

## Gênese dos *beachrocks* da Ilha oceânica da Trindade, Brasil *Genesis of the beachrocks from Trindade Island, Brazil*

Erika Kiemmo Pfau Santos<sup>1</sup> , Luiz Alberto Fernandes<sup>1</sup> , Rodolfo José Angulo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geologia, Programa de pós-graduação em Geologia, Centro Politécnico, Caixa Postal 19001, CEP 81531-970, Curitiba, PR, BR. (erikakiemo@gmail.com; lufernandes@ufpr.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em Geologia, Centro Politécnico, Laboratório de Estudos Costeiros, Curitiba, PR, BR. (fitoangulo@gmail.com)

Recebido em 07 de fevereiro de 2023; aceito em 27 de janeiro de 2025.

### RESUMO

*Beachrocks* são rochas sedimentares formadas a partir da precipitação de cimentos de carbonato de cálcio, na forma de calcita magnésiana e/ou aragonita. Devido à sua gênese em faces praias, *beachrocks* são utilizados como registros de processos, contextos deposicionais e paleoníveis marinhos, em estudos costeiros. As lajes de *beachrocks* da ilha da Trindade (20°30'S e 29°20'W) ocorrem no sudeste da ilha, nas praias das Tartarugas e Andrada, em placas com laminação plano-paralela e marcas onduladas, com inclinação de ~13° para o mar. Os *beachrocks* estudados são arenitos de granulação média a grossa, com 60 a 70% de arcabouço, composto por grãos terrígenos e bioclastos, pobremente selecionados. Os cimentos compõem 30 a 40% da amostra, revestindo grãos, em texturas de envelopes micríticos de calcita magnésiana, franjas isópacas de aragonita acicular e pseudo-pelotilhas de calcita magnésiana. Em adição aos cimentos, cristais e rosetas de clorita foram observados em associação com grãos terrígenos alterados. A formação dos *beachrocks* ocorreu em subsuperfície no intermaré, em ambiente freático marinho ativo, onde a água marinha tem influência direta na cimentação devido ao espriamento e recuo das ondas. Nos *beachrocks* estudados identificaram-se as seguintes fases diagenéticas: 1) precipitação de calcita magnésiana em forma de envelopes micríticos por organomineralização; 2) precipitação de franjas de aragonita acicular por desgaseificação de CO<sub>2</sub> e/ou evaporação; 3) dissolução de grãos terrígenos e geração de microambiente favorável para atividade microbiológica; 4) precipitação e formação de pseudo-pelotilhas de calcita magnésiana; e 5) geração e precipitação de clorita. Embora a ocorrência de clorita singenética não seja comum em sedimentos e rochas sedimentares, sua identificação nos arenitos de praia da ilha da Trindade é um registro muito interessante. A ocorrência de biofilme nos arenitos, associada aos cimentos, sugere que a formação dos *beachrocks* é produto de processos físico-químicos, assim como de atividade microbiológica.

**Palavras-chave:** Arenito de praia; Diagenese; Paleoníveis marinhos; Clorita.

### ABSTRACT

Beachrocks are sedimentary rocks, formed in the intertidal region from the precipitation of calcium carbonate cements, in the form of magnesium calcite and/or aragonite. Due to their genesis on beach faces, beachrocks are used as tools for coastal research. In Trindade Island (20°30'S and 29°20'W), beachrock occur on the southeast, on Tartarugas and Andrada beaches, in three-dimensional plates with plane-parallel lamination and wavy marks, with a gentle dip of ~13° towards the sea. The studied beachrocks are medium to coarse-grained sandstones, with 60 to 70% of the framework composed of bioclasts and terrigenous grains poorly sorted. The cements make up 30 to 40% of the sample, covering grains, in textures of micritic envelopes of magnesium calcite, isopach fringes of acicular aragonite

and pseudo-pellets of magnesium calcite. In addition to cements, chlorite crystals and rosettes were observed in association with altered terrigenous grains. The formation of beachrocks occurred in the intertidal zones, in an active marine-phreatic environment, where marine water has a direct influence on cementation due to spreading and wave swash. In the beachrocks studied, the following diagenetic phases were identified: 1) mixture of magnesium calcite in the form of micritic envelopes by organomineralization; 2) precipitation of acicular aragonite fringes by CO<sub>2</sub> degassing and/or evaporation; 3) dissolution of terrigenous grains and generation of a favourable microenvironment for microbiological activity; 4) precipitation and formation of magnesium calcite pseudo-pellets; and 5) precipitation of chlorite. Although the occurrence of syngenetic chlorite is not common in sediments and sedimentary rocks, its identification in the beach sandstones of Trindade Island is a very interesting record. The occurrence of biofilm on the rocks and associated with the cements suggests that the formation of beachrocks occurred as a product of physical-chemical processes, as well as by microbiological activity.

**Keywords:** Sandstones; Diagenesis; Paleo-sea level; Chlorite.

## INTRODUÇÃO

*Beachrocks* são rochas sedimentares resultantes da litificação de sedimentos praias por precipitação de carbonato de cálcio, em zona intermaré (Hopley, 1986). Sua ocorrência está, em sua maioria, limitada a regiões costeiras tropicais (Vousdoukas et al., 2007), mas também há registros em zonas temperadas (Kneale e Viles, 2000; Rey et al., 2004; Arrieta et al., 2011).

Os polimorfos de carbonato de cálcio, aragonita e calcita com baixo (LMC) ou alto teor de magnésio (HMC) são os cimentos mais comumente descritos em formações de *beachrocks*. A precipitação dos carbonatos ocorre em função da alcalinidade e da disponibilidade de cátions de cálcio (Ca<sup>2+</sup>), que combinados caracterizam o índice de saturação dos carbonatos. A predominância dos polimorfos de carbonato de cálcio é determinada com relação a condições físico-químicas (temperatura, pH, salinidade e abundância de Mg) ou microbiológicas (atividades metabólicas como fotossíntese, respiração e degradação de matéria orgânica) que influenciam na alcalinidade, além dos processos genéticos envolvidos (Neumeier, 1999; Gischeler, 2007; Emerson e Hedges, 2008; Dupraz et al., 2009).

A ocorrência dos *beachrocks* é comum no cenário costeiro brasileiro, onde o primeiro estudo registrado foi feito por Darwin em 1841 (Cabral Neto, 2011). A maior concentração ocorre nas regiões costeiras continentais do Nordeste (e.g. Cabral Neto et al., 2010, 2013; Guimarães et al., 2016; Vieira et al., 2017) e Sudeste (e.g. Castro et al., 2014; Silva et al., 2014) do país. Nas ilhas oceânicas brasileiras, exposições de *beachrocks* só foram observadas e descritas brevemente na Ilha da Trindade - IT (e.g. Almeida, 1961; Angulo et al., 2018) e em Fernando de Noronha (Calliari et al., 2016).

