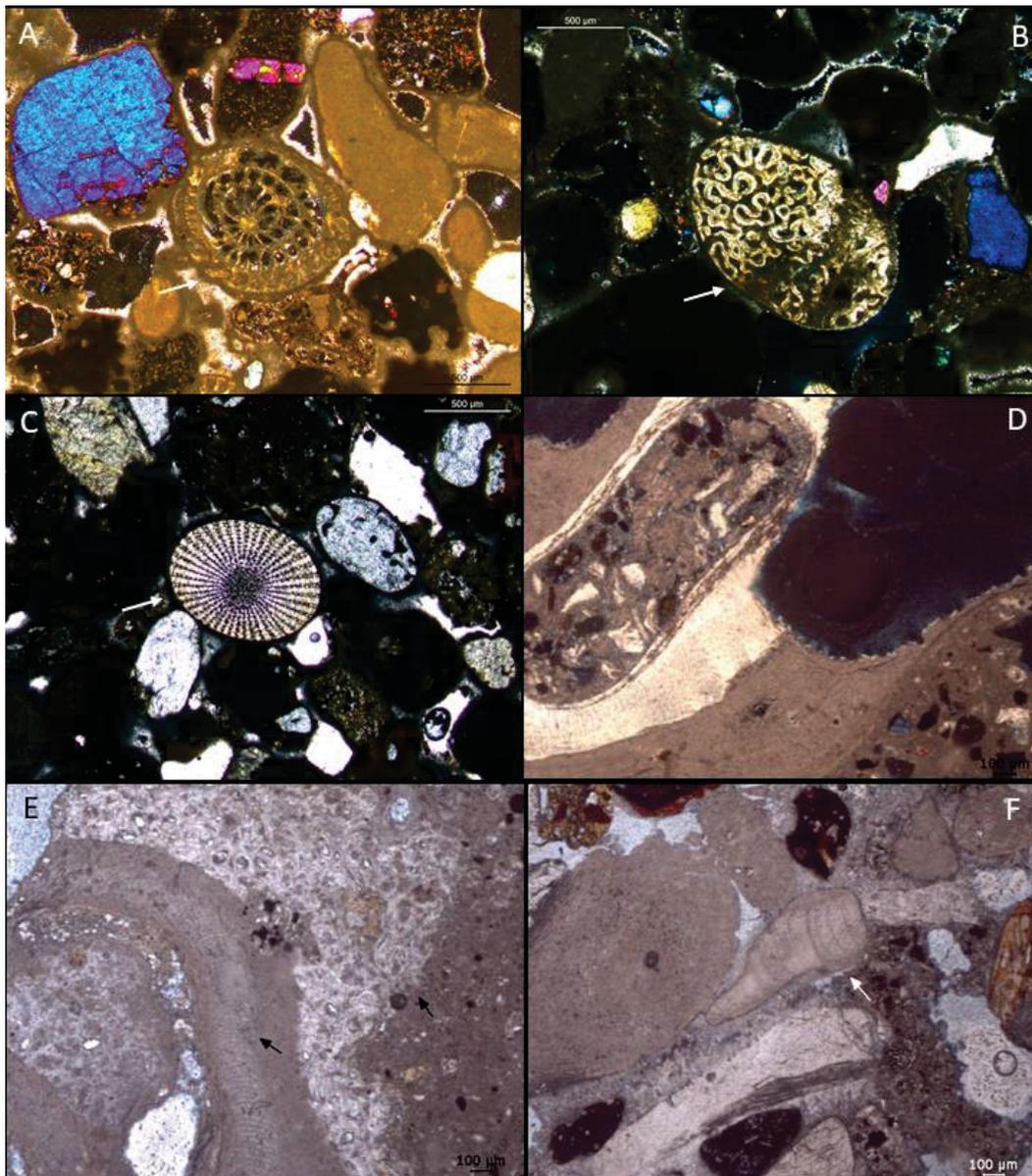


Figura 4 – Fotomicrografias de lâminas petrográficas ilustrando a composição e texturas de *beachrocks* (A; B; C; F) e recifes (E; D) da ilha de Trindade. As setas indicam: A) foraminífero; B) briozóario; C) equinodermo; D) bioclasto de gastrópode preenchido com matriz bioclástica; E) recife de algas vermelhas; F) fragmento de alga vermelha.

5.5.2 Características diagenéticas

As 14 amostras analisadas apresentaram uma grande variedade de processos diagenéticos. Entre os *beachrocks* da IT, os cimentos carbonáticos identificados foram predominantemente aragoníticos, identificados por coloração de Feigl e análises de EDS. As texturas encontradas foram revestimento microcristalino e preenchimento de poros acicular e fibroso. Outras feições identificadas foram substituição de grãos terrígenos e preenchimento de poros

por clorita autigênica e biofilmes. Para os recifes da IT e do AFN, a baixa porcentagem de cimentos encontrados foram de calcita fibroso e presença de biofilme

Aragonita microcristalina: Forma uma primeira fase de cimentação nos *beachrocks* da IT. Apresenta cristais menores que $5\mu\text{m}$ (Figura 5C), foi observada revestindo grãos terrígenos e bioclastos (Figura 5B) de maneira desordenada e descontínua. Com espessuras variáveis forma faixas de cor marrom ao redor dos grãos (Figura 5A), sendo coberta por uma segunda fase normalmente de aragonita acicular ou fibrosa (Figura 5D).

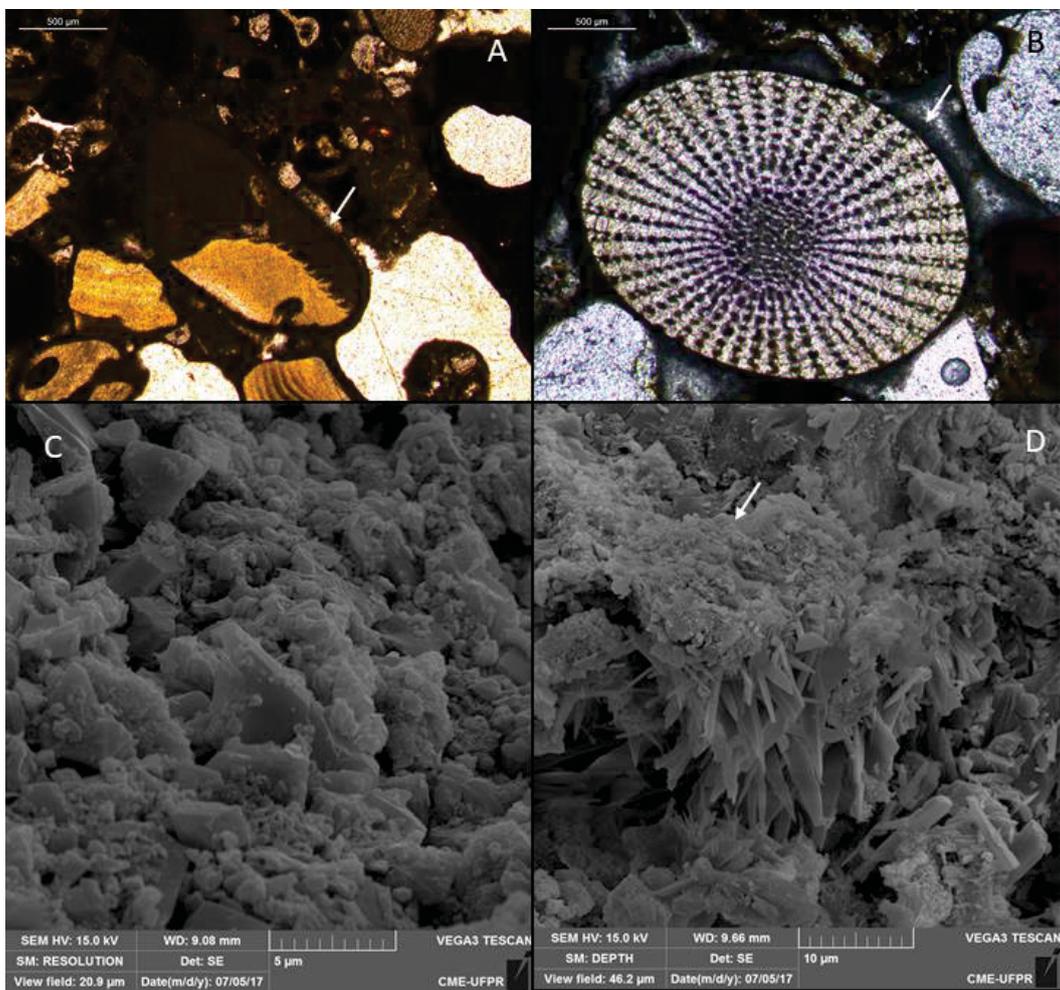


Figura 5 - Textura de aragonita microcristalina encontrada nos beachrocks. A) Envelope microcristalino escuro ao redor de um bioclasto. B) Aragonita micritica revestindo um bioclasto de equinodermo. C e D) Detalhes em MEV, com cristais de aragonita menores que $5\mu\text{m}$.