A importância dessas rochas está associada principalmente a estudos de impacto e evolução costeira (Cooper, 1991), ao seu papel como indicador de nível do mar (Hopley, 1986; Angulo e Souza, 2014), a estudos dos processos

de cimentação por carbonatos em águas rasas (Longman, 1980) e na mitigação de problemas de erosão costeira (Danjo e Kawasaki, 2013, 2014; Daryono et al., 2020).

Apesar de diversos estudos realizados no mundo (Vousdoukas et al., 2007; Arrieta et al., 2011; Danjo e Kawasaki, 2014), os processos responsáveis pela formação dos *beachrocks* por cimentação carbonática ainda são discutidos, podendo ser tanto de natureza físico-química quanto biológica (organomineralização). Dentre as hipóteses mais comuns encontradas na literatura estão a mistura de águas marinhas e meteóricas (Moore, 1973), desgaseificação do CO<sub>2</sub> (Gischeler, 2007), evaporação (Hanor, 1978) e atividade biológica direta ou indireta (Neumeier, 1999; Webb et al., 1999; McCutcheon et al., 2016).

Entre os organismos capazes de auxiliar na precipitação de carbonatos e, portanto, no processo de cimentação, estão as 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 e processos biológicos.

A pesquisa, cujos resultados são aqui apresentados, foi desenvolvida com o intuito de compreender os processos e padrões da gênese de *beachrocks* da ilha oceânica da Trindade, formados durante o Pleistoceno Superior e o Holoceno.

## ÁREA DE ESTUDO

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 km<sup>2</sup> de área e cerca de 7 km de diâmetro (Calliari et al., 2016). Sua origem é relacionada à evolução da cadeia meso-oceânica do Atlântico Sul,

emergindo como parte de cadeias vulcânicas orientadas em direção leste-oeste (Almeida, 2006).

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 (Weaver, 1990). A série vulcânica de Trindade, tal como a de Fernando de Noronha, se caracteriza por ser altamente sub-saturada em SiO<sub>2</sub> e acentuadamente sódico-alcalina, mais inclusive que Fernando de Noronha. Trindade constitui uma das séries oceânicas mais sódicas, senão a mais sódica do mundo (Almeida, 2002).

O relevo entre as faces nordeste e sudoeste da ilha tem características diferentes. A sudoeste, as vertentes voltadas para os morros fonolíticos tem declive suave, quase coincidentes com a face original do cone vulcânico. Enquanto a região nordeste 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. 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 dife-

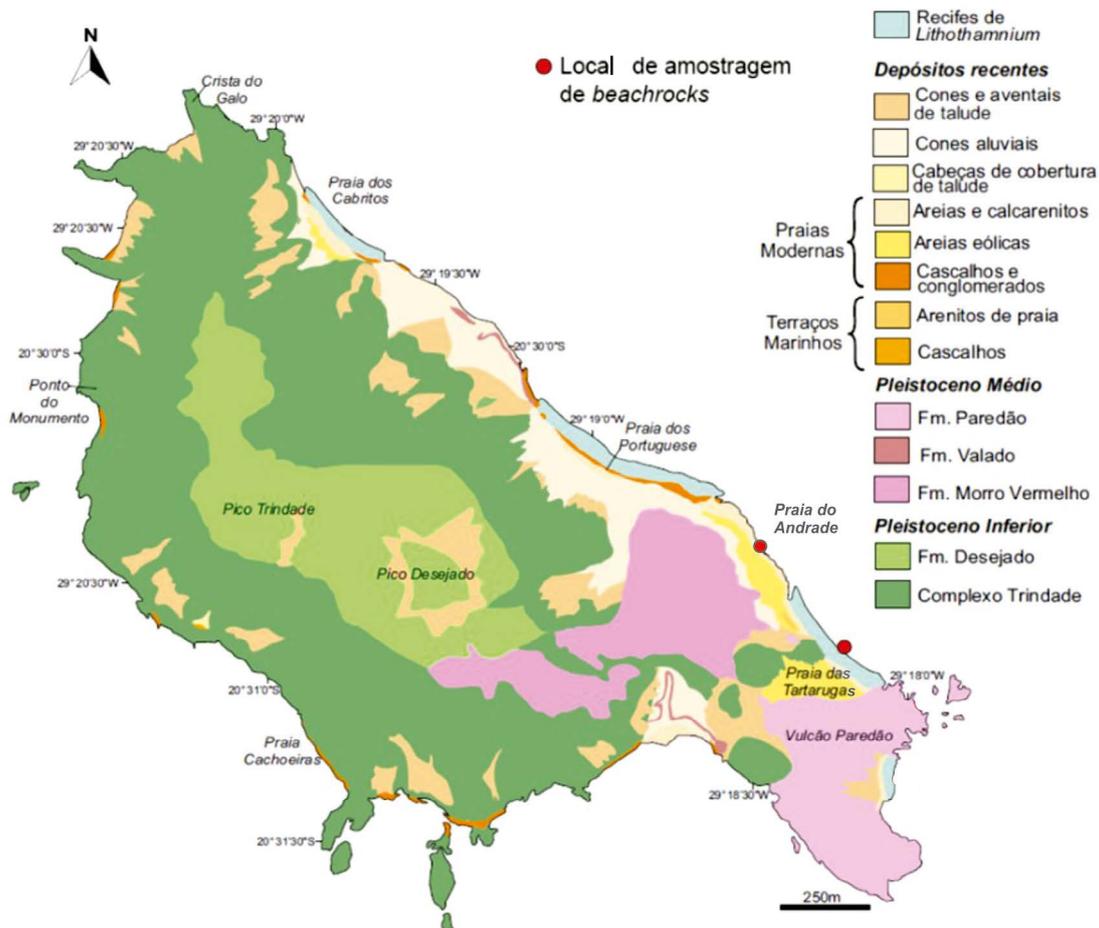
renciada (Almeida, 1961; Castro e Antonello, 2006).

Os depósitos holocênicos correspondem à uma pequena parcela das unidades estratigráficas ocorrentes na ilha. No mapa geológico da ilha da Trindade, Almeida (1961) discriminou nove tipos de depósitos quaternários, agrupados em quatro unidades:

- praias modernas (areias e calcarenitos; cascalhos e conglomerados; recifes de *Lithothamnium*; areias eólicas);
- aluviões (cones aluviais);
- depósitos de taludes (cones e aventais de talude; cabeças de cobertura); e
- depósitos de terraços marinhos (arenitos de praia; cascalhos).

Angulo et al. (2018) reordenaram tais depósitos em oito tipos, como depósitos de:

- talus;
- leques aluviais;
- areias de praias recentes;
- cascalhos de praias recentes;
- arenitos;
- cascalhos de praias antigas;
- recifes algálicos;
- eólicos. (Figura 1).



Modificado de: Almeida (1961), Pires e Bongioiolo (2016) e Angulo et al. (2018).

**Figura 1.** Mapa geológico da ilha da Trindade, com indicações dos locais de amostragem.

Segundo Calliari et al. (2016), apenas 24% da linha de costa (5,1 km) é constituída por praias de areia e cascalho. Dentre elas, as de maior volume de sedimentos situam-se nas regiões nordeste e sudeste da ilha: Cabritas, Calheta, Andrada, Tartarugas, Vermelha/Túnel e Príncipe. Os depósitos são compostos por fragmentos de algas calcárias, provenientes de bancos de recife, compondo entre 19 e 66% dos sedimentos, e por minerais pesados com porcentagens entre 30% (Praia da Calheta) e 63% (Praia do Príncipe).

De modo geral, os sedimentos das praias da IT são caracterizados por depósitos de *placeres* (minerais pesados) em camadas lenticulares (Castro e Antonello, 2006). A energia do espraiamento das ondas promove a seleção hidráulica das partículas de acordo com a densidade dos grãos, produzindo acúmulo de minerais pesados na parte superior da face praial (Castro, 2010).

O processo deposicional é resultado do transporte sedimentar de curta distância entre as rochas-fonte e as praias (Castro e Antonello, 2006). Os recifes de algas calcárias na zona de surfe também funcionam como fontes de material particulado que compõem os sedimentos praias, assim como de proteção aos mesmos, pois também influenciam na energia e circulação hidrodinâmica (Calliari et al., 2016).

Segundo Castro (2010), na Praia do Andrada, os derrames de analcita-anakaritró (Formação Morro Vermelho) posicionam-se na zona de arrebentação como uma barreira natural às ondas. Na face praial, retaguarda dos derrames, os sedimentos caracterizam-se por granulação areia média a grossa, sendo constituídos por olivinas, magnetitas, piroxênios, biotitas, anfibólios e rutilo.

Nas praias do Túnel, Tartarugas, Portugueses e Cabritos, a composição dos sedimentos reflete a composição mineral das rochas adjacentes (piroclastos de fonólito e tufos vulcânicos), com magnetitas — presentes em 90% das amostras —, concreções hematíticas, zircão e rutilo (depósitos de *placeres*) (Castro, 2010).

Em Tartarugas, praia mais larga da ilha — de cerca de 80 metros — são encontradas camadas com altas concentrações de minerais pesados, de 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).

Almeida (1961) descreveu afloramentos de *beachrocks* na face praial das praias das Tartarugas e de Andrada, cerca de 3,5 m acima do nível médio do mar, considerando que essas rochas formaram-se com nível do mar mais alto que o atual. Angulo et al. (2018) descreveram *beachrocks* na face praial das Tartarugas, com laminação plano-paralela, de arcabouço constituído por litoclastos e bioclastos (principalmente fragmentos de algas calcárias) nas frações areia média a grossa, cimentado por aragonita acicular e, em alguns casos, por calcita equigranular.

Segundo Angulo et al. (2018), as lajes de *beachrocks* na IT ocorrem a sudeste da ilha. As praias arenosas de Andrada e Tartarugas 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. São constituídos de arenito conglomerático com componentes terrígenos e bioclásticos, cimento carbonático e laminação plano-paralela com mergulho de ~13° para leste. Os bioclastos ali encontrados são principalmente fragmentos de recifes de algas calcárias. A laminação plano-paralela sub-horizontal foi considerada como feições planas geradas pelo espraiamento e recuo das ondas na face praial.

O clima predominante na IT é o denominado Oceânico Tropical (Mohr et al., 2009), com distribuição regular de chuva ao longo do ano. O mês de novembro é o mês mais chuvoso, acumulando, em média, 215 mm, seguido do mês de outubro, com 186 mm. Os meses mais secos são janeiro e fevereiro, com acumulado médio de 64 mm (Pedroso et al., 2017).

A IT tem regime de micromaré semidiurna, de amplitude de 1,3 m (Calliari et al., 2016). A incidência das ondas é mais intensa nos setores leste e sudoeste da ilha, onde as ondas, provenientes de águas profundas têm pouca dissipação de energia sobre a estreita plataforma ilha, que possui apenas 1 km de largura até a cota batimétrica de 100 m (Calliari et al., 2016).

## MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de arenitos de praia foram obtidas nas praias das Tartarugas (TR1 até TR5) e do Andrada (TR6, Figura 1) expostos na face praial (Figura 2). Para as análises foram confeccionadas 24 seções delgadas de amostras, impregnadas com resina epóxi tingida com corante azul de Oracet B, para auxiliar na determinação e quantificação do espaço poroso. As lâminas foram analisadas com microscópio óptico de luz polarizada transmitida (Leica DMLP), com intuito de descrever e quantificar características texturais e composicionais do arcabouço, matriz, porosidade e cimentos, para caracterização petrográfica e identificação de processos diagenéticos. Os hábitos dos cimentos foram classificados segundo a nomenclatura de Folk (1974) e Flügel (2010). 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. As descrições foram realizadas conforme Scholle e Ulmer-Scholle (2003).

Microtexturas, hábitos minerais, modo de preenchimento de poros por cimentos, relações entre componentes e porosidade das amostras foram analisados com microscópio eletrônico de varredura (MEV) TESCAN VEGA3 LMU. As amostras foram preparadas com fragmentos com fraturas frescas, de cerca de 1 cm<sup>3</sup>, e metalizados com ouro. A composição química de minerais e cimentos foi determinada com contagem de emissão de elétrons secundários e espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS) com detector SDD de 80 mm<sup>2</sup>, com resultados processados com o programa Mex da Alicona e com o *software* AZ Tech (*Advanced*).

## RESULTADOS

### Características gerais

Os *beachrocks* das praias das Tartarugas (Figura 2) e Andrada ocorrem em forma de lajes, com laminação plano-paralela e mergulho suave de  $\sim 13^\circ$  para leste em rumo ao mar. Na face superior exposta das lajes observa-se a laminação associada com marcas onduladas. Em muitas áreas, principalmente nos limites externos, ou onde a inclinação é mais acentuada, é possível observar fraturamento na rocha e ocorrência de grandes blocos isolados (Figura 2).

A desarticulação das lajes de *beachrock*, como resultado da ação gravitacional, inicia-se com a remoção e deslocamento dos sedimentos inconsolidados da base, onde as ondas erodem o embasamento seguido do solapamento e acomodação dos blocos.