Aragonita acicular: O cimento mais abundante, encontrado em todas as amostras de *beachrocks* analisadas. Presente na forma de franjas isópacas

revestindo grãos, siliciclásticos (Figura 6A) ou bioclásticos (Figura 6B), e preenchendo poros. Os cristais são alongados, em forma de agulha, com larguras menores que 10 μm e comprimento médio de 100 μm (Figura 6D). Se desenvolvem com orientação normal ao substrato (Figura 6C) e algumas vezes acima do revestimento de aragonita microcristalina.

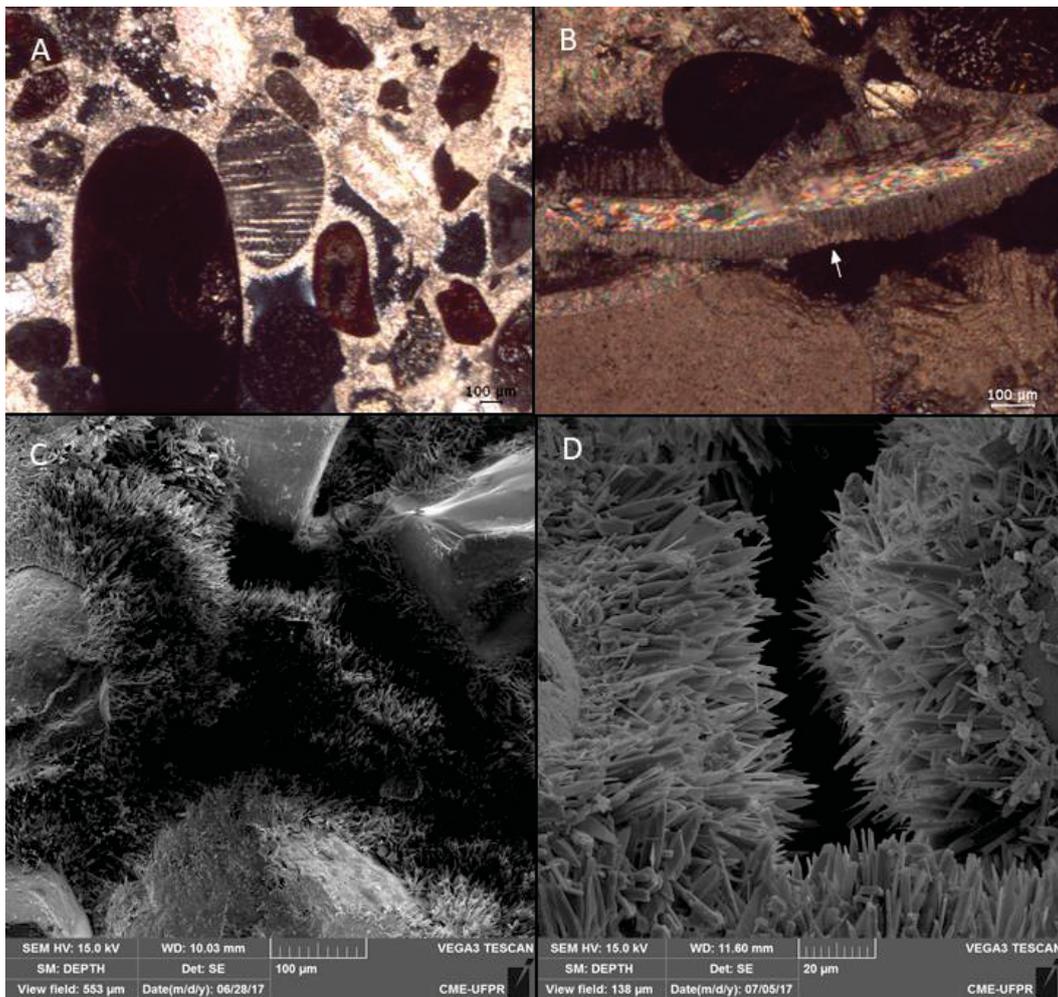


Figura 6 - Textura de aragonita acicular encontrada nos *beachrocks*. A) Aragonita revestindo grãos siliciclásticos alterados e bioclastos; B) Franja de aragonita revestindo um fragmento de molusco; C e D) Detalhes em MEV, com cristais de aragonita em formato de agulhas revestindo os grãos e reduzindo a porosidade intergranular.

Aragonita fibrosa: Também encontrada como franjas (Figura 7), revestindo grãos siliciclásticos e bioclásticos, assim como preenchendo poros. Se diferencia da aragonita acicular por não ser um cimento equigranular e devido a ser encontrada com cristais de largura igual ou maior que 10 μm .

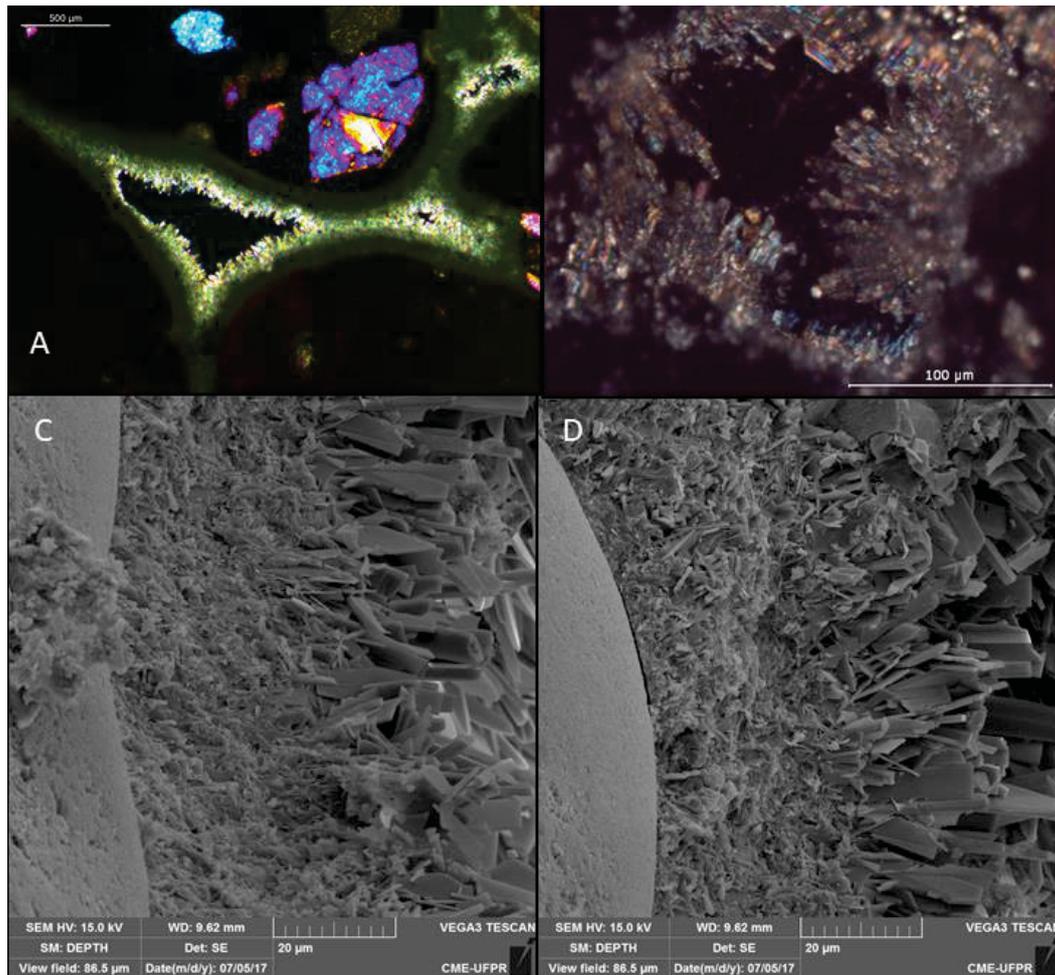


Figura 7 - Textura de aragonita fibrosa encontrada nos *beachrocks*. A) Aragonita associada a uma fina camada escura de aragonita microcristalina, revestindo grãos; B) Detalhe de textura de aragonita fibrosa; C e D) Detalhes em MEV, com cristais de aragonita fibrosa associado a textura microcristalinas.