Os *beachrocks* da IT, expostos nas praias das Tartarugas (TR1, TR2, TR3, TR4 e TR5) e do Andrada (TR6) são arenitos de granulação média a grossa (Figura 3), de tamanho, composição e forma similar aos sedimentos inconsolidados presentes na face praial, com contatos pontuais entre grãos. Apresentam cimento de carbonato de cálcio, em polimorfos de aragonita ou calcita magnesiana.

Em média, os arenitos apresentam 60 a 70% arcabouço, 30 a 40% de cimento e 5 a 10% de poros. O arcabouço é composto por grãos pobremente selecionados, de fragmentos líticos de rochas vulcânicas, fragmentos de *beachrocks* (autólitos), minerais pesados, como zircão e rutilo. Os bioclastos descritos são fragmentos de algas vermelhas (Figura 4D), equinodermos (Figura 4C), gastrópodes, esponjas, bivalves, foraminíferos (Figura 4A) e cocolitoforídeos. Os espaços intergranulares são parcialmente preenchidos, com cimento carbonático, em sua maioria de aragonita.

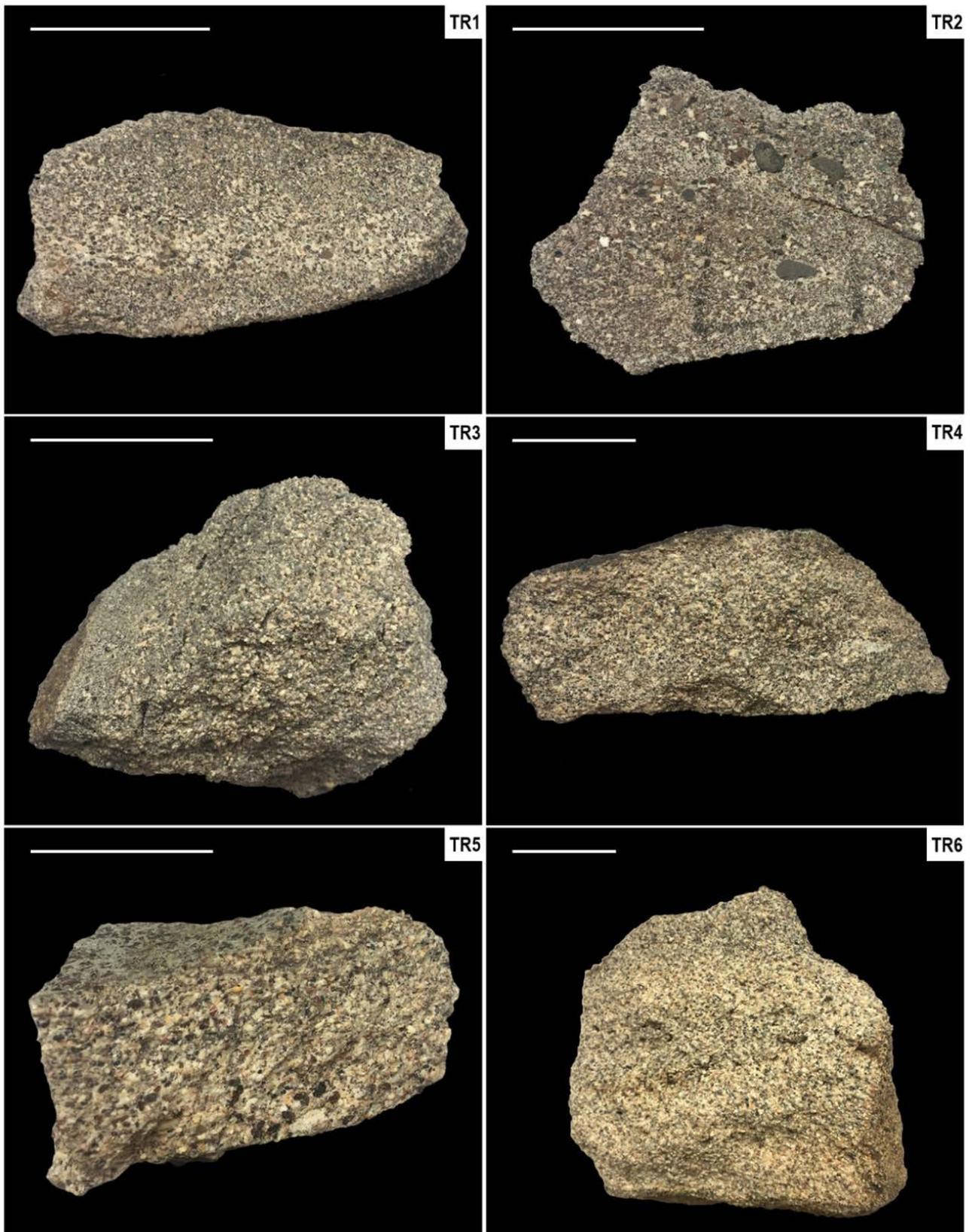
### Características diagenéticas

As seis amostras analisadas apresentaram uma grande variedade de feições de processos diagenéticos, principalmente a cimentação por envelopes de calcita magnesiana micrítica e franjas isópacas de aragonita acicular.

Nos *beachrocks* da IT, os cimentos carbonáticos são predominantemente polimorfos de aragonita e calcita magnesiana, com texturas micrítica, com hábito acicular no entorno de grãos, e preenchendo espaços intergranulares. Outras feições identificadas foram substituição de grãos terrígenos e revestimento de poros por clorita e biofilmes.



**Figura 2.** Exposição de *beachrocks* na praia das Tartarugas, ilha da Trindade, onde se observa laje com laminação plano-paralela inclinada para o mar, exposta em maré baixa.



**Figura 3.** Amostras de *beachrocks* utilizadas para análises petrográficas; compostas por grãos das frações areia média a grossa. As barras brancas no canto superior das imagens correspondem a 5 cm.

Envelopes micríticos foram considerados nesse estudo como cimentos microcristalinos de carbonato de cálcio, predominantemente na forma de calcita com alta concentração de magnésio ( $Mg > 1,2\%$  em peso), tanto preenchendo o espaço intergranular, quanto revestindo grãos (Figura 5B). Formam uma primeira fase de cimentação nos *beachrocks* da IT. Apresentam cristais menores que  $5\ \mu m$  (Figura 5C), formando faixas irregulares e descontínuas de cor marrom escuro não luminescente ao redor dos grãos, com espessuras entre  $25$  e  $100\ \mu m$ . Normalmente, estes depósitos são cobertos por uma segunda fase, composta de aragonita acicular (Figura 5D). Resultados de EDS mostraram que os envelopes são constituídos por Ca, C, O, Mg, Fe, Al, Si, Na, Ti e Sr. Os quatro primeiros totalizam mais de  $97\%$  da contagem, com o registro dos demais elementos apenas em quantidades traço.