Clorita autigênica: foi observado em forma de rosetas (Figura 8D), revestindo poros secundários de grão terrígenos alterados por dissolução (Figura 8A e B) ou como substituição de minerais (Figura 8C). O mineral apresenta cristais de aproximadamente 2 μm, encontrado apenas nas amostras de *beachrock* da IT, em algumas vezes acima do cimento aragonítico acicular (Figura 8B) e em associação com biofilme (Figura 8C) a aragonita microcristalina (Figura 8A).

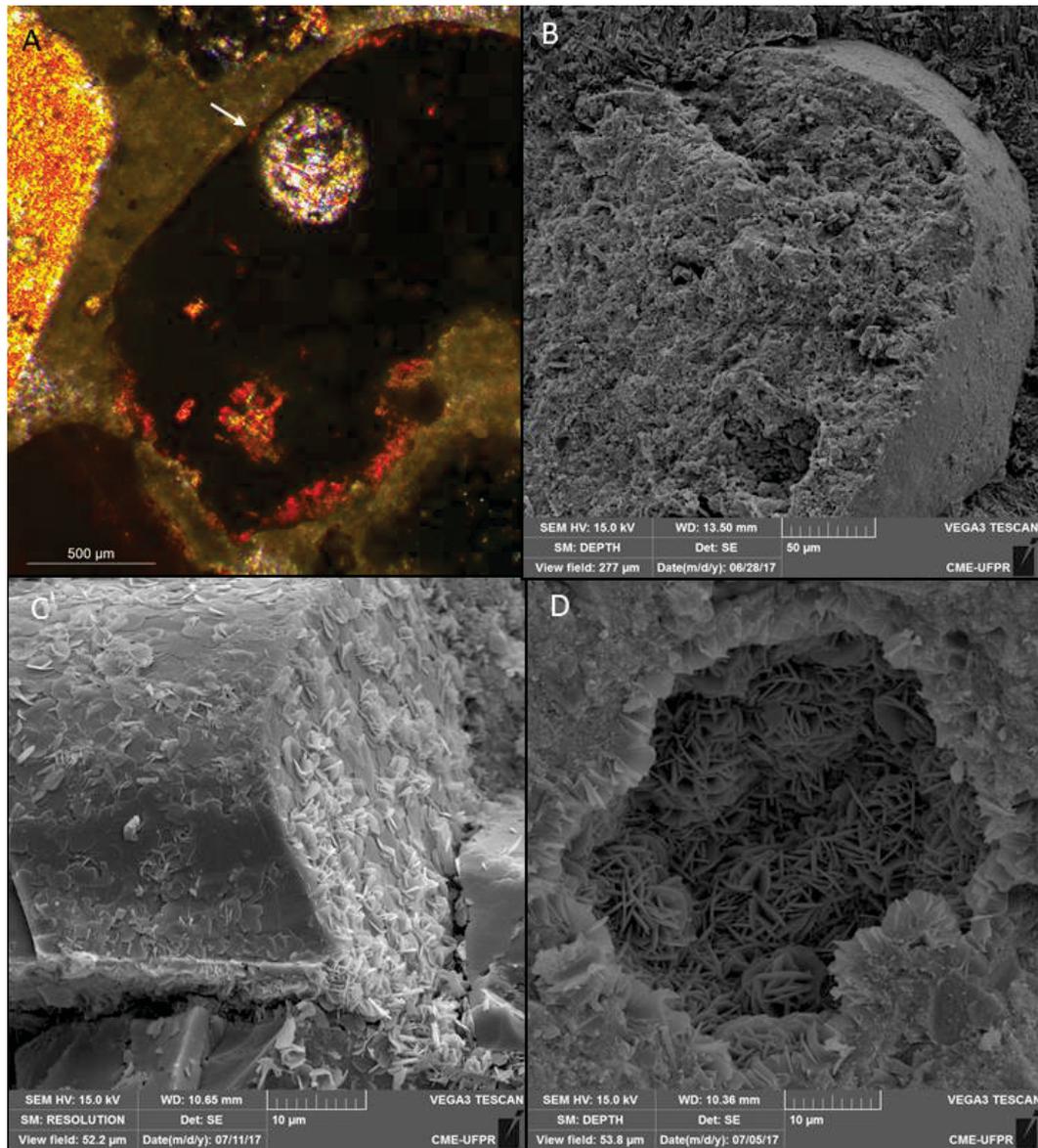


Figura 8 - Clorita autigênica encontrada nos *beachrocks*. A) Clorita revestindo poro secundário de mineral alterado; B) Detalhe de grão alterado por dissolução; C) Mineral sendo revestido e substituído por clorita; D) Detalhe de poro revestido por rosetas de clorita.