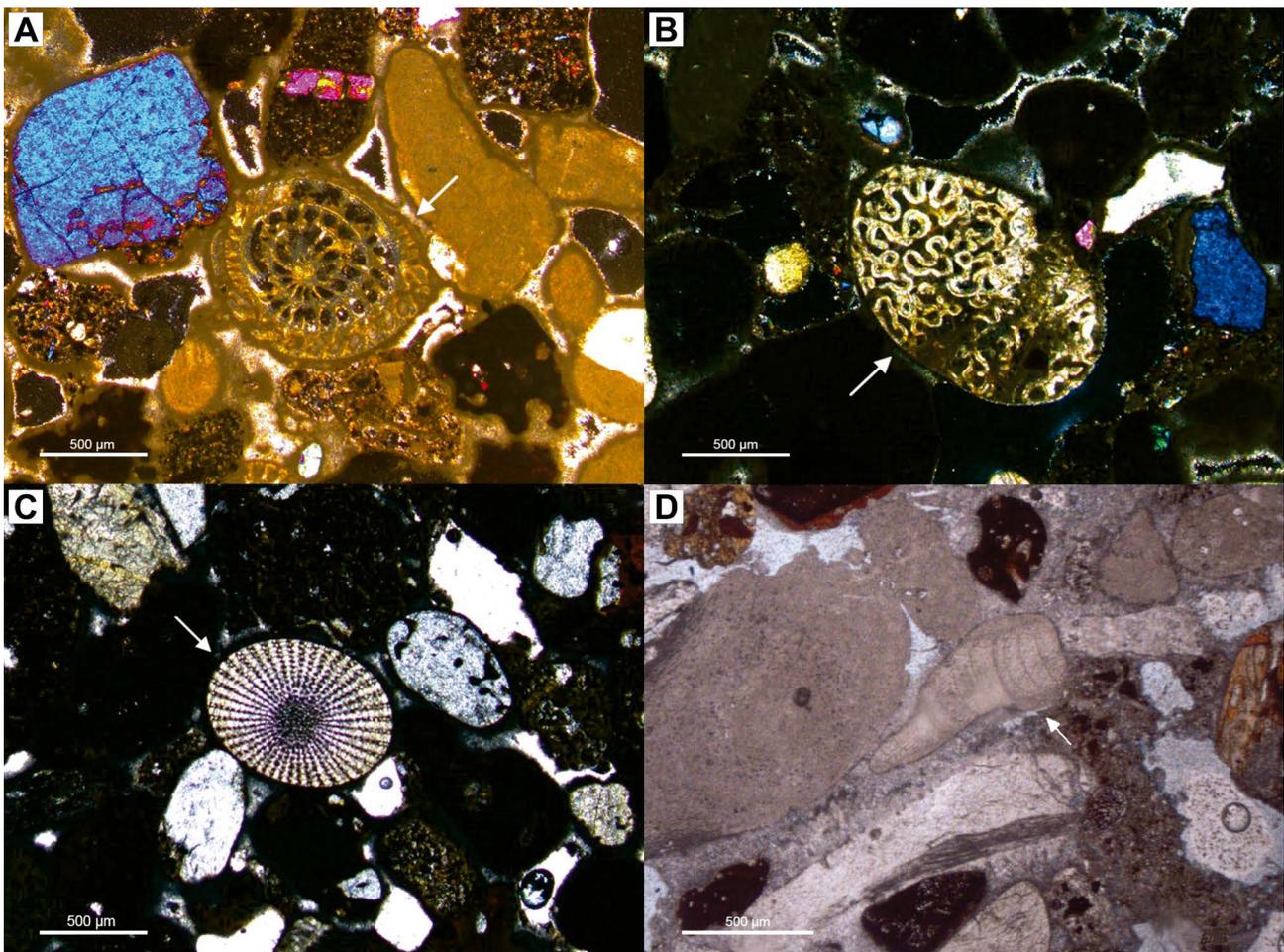
Aragonita acicular é o cimento mais comum nos *beachrocks* da IT, sendo encontrado em todas as amostras analisadas. Esse tipo de cimento ocorre na forma de franjas isópacas cristalinas, revestindo grãos terrígenos (Figura 6A) ou bioclásticos (Figura 6B), e preenchendo o espaço intergranular de maneira desordenada. Os cristais de ara-

gonita são alongados, em forma de agulha, com larguras menores que  $10\ \mu m$  e comprimento variando entre  $20$  e  $100\ \mu m$ , predominando valores de  $50\ \mu m$  (Figura 6D). Eles se desenvolveram de forma radial com orientação perpendicular ao substrato (Figura 6C). Cimento de aragonita, ocasionalmente, ocorre também sobreposto a envelopes micríticos de calcita magnésiana (Figura 7A).

Em alguns casos, a aragonita pode ser encontrada como cristais lamelares, com bases mais largas ( $> 10\ \mu m$ ) e terminações menos pontiagudas (Figuras 7C e 7D).

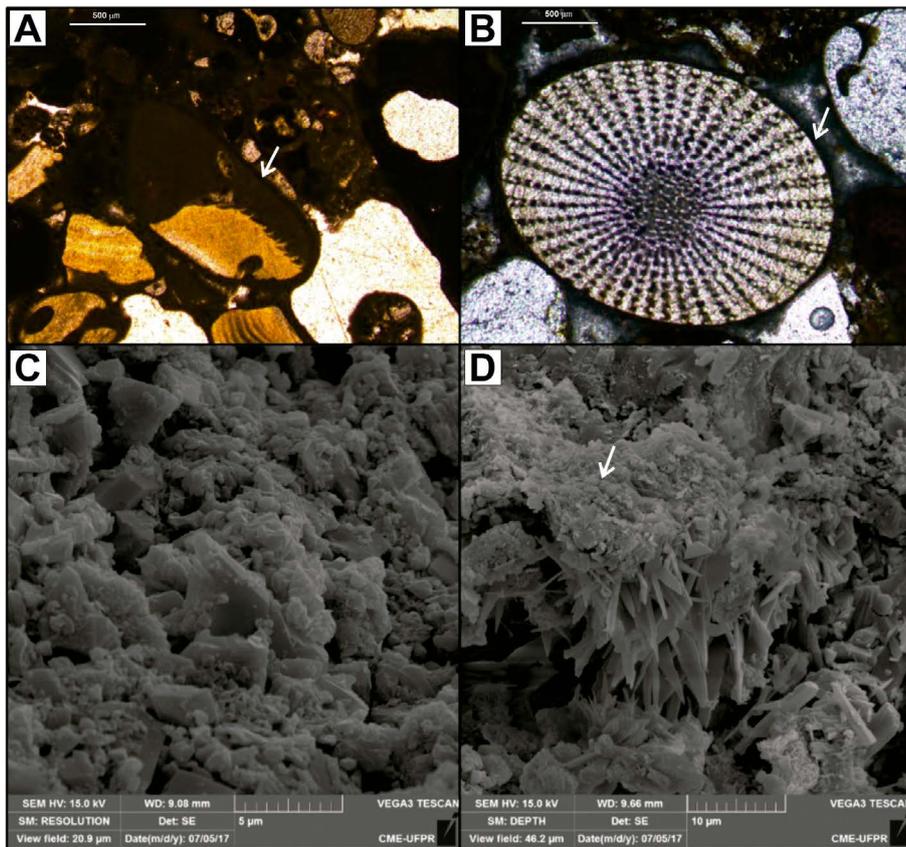
Diferentemente do observado para os envelopes micríticos, as franjas aciculares são compostas quase que unicamente por Ca, C e O ( $> 97\%$ ).