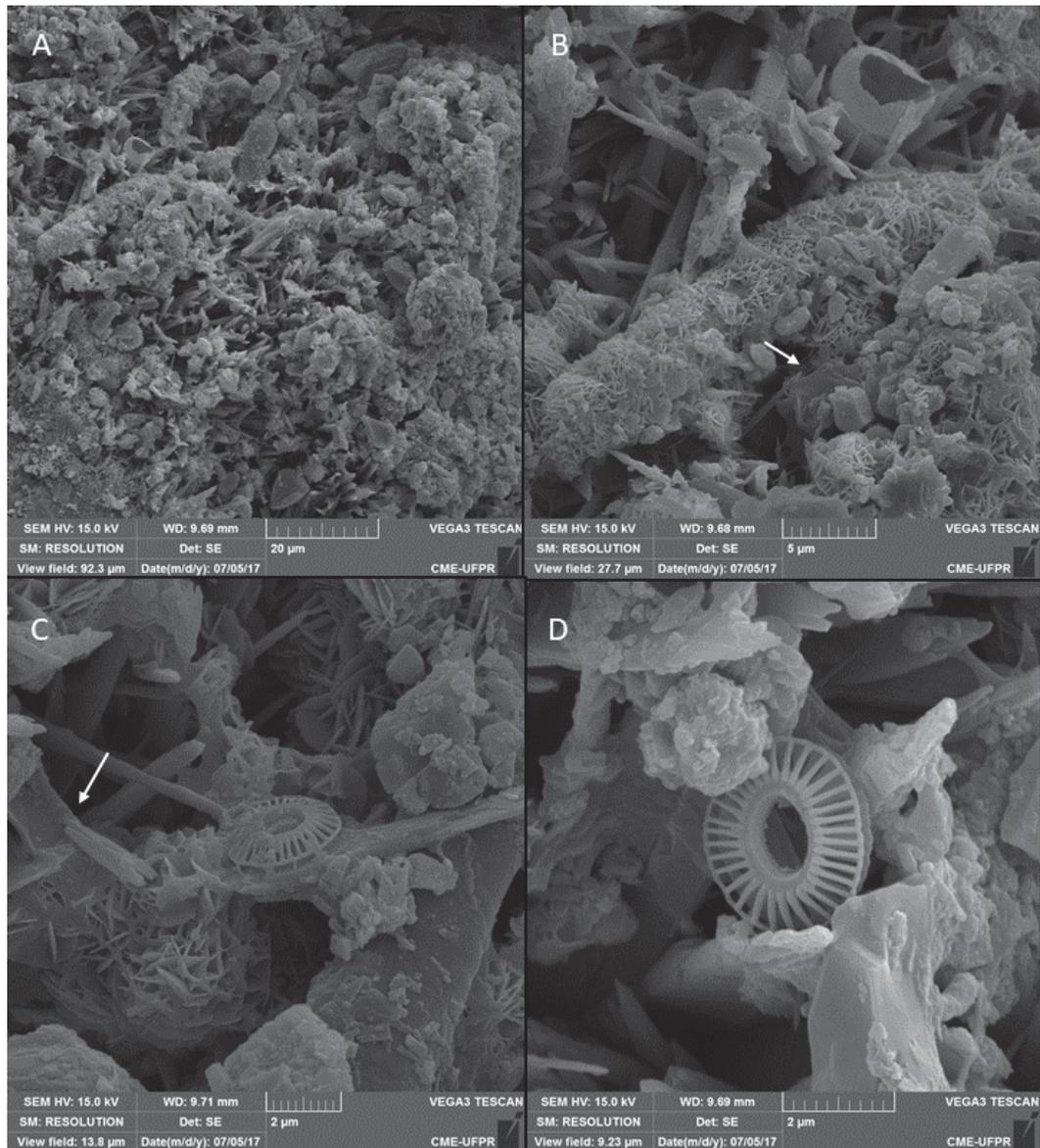


Figura 9 - A) Visão geral de associação entre aragonita acicular, clorita e aragonita microcristalina; B) estruturas biogênicas cobertas por clorita, sobrepondo cimento acicular e com a presença de biofilme (indicado pela seta); C) detalhe de biofilme associado a clorita e texturas de aragonita acicular e microcristalina e D) detalhe de fragmento de coccolitofoário.

As amostras de recife apresentaram baixa cimentação, composta por calcita fibrosa e botrioidal (Figura 10A), em sua maioria preenchendo vazios presentes nas bioconstruções e algumas vezes revestindo grãos. Também foi possível observar uma lâmina de biofilme associada a matriz bioclasticas presente nos recifes (Figura 10D).

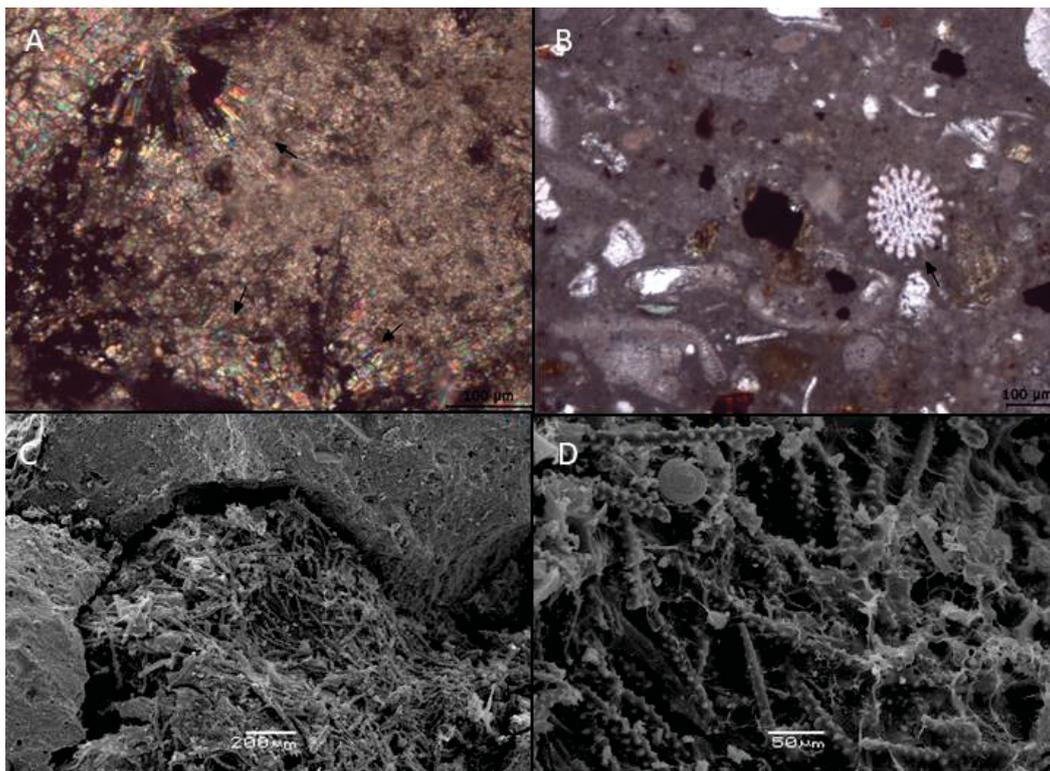


Figura 10 - A) Textura de calcita botrioidal observada revestindo grãos; B) Matriz micrítica com bioclastos; C) matriz constituída de espículas de esponja e D) matriz com bioclastos e espículas de esponja revestidas por película orgânica.

5.6 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam que feições diagenéticas são registros de processos variáveis inclusive em escalas pequenas. O estudo revelou que diferentes tipos de cimento podem ocorrer combinados, indicando a complexidade envolvida na formação de *beachrocks*.

Entre as amostras analisadas, apenas as provenientes das praias das Tartarugas (TR03, TR08 e TR13), do Parcel (TR01, TR02, TR06, TR07, TR12), do Andrada (TR14) e na praia Vermelha (TR09) da ilha da Trindade podem ser consideradas *beachrocks*. As texturas de cimentos aragoníticos observadas são indicativas de litificação em zona intermarés. Nesta região, a precipitação de cimentos microcristalinos, aciculares e fibrosos estaria, segundo o modelo proposto por Longman (1980), associada ao ambiente freático marinho ativo e ao meio vadoso marinho, onde há grande circulação da água do mar entre os poros e rápida desgaseificação do CO₂, resultando em intensa cimentação.

A formação dessas rochas ocorre no estágio de eodiagênese. É possível observar tal fato pelo tipo de contato entre grãos e predomínio de porosidade primária, o que nos indica baixo grau de empacotamento. Portanto, são rochas que não foram submetidas a soterramento nem processos de compactação severa, indicando que a sua formação ocorreu durante todo período em ambiente subsuperficial. Corroborando assim com a cimentação rápida proposta para *beachrocks*.

A ausência de estruturas biogênicas associadas aos cristais de aragonita microcristalina e os resultados de composição mineral obtidos nas análises em EDS mostram que para os *beachrocks* da Trindade o modelo de formação por processos físico-químicos ainda se aplica melhor para a interpretação dos processos de cimentação iniciais. Segundo McCutcheon *et al.* (2016) a aragonita derivada de atividade biológica em *beachrocks* é tipicamente enriquecida em Sr, o que não foi observado para as amostras analisadas. Divergindo então de Webb *et al.* (1999), que sugeriram que as primeiras fases de cimentação dos *beachrocks*, a partir da precipitação de aragonita microcristalina, seria gerada por ação microbiológica.

Assim como outros *beachrocks* (e.g. Vieira & De Ros, 2006 e Ginsburg, 1953), cimentos com hábito isópaco como aragonita acicular e fibrosa foram predominantes na IT, indicando um predomínio de precipitação em zona marinha freática ativa produto de ação das ondas e marés na face praial.

Uma das hipóteses para o surgimento da clorita autigênica em forma de cimento preenchendo poros ou como processo de substituição está associado a alteração por dissolução de grãos terrígenos, que forneceriam íons necessários para a sua formação. A dissolução dos minerais pode ser resultado da ação de águas meteóricas. O fato da clorita ser encontrada em cavidades juntamente a cimentos aragoníticos e a filmes biológicos, indicam um ambiente em zona intermaré mais estagnado, onde os *beachrocks* seriam um micro-habitat para microrganismos endolíticos, o que posteriormente continuaria a favorecer os processos de dissolução e biomineralização a partir da fotossíntese (McCutcheon *et al.* 2016).