Clorita foi observada em forma de rosetas (Figura 8D), preenchendo poros secundários de grãos terrígenos alterados por dissolução (Figuras 8A e 8B) ou como substituição de minerais (Figura 8C). Apresenta cristais de aproximadamente  $2$  a  $5\ \mu m$ . Quando ocorrem preenchendo poros secundários, seus cristais aumentam em tamanho relativo em direção ao interior do poro (Figura 8D). Algumas vezes, cristais de clorita ocorrem sobre o cimento aragônico acicular (Figura 9B), e em associação com calcita



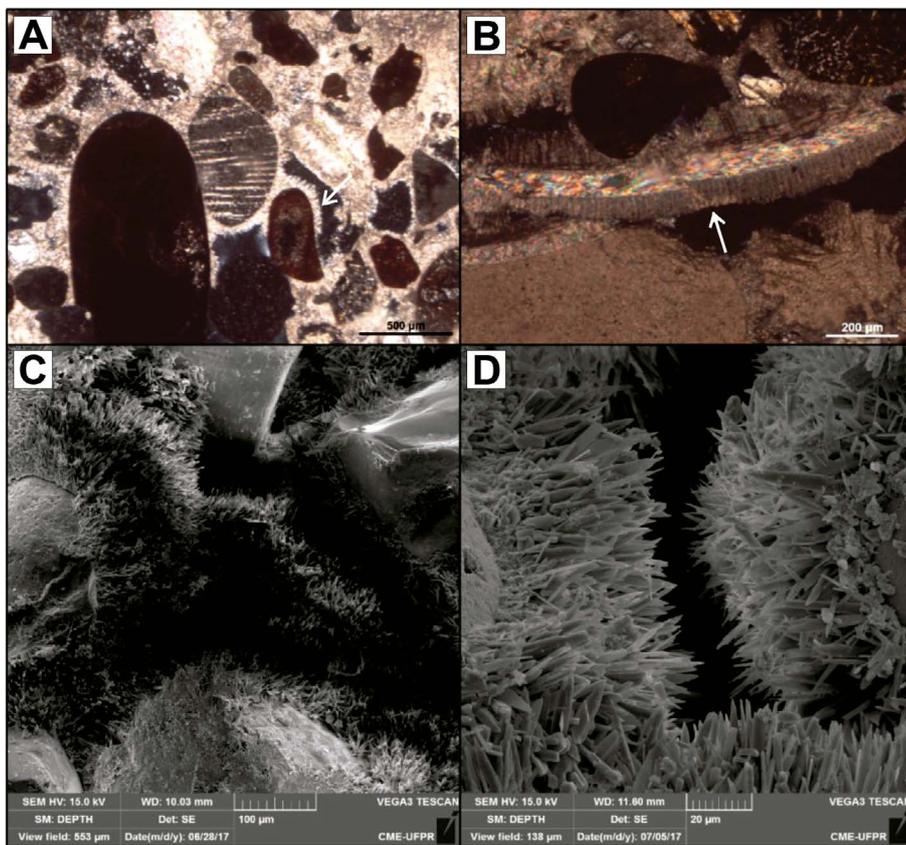
Amostra TR2: fotomicrografias obtidas com microscópio ótico de luz transmitida (A, B e C com polarizadores cruzados, e D, paralelos).

**Figura 4.** Bioclastos encontrados nos *beachrocks* da ilha da Trindade, indicados pelas setas: A) foraminífero; B) briozoário; C) equinodermo; D) fragmento de alga vermelha.



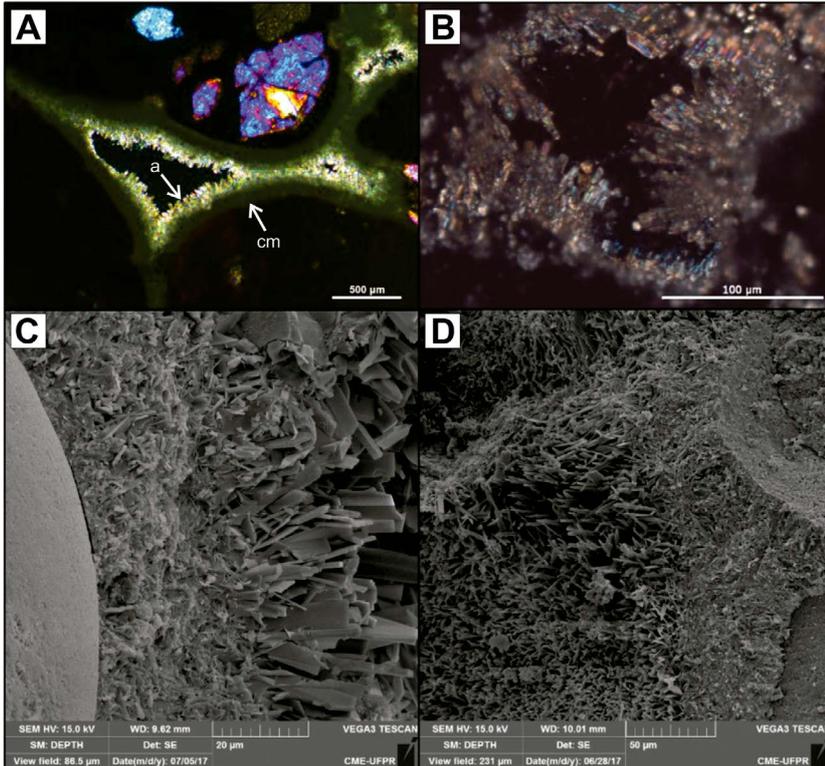
Imagens referentes à amostra TR2: A e B – fotomicrografias obtidas com microscópio ótico de luz transmitida, com polarizadores cruzados; C e D – imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 5.** Textura de calcita magnesiania microcristalina encontrada nos *beachrocks* da ilha da Trindade. As setas brancas indicam: A) envelope microcristalino escuro ao redor de bioclasto; B) calcita micrítica revestindo equinodermo; C e D) detalhes da constituição do revestimento, formado por cristais de calcita menores que 5 µm.