A ausência de biofilme em associação as primeiras fases de cimentação de aragonita microcristalina, acicular e fibrosa sugere que o principal mecanismo de cimentação dos *beachrocks* na IT é essencialmente inorgânico por

desgaseificação de CO₂ e misturas de água marinha e água doce. Por ser formado em ambiente de alta energia, a precipitação de cimento carbonático por atividade biológica só terá influência após exposição maior desses sedimentos a ambiente vadoso e meteórico.

Com relação aos bioclastos encontrados, todos são de origem marinha e indicadores de zona eufótica. De modo geral, as algas vermelhas, que apresentam a maior porcentagem entre os bioclastos presentes no arcabouço, são organismos que vivem em águas com salinidade variando entre 33 e 44 ppt (Scholle & Ulmer-Scholle, 2003). As formas mais encontradas em *beachrocks* descritas na literatura são as ramificadas, normalmente associadas com ambientes de moderada energia de onda. A presença de cocólitos também indica ambiente eufótico, porém esses organismos se desenvolvem melhor em mar aberto do que em áreas costeiras, podendo ter relação com o fato das rochas serem formadas em ilhas oceânicas e com os níveis do mar cerca de três metros acima do atual. Níveis esses que foram descritos anteriormente por Angulo *et al.* (2018).

Apesar dos *beachrocks* desempenharem um papel de fundação, sobre o qual os recifes podem se desenvolver (Shen *et al.*, 2016 e Kumar *et al.*, 2012), os resultados mostram que os mecanismos e cimentos precipitados nos recifes não coincidem com a formação e com os processos diagenéticos dos arenitos da IT.

Os recifes foram interpretados como bioconstruções de vermitídeos com algas calcárias e cimento calcítico. A textura botrioidal observada é descrita como de origem marinha e comumente encontrada em cavidades de recifes (Flügel, 2010). As concreções de vermitídeos tendem a se desenvolver no limite superior do infralitoral. Nesses casos os recifes servem como barreira hidrodinâmica (Kunkel *et al.*, 2006) e como fonte de sedimentos carbonáticos.

Os resultados obtidos permitiram estabelecer a seguinte evolução diagenética para os *beachrocks* da ilha da Trindade (Quadro 2):

- 1) precipitação de cimento aragonítico microcristalino em meio freático marinho ativo, com ampla circulação de água salina nos interstícios proveniente da ação das ondas em ambiente intermaré;

- 2) precipitação de cimento de aragonita acicular e fibrosa, também em meio freático marinho ativo, formando franjas isópacas revestindo os grãos do arcabouço e reduzindo a porosidade;

3) dissolução, podendo estar associada à percolação de águas subsaturadas em CaCO_3 ou à ação microbológica;

4) precipitação de aragonita por atividade microbológica, por estabelecimento de micro-*habitat* favorável; e

5) precipitação da clorita, devido à liberação de íons de Fe, Mg, Al e Si, por dissolução de grãos de minerais terrígenos.

Quadro 2: Representação esquemática da evolução diagenética dos beachrocks analisados para a Ilha da Trindade. As linhas tracejadas são pontos que indicam incertezas com relação a ocorrência do processo e as linhas contínuas indicam continuidade.

Processos Diagenéticos	Eodiagênese
Aragonita microcristalina	————— ·····
Aragonita acicular	————— ·····
Aragonita fibrosa	————— ·····
Dissolução de grãos terrígenos	····· ————— ·····
Clorita autigênica	····· ————— ·····
Biomíneralização	····· ————— ·····

5.7 CONCLUSÕES

A análise de *beachrocks* da ilha oceânica da Trindade permitiu identificar um grande número de processos diagenéticos. Dentre as amostras analisadas apenas as localizadas nas praias do Parcel, Tartarugas, Andrada e Vermelha foram classificadas como *beachrocks stricto sensu*. Essas rochas foram compostas predominantemente por cimento aragonítico microcristalino, acicular e fibroso.

As características petrográficas e processos observados confirmam a formação dessas rochas em ambiente marinho freático ativo.

A presença de filmes orgânicos, mesmo que em pequenas quantidades comprova que a gênese de *beachrocks* não está associada apenas a mecanismos de cimentação de origem físico-química.

Com relação ao desenvolvimento dos recifes de algas calcárias juntamente aos *beachrocks*, não foi possível observar uma correlação direta entre os processos

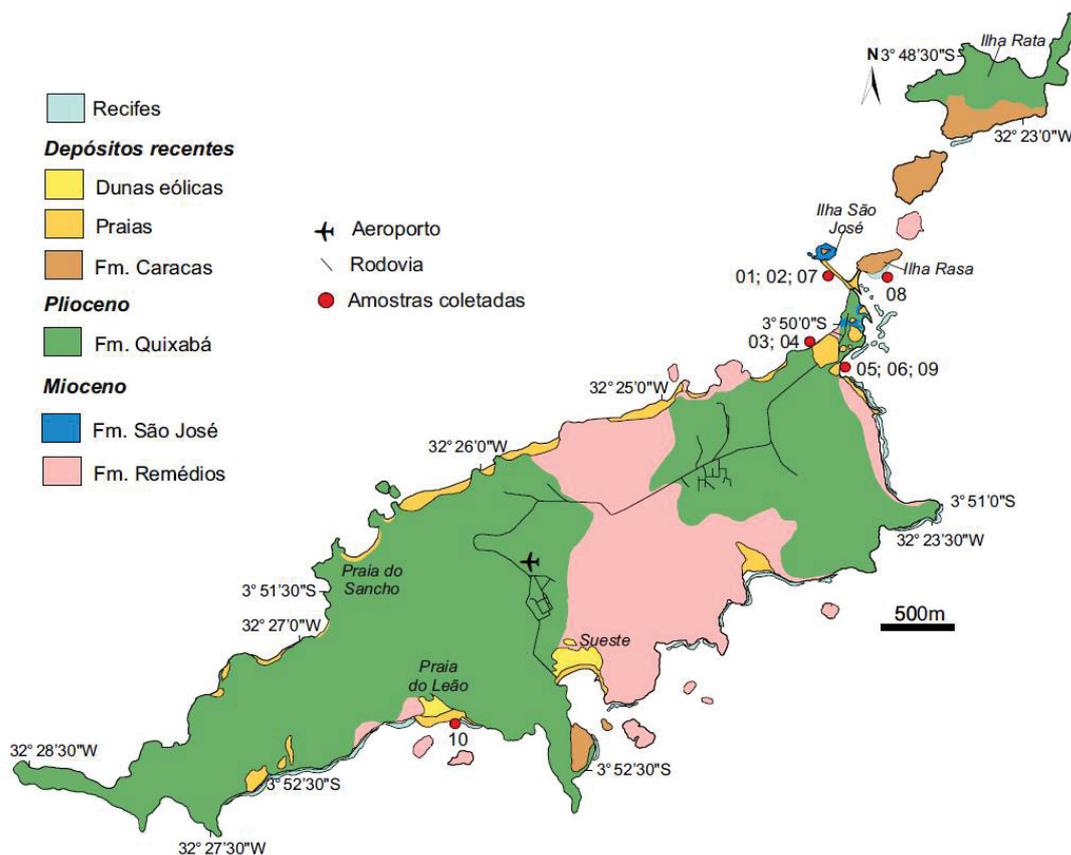
diagenéticos. Na ilha oceânica da Trindade, os recifes funcionam apenas como uma barreira hidrodinâmica e como fonte de sedimentos carbonáticos para o desenvolvimento dos arenitos na facie praial.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES ADICIONAIS

Os resultados obtidos a partir das amostras do arquipélago de Fernando de Noronha (AFN), não foram utilizados para a confecção do artigo científico “GÊNESE DE *BEACHROCKS* E RECIFES DA ILHA OCEÂNICA DA TRINDADE” devido ao alto grau de alteração das amostras e por não se tratarem de *beachrocks sensu stricto*.

Dentre as 24 amostras analisadas neste estudo, 10 pertenciam ao AFN. Localizadas nas praias de Chapéu de Nordeste, Ponta de Santo Antônio, Caieira, Ilha Rasa e Praia do Leão (MAPA 7).