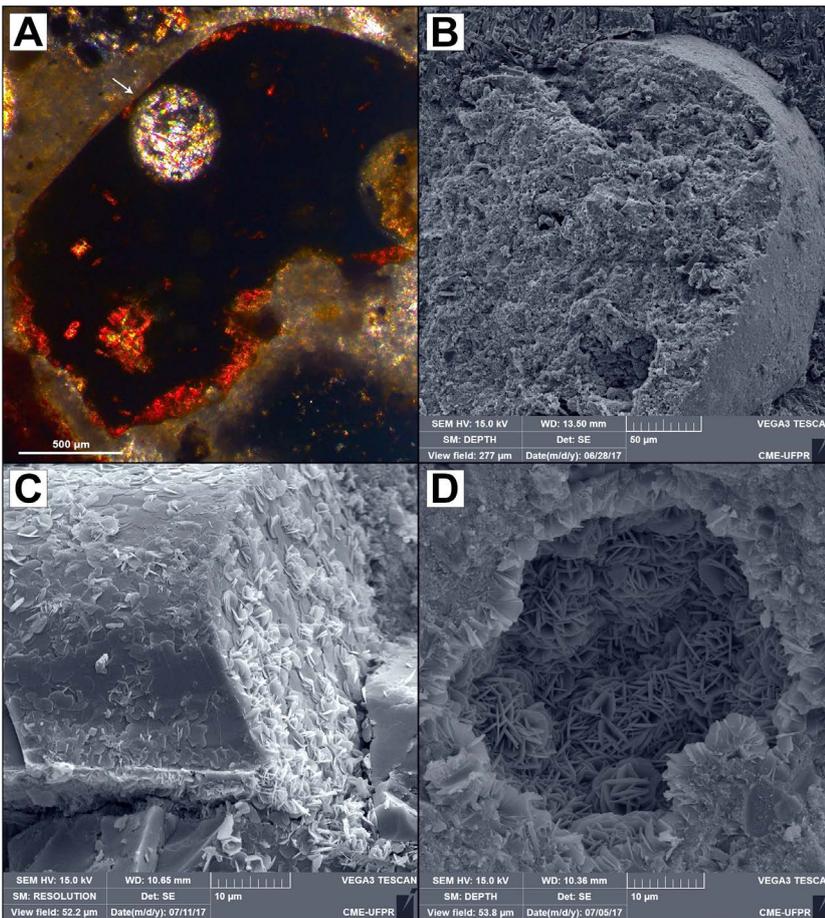
Amostras TR2 (A e B) e TR3 (C e D): A e B – fotomicrografias obtidas com microscópio ótico de luz transmitida com polarizadores cruzados; C e D – imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 6.** Textura de aragonita acicular encontrada nos *beachrocks* da ilha da Trindade. A) aragonita revestindo poros de grãos terrígenos alterados e bioclastos (seta); B) franja de aragonita revestindo um fragmento de molusco (seta); C e D) detalhes obtidos com MEV, com cristais de aragonita em formato de agulhas revestindo os grãos e preenchendo o espaço intergranular.



Amostras TR1 (B e D) e TR2 (A e C); A e B – fotomicrografias obtidas com microscópio ótico de luz transmitida com polarizadores cruzados; C e D – imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 7.** Textura de aragonita acicular identificada nos *beachrocks* da ilha da Trindade. A) aragonita (a) associada a uma fina camada escura de calcita magnesiânica microcristalina (cm), revestindo grãos; B) detalhe de textura de aragonita acicular; C e D) detalhes dos cristais de aragonita acicular associado a textura micrítica.



Amostras TR1 (B e C) e TR2 (A e D); A – fotomicrografia obtida com microscópio ótico de luz transmitida com polarizadores cruzados; B, C e D – imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 8.** Clorita encontrada nos *beachrocks* da ilha da Trindade. A) clorita revestindo poro secundário de mineral indeterminado, alterado; B) detalhe de grão terrígeno alterado por dissolução; C) calcita revestida por clorita; e D) detalhe de poro revestido por rosetas de clorita, com crescimento maior dos cristais ao centro da cavidade.

magnesiana microcristalina (Figura 9A), biofilme (Figura 9C) e cocolitoforídeos (Figuras 9C e 9D).

Nas amostras analisadas com EDS, os cristais de clorita apresentaram Ca, O, C, Mg, Si, Fe e Al (Tabela 1) em todas elas. Os grãos terrígenos alterados, onde há formação de clorita, são compostos por Si, O, Al, Fe, Ca, Na, Mg, Ti.

Pseudo-pelotilhas são constituídas por aglomerados esféricos ou subsféricos, com um diâmetro médio de 10  $\mu\text{m}$  e máximo 20  $\mu\text{m}$  (Figuras 10B e 10C). Seus cristais são formados por calcita com alto teor de magnésio ( $\text{Mg} > 1,2\%$  em peso), de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . Além dos seus constituintes principais (Ca, O, C e Mg), ocorrem Fe, Al, Na, Si, Ti, Cl e Sr em quantidades traço. As pseudo-pelotilhas foram encontradas de maneira variada, sobrepondo franjas de aragonita acicular (Figuras 10A e 10C), agregadas a camadas de biofilme (Figuras 10A – 10D) e, algumas vezes, sobre cristais e rosetas de clorita e bioclastos.

## DISCUSSÃO

As feições diagenéticas identificadas registram processos variados, e em diversas escalas. Diferentes tipos de cimento podem ocorrer combinados nos *beachrocks* da IT, indicando a complexidade envolvida na formação destas rochas.