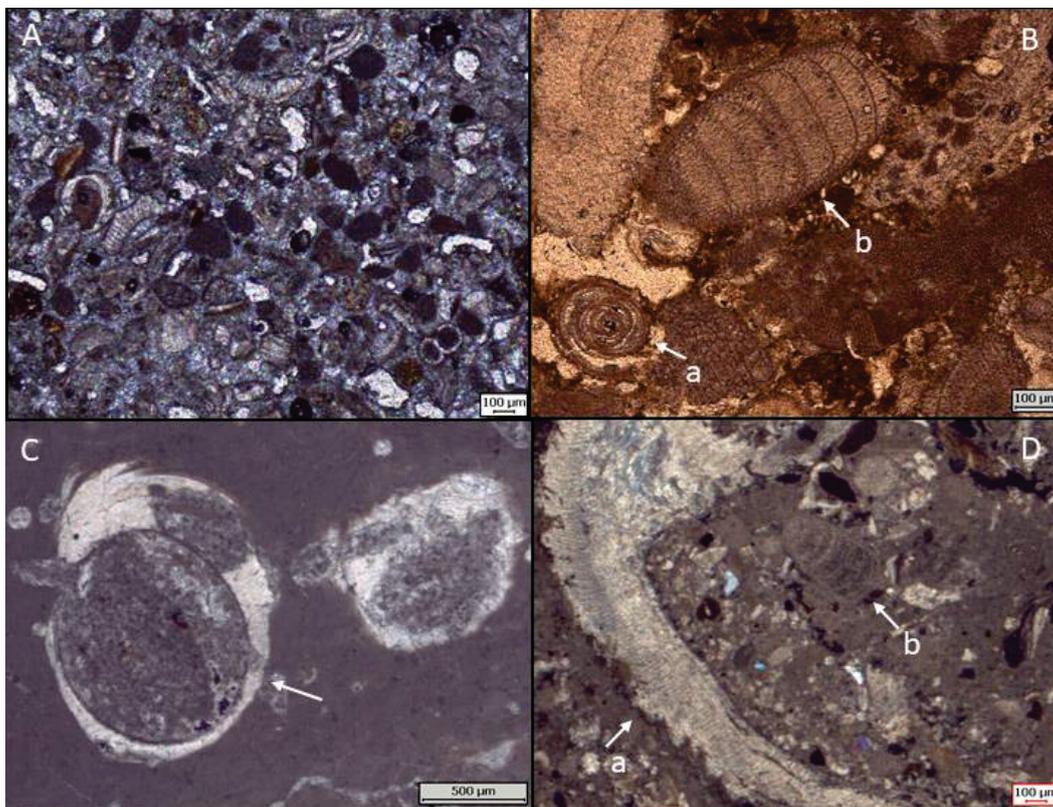
MAPA 7 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DO ARQUIPÉLAGO DE FERNANDO DE NORONHA COM AS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS AFLORANTES, DEPÓSITOS QUATERNÁRIOS, COM LOCAIS DO PRESENTE ESTUDO E AMOSTRAGEM.



FONTE: Modificado de LOPES (2002) e ALMEIDA (1955).

As amostras do AFN, provenientes das praias de Chapéu de Nordeste (FN01, FN02 e FN07), Caieiras (FN05, FN06 e FN09) e Ilha Rasa (FN08) são constituídas de areia média a fina, composto quase inteiramente de bioclastos (ILUSTRAÇÃO 6A), sendo a maior parte de algas calcárias (ILUSTRAÇÃO 6Bb) e carapaças de foraminíferos (ILUSTRAÇÃO 6Ba). Composto por cerca de 60% de arcabouço, 10% de matriz, 20% de cimento e 10% de poros. São cimentados por calcita granular preenchendo poros, calcita fibrosa revestindo grãos e por cimento ferruginoso revestindo grãos.

ILUSTRAÇÃO 6 - FOTOMICROGRAFIAS DE ARENITOS DE PRAIA (A; B) E RECIFES (C; D) ONDE: A) VISÃO GERAL DA LÂMINAS DE ARENITO COM GRANDE QUANTIDADE DE BIOCLASTOS; B) a- FORAMINÍFERO, b- ALGA VERMELHA; C) TUBO DE VERMITIDEO PREENCHIDO POR MATRIZ MICRÍTICA; D) a- FRAGMENTO DE BIVALVE, b- ALGA VERMELHA.



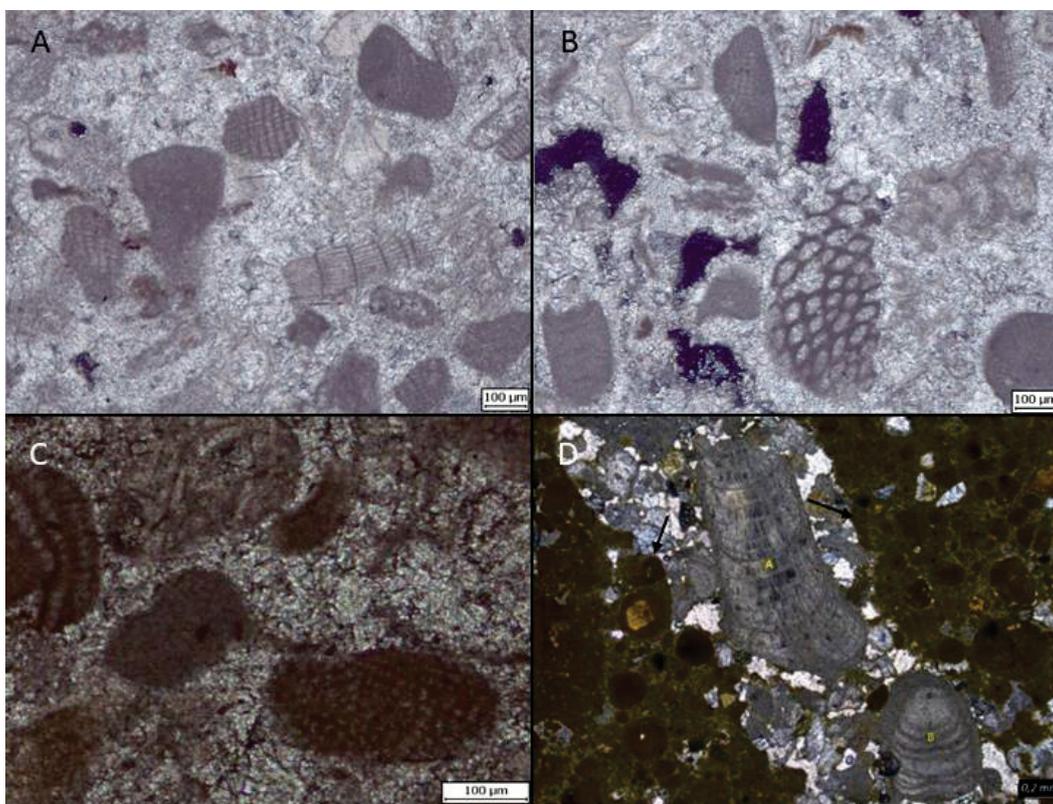
FONTE: O autor (2018)

O cimento de calcita granular microsepática (ILUSTRAÇÃO 7) foi encontrada nos arenitos do AFN, com cristais relativamente equidimensionais, menores do que 10 µm, preenchendo poros intergranulares.

Encontrada em franjas descontínuas ao redor de grãos tanto lito quanto bioclásticos dos arenitos do AFN, a calcita fibrosa apresenta cristais alongados com orientação normal ao grão onde está aderido.

O cimento ferruginoso (ILUSTRAÇÃO 7D) foi observado em associação a grãos terrígenos alterados nas amostras de arenito do AFN, formando faixas marrom avermelhadas ao redor dos grãos com espessuras variáveis.

ILUSTRAÇÃO 7 - A, B e C) FOTOMICROGRAFIAS DE CIMENTO DE CALCITA GRANULAR MICROSPÁTICA ASSOCIADA A BIOCLASTOS; D) FASES DE CIMENTAÇÃO DISTINTA, ONDE AS SETAS INDICAM CIMENTO FERRUGINOSO E "a" e "b" BIOCLASTOS DE ALGA VERMELHA.