A composição do arcabouço dos *beachrocks* da IT reflete claramente a constituição mineral das rochas-fonte adjacentes. A baixa seleção encontrada explica-se pelo trans-

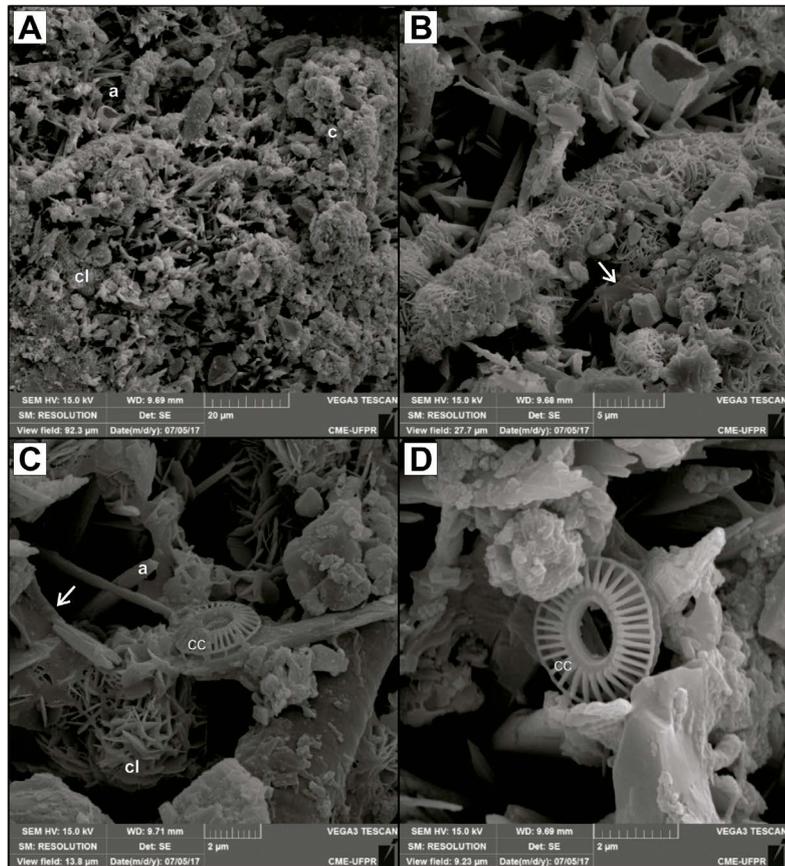
porte de curta distância da área fonte (Castro e Antonello, 2006) e por ambiente de alta energia de ondas. Nas regiões leste e sudeste da IT as ondas de alta energia têm pouca dissipação, em estreita plataforma (Calliari et al., 2016).

A cimentação por  $\text{CaCO}_3$  na IT ocorre nas praias formadas por areia média a grossa, independente da constituição mineral do arcabouço.

Segundo o modelo eogenético proposto por Longman (1980), cimentos de aragonita (hábito acicular) e calcita com alto teor de magnésio (acicular ou micrítica) são comumente precipitados inorgânicos da água do mar em ambiente freático ou marinho vadoso. Com relação à calcita magnesiana com hábito microcristalino, sua precipitação tem sido proposta como produto residual de atividade metabólica microbológica (Neumeier, 1999; Webb et al., 1999).

A posição atual de ocorrência das lajes de *beachrocks* (Figura 2), sua associação com marcas onduladas e com texturas de cimentos de calcita de alto teor de magnésio e aragonita, se enquadram no modelo de Longman (1980), de litificação em zona intermarés.

A formação dos *beachrocks* ocorre no estágio eodiagenético (Figura 11), conforme indica o tipo dominante de contato pontual entre grãos e predomínio de porosidade primária, característicos de baixo grau de compactação mecânica ou empacotamento. Os sedimentos não foram submetidos a soterramento, nem a processos de compactação severa, indicando que sua cimentação ocorreu em ambiente

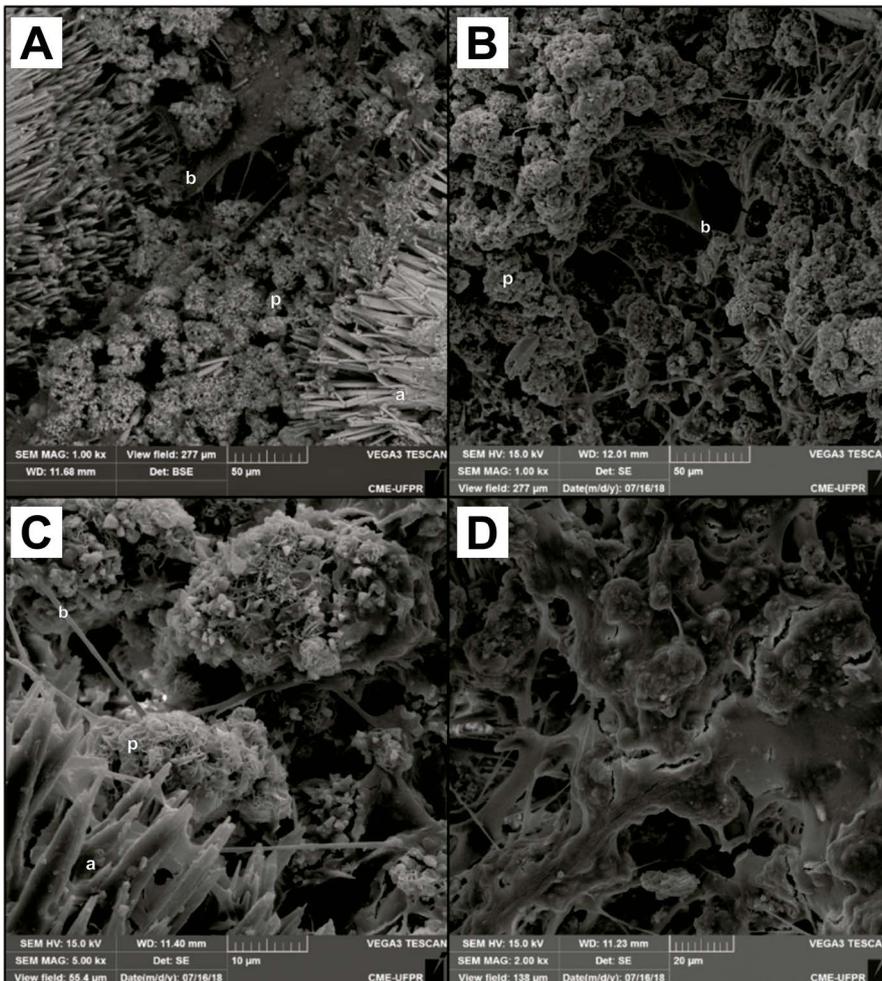


Amostra TR2: Imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 9.** A) associação entre aragonita acicular (a), clorita (cl) e calcita magnesiana microcristalina (c) em pseudo-pelotilhas; B) estruturas biogênicas revestidas por clorita, sobrepondo cimento acicular e registro de biofilme (seta); C) detalhe de biofilme (seta) associado a clorita (cl), aragonita acicular e fragmento de cocolitoforídeo (cc); D) fragmento de cocolitoforídeo (cc) agregado a camada de biofilme, juntamente com cristais de calcita.

**Tabela 1.** Composição dos cristais de clorita dos *beachrocks* da ilha