FONTE: O autor (2018)

Para as amostras de arenito no AFN, segundo Longman (1980), a presença de cimentos calcários do tipo granular pode indicar processo de recristalização e está associada a um ambiente meteórico vadoso ou meteórico freático, onde a ação da água doce e do ar tem maior influência do que a água marinha. Nesses ambientes processos de dissolução são mais intensificados, o que explicaria a presença de cimentos ferruginosos, provavelmente derivados da dissolução de minerais provenientes das rochas vulcânicas da ilha. A

presença de matriz nessas rochas, mesmo que em pequena quantidade é incompatível com o modelo de litificação de sedimentos dos *beachrocks*, acumulados em ambiente de alta energia, praias. Nesse caso, embora as características geomorfológicas descritas por Angulo et al. (2013) indiquem deposição em facies praial, a litificação dessas rochas não ocorreu em ambiente intermaré, o que leva a interpretá-lo como um arenito de praias antigas.

Os recifes em Ponta de Santo Antônio (FN03 e FN04) e na Praia do Leão (FN10) são formados pela associação de algas calcárias e vermetídeos (ILUSTRAÇÃO 6C). Os espaços vazios das bioconstruções foram preenchidos com matriz de lama micrítica com bioclastos (ILUSTRAÇÃO 6D) de algas vermelhas, foraminíferos, braquiópodes, grãos terrígenos em quantidades traço.

Essas bioconstruções são observadas em inúmeros locais da costa brasileira, inclusive nas ilhas oceânicas. Seu desenvolvimento é realizado em substrato duro e em ambientes com alta energia de ondas, no limite entre médio e infralitoral (LABOREL; KEMPF, 1966).

CAPÍTULO IV

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da petrografia para estudos da gênese dos *beachrocks* é uma ferramenta essencial. Entretanto a interpretação dos resultados apenas com essas informações se torna bastante complexa sem um estudo litofaciológico.

Apesar da dificuldade de realizar pesquisas científicas em ambientes remotos como nas ilhas oceânicas, sugiro uma pesquisa de campo mais aprofundada dos afloramentos de *beachrocks*, com o uso de ferramentas geofísicas e de testemunhos para uma melhor avaliação dos estratos e fases de deposição desses arenitos, auxiliando também a compreender melhor o papel dos recifes e esteiras algálicas no desenvolvimento dessas rochas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e petrologia do arquipélago de Fernando de Noronha**. 181f. Monografia. Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1955.

ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e petrologia da Ilha da Trindade**. 197f. Monografia. Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro, 1961.

ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 3–18. 2006.

ALMEIDA, F. F. M. Fernando de Noronha Archipelago - A record of a volcanic mount of the South Atlantic. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**, v. 1, p. 361–368. 2002.

ANGULO, RODOLFO JOSÉ; SOUZA, M. C. DE. Revisão conceitual de indicadores costeiros de paleoníveis marinhos quaternários no Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. I, p. 1–32. 2014

ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C.; Barboza, E.G.; ROSA, M. L. C. C.; FERNANDES, L. A.; GUEDES, C. C. F.; OLIVEIRA, L. H. S.; MANZOLLI, R. P.; DISARO, S. T.; FERREIRA, A. G.; MARTIN, C. M. Quaternary sealevel changes and coastal evolution of the Island of Trindade, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 84, p. 1-208-222. 2018

ANGULO, R. J.; DE SOUZA, M. C.; FERNANDES, L. A.; DISARÓ, S. T. Quaternary sea-level changes and aeolianites in the Fernando de Noronha archipelago, northeastern Brazil. **Quaternary International**, v. 2, p. 1–16. 2013.

ARRIETA N, GOIENAGA N, MARTINEZ-ARKARAZO I, MURELAGA X, BACETA JI, SARMIENTO A, MADARIAGA JM. Beachrock formation in temperate coastlines: examples in sand-gravel beaches adjacent to the Nerbioi-Ibaizabal Estuary (Bilbao, Bay of Biscay, North of Spain). *Spectrochimica Acta Part A* 80:55–65. 2011

BARCELLOS, R. L.; COELHO-JÚNIOR, C.; LINS, S. R. R. M.; et al. Island beaches morphological and sedimentary short term variations – the case of SE Fernando de Noronha Island, South Atlantic, Brazil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 4, p. 471–478. 2011.

CABRAL NETO I. **Beachrocks do Rio Grande do Norte: Correlação entre os depósitos costeiros e os de zona costa-afora com base na faciologia, petrografia e diagênese.** 126f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, Natal – RN, 2011.

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. **Rev. Bras. Geosc.** v. 32, n.3, p.471-490. 2013.

CABRAL NETO, I.; CÓRDOBA, V. C.; VITAL, H. Petrografia de beachrock em zona costa afora adjacente ao litoral norte do Rio Grande do Norte, Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 2, n. 1–2, p. 12–18. 2010.

CALLIARI L.J., PEREIRA P.S., SHORT A.D., SOBRAL F.C., MACHADO A.A., PINHEIRO Y.G., FITZPATRICK C. Sandy beaches of Brazilian oceanic islands. In: SHORT A.D., KLEIN A.H.F. (Ed) **Brazilian beach systems**. Springer. Boca Raton, 2016. 611p.

CASTRO, J.; SUGUIO, K; SEOANE, J. C. S. Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 2, p. 671–683. 2014

CASTRO, J. W. A. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 3, p. 303–319. 2010.

CASTRO J.W.A., ANTONELLO L.L. Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: ALVES R.J.V., CASTRO J.W.A. (Ed) **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo**. Ministério do Meio Ambiente, Rio de Janeiro, 2006. p. 29-57.

CHAVES, N. S.; SIAL, A. N. Mixed Oceanic and Freshwater Depositional Conditions for Beachrocks of Northeast Brazil: Evidence from Carbon and Oxygen Isotopes. **International Geology Review**, v. 40, n. 8, p. 748–754. 1998.

CHOQUETTE P.W. & PRAY L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 54:207-250. 1970.

CLEMENTE, E.P.; SHAEFER, C.E.G.R.; OLIVEIRA, F.S.; ALBUQUERQUE-FILHO, M.R.; ALVES, R.V.; SÁ, M.M.F.; MELO, V.F.; CORREA, G.R. Topossequência de solos na ilha da Trindade, Atlântico Sul. **Revista Brasileira**

de Ciência do Solo (ISSN: 0100-0683), 33(5):1357-1371, Viçosa, MG, Brasil. 2009.

COOPER, J. A. G. Beachrock formation in low latitudes: implications for coastal evolutionary models. **Marine Geology**, v. 98, n. 1, p. 145–154. 1991.

DANJO, T.; KAWASAKI, S. A Study of the Formation Mechanism of Beachrock in Okinawa, Japan: Toward Making Artificial Rock. **Int. J. of GEOMATE**, v. 5, n. 1, p. 634–639. 2013

DANJO, T.; KAWASAKI, S. Characteristics of Beachrocks: A Review. **Geotechnical and Geological Engineering**, 32 (2): 215-246. 2014.

DURÃES, MATHEUS FONSECA; MELLO, CARLOS ROGÉRIO DE; BESKOW, S. Trends in the hydrometeorological regime on an island in the south Atlantic Ocean. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 242–255. 2016.

EMERSON, S. R.; HEDGES, J. L. **Chemical Oceanography and the marine carbon cycle**. Cambridge University Press. 470 pp. 2008.

EMERY, K. O.; COX, D. C. Beachrock in the Hawaiian Islands. **Pacific Science**, v. 10, n. 4, p. 382–402. 1956.

EVELPIDOU N., PIRAZZOLI, P. A. Sea-Level Indicators. In: FINKL C.W., MAKOWSKI C. (Ed.). **Environmental Management and Governance: Advances in Coastal and Marine Resources**, Coastal Research Library, Springer International Publishing Switzerland. 2015.

FERREIRA JÚNIOR A. V., ARAÚJO T. C. M., COLTRINARI L. Ambientes de Formação, Processos de Cimentação de Arenitos de Praia e Indicadores de Variações do Nível do Mar. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.05, p.938-960. 2011.

FLUGEL, E. **Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application**. Springer-Verlag, Berlin, 984p. 2010.

FOLK, R.L. The natural history of crystalline calcium carbonate; effect of magnesium content and salinity. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 44, p. 40–53. 1974.

FRIEDMAN, G.M. Staining. In: CARNER, R.E. (Ed.), **Procedures in Sedimentary Petrology**. Wiley, New York, pp. 511–530. 1971.

GINSBURG, R. N. Beachrock In South Florida. **Journal of Sedimentary Research**, v. Vol. 23, n. 2, p. 85–92. 1953.

GISCHLER E. Beachrock and intertidal precipitates. In: NASH D.J. & MCLAREN S.J. (Eds.). **Geochemical sediments and landscapes**. Blackwell Publishing Ltd. 465p. 2007.

GUIMARÃES, T.; MARIANO, G.; BARRETO, A.; SÁ, A. A. Beachrocks of Southern Coastal Zone of the State of Pernambuco (Northeastern Brazil): Geological Resistance with History. **Geoheritage**. 2016.

HANOR, J. Precipitation of beachrock cements: mixing of marine and meteoric waters vs CO₂ degassing. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 48, n. 2, p. 489–501. 1978.

HOPLEY, D. Beachrock as a sea-level indicator. In: VAN DE PLASSCHE, O. (Ed.), **Sea-level Research**. Galliard Printers, Great Yarmouth, pp. 157–173. 1986.

JONES, B.; ROSEN, M. R.; RENAUT, R. W. Silica-Cemented Beachrock from Lake Taupo, North Island, New Zealand. **Journal of Sedimentary Research**, v. Vol. 67, n. 5, p. 805–814. 1997.

KELLETAT, D. Beachrock as Sea-Level Indicator? Remarks from a Geomorphological Point of View. **Journal of Coastal Research**, v. 226, p. 1558–1564. 2006.

KELLY, C. S.; GREEN, A. N.; COOPER, J. A. G.; WILES, E. Beachrock facies variability and sea level implications: a preliminary study. **Journal of Coastal Research**, v. 70, n. 70, p. 736–742. 2014.

KINDLER, P.; BAIN, R. J. Submerged upper Holocene beachrock on San Salvador Island, Bahamas: implications for recent sea-level history. **Geologische Rundschau**, v. 82, n. 2, p. 241–247. 1993.

KNEALE, D.; VILES, H. A. Beach cement: Incipient CaCO₃-cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland. **Sedimentary**

Geology, v. 132, n. 3–4, p. 165–170, 2000.

KRUMBEIN, W.E. Phototrophic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf-of-Aqaba, Sinai). **Geomicrobiol J.** v. 1, p. 139–203. 1979.

KUMAR, K. S.; CHANDRASEKAR, N.; SERALATHAN, P.; SAHAYAM, D. Diagenesis of Holocene reef and associated beachrock of certain coral islands, Gulf of Mannar, India: Implication on climate and sea level. **Journal of Earth System Science.** v. 121, No. 3, p. 733–745. 2012.

KUNKEL, C. M., HALLBERG, R. H., AND OPPENHEIMER, M. Coral reefs reduce tsunami impact in model simulations. **Geophysical Research Letters**, 33, 2006. doi:10.1029/2006GL027892

LABOREL, J. L.; KEMPF, M. **Formações de vermetos e algas calcárias nas costas do Brasil.** Inst. Oceanogr. Univ. Fer. Pe., Recife, 7/8: 33 - 50. 1996.

LONGMAN M.W. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. **The American Association of Petroleum Geologist Bulletin**, 64: 461-487. 1980.

LOPES, R. P. **O vulcanismo do arquipélago de Fernando de Noronha, PE: química mineral e geoquímica.** , p. 1–339. 2002.

MANSO, V. D. A. V.; MENOR, E. D. A.; VALENÇA, L. M. M.; et al. Morfodinâmica de Praias Setentrionais da Ilha de Fernando do Noronha. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 3, p. 327–339. 2011.

MAUZ, B.; VACCHI, M.; GREEN, A.; HOFFMANN, G.; COOPER, A. Beachrock: A tool for reconstructing relative sea level in the far-field. **Marine Geology**, v. 362, p. 1–16. 2015.

MCCUTCHEON, J.; NOTHDURFT, L. D.; WEBB, G. E.; PATERSON, D.; SOUTHAM, G. Beachrock formation via microbial dissolution and re-precipitation of carbonate minerals. **Marine Geology**, v. 382, p. 122–135. 2016.

MCLEAN R. Beachrocks. In: HOPLEY, D. (Ed.), **Encyclopedia of modern coral reefs – Structure, forme and process.** Springer Encyclopedia of earth sciences series, p.107- 111. 2011.

MILLIMAN, J. D. **Marine Carbonates**. Springer, Berlin 375 pp. 1974.

MOHR, LEONARDO VIANNA; CASTRO, JOÃO WAGNER ALENCAR; COSTA, PAULO MÁRCIO SANTOS; ALVES, R. J. V. **Ilhas oceânicas braileiras: Da pesquisa ao manejo**. 2009.

MOORE, C. H.; WADE, W. J. **Carbonate Reservoirs: Porosity and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework**. Elsevier. V.67; 2nd Ed. 392 pp. 2013.

NEUMEIER, U. Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence. **Sedimentary Geology**, v. 126, p. 35–46. 1999.

PIRES, G. L. C.; BONGIOLO, E. M. The nephelinitic–phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 72, p. 49–62. 2016.

RAO, V. B.; LIMA, M. C. DE; FRANCHITO, S. H. Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal of Climate**. 1993.

REY, D.; RUBIO, B.; BERNABEU, A. M.; VILAS, F. Formation, exposure, and evolution of a high-latitude beachrock in the intertidal zone of the Corrubedo complex (Ria de Arousa, Galicia, NW Spain). **Sedimentary Geology**, v. 169, p. 93–105. 2004.

SANTOS C.L.A., VITAL H., AMARO V.E., KIKUCHI R.K.P. Mapeamento de recifes submersos na costa do Rio Grande do Norte, NE Brasil: Macau a Maracajaú. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25(1), p. 27-36. 2007

SCHOLLE, P.A.; ULMER-SCHOLLE, D.S. **A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis**. The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 77, Canada, 475p. 2003.

SHEN, J. W.; WANG, Y.; ZHAO, N.; YANG, H. Q.; FU, F. X.; JIN, U. B. Carbonate sedimentary characteristics of the beach rocks around Qilian Islets and Cays, Xisha Islands: Implication for coral reef development and decline. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.** 2016.

SILVA, A. L. C.; DA SILVA, M. A. M.; DE SOUZA, R. S.; PINTO, M. L. V. The role of beachrocks on the evolution of the Holocene barrier systems in Rio de Janeiro,

southeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 70, n. 70, p. 170–175. 2014.

SIMIONI, B. I. **Arenitos submersos do litoral paranaense e sua implicação no estudo de paleoníveis marinhos**. Dissertação de mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Paraná. 2011.

TEIXEIRA W., CORDANI U.G., MENOR E.A., TEIXEIRA M.G., LINSKER R. ET AL. Arquipélago Fernando de Noronha. O paraíso do vulcão. São Paulo: **Terra Virgem**. Ed., 1-167. 2003.

VIEIRA, M. M.; DE ROS, L. F. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 192, n. 3–4, p. 207–230, 2006.

VIEIRA, M. M.; SIAL, A. N.; DE ROS, L. F.; MORAD, S. M. Origin of holocene beachrock cements in northeastern Brazil: Evidence from carbon and oxygen isotope. **Journal of South American Earth Sciences** 79, 401 - 408. 2017.

VOUSDOUKAS, M. I.; VELEGRAKIS, A. F.; PLOMARITIS, T. A. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. **Earth-Science Reviews**, v. 85, n. 1–2, p. 23–46. 2007.

WEBB, G. E.; JELL, J. S.; BAKER, J. C. Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: Implications for the origin of microcrystalline beachrock cement. **Sedimentary Geology**, v. 126, p. 317–334, 1999.

WORDEN, RICHARD H.; BURLEY, STUART D. Sandstone Diagenesis: The evolution of sand to stone. **International Association of Sedimentologists**. ISBN: 978-1-405-10897-3. 2003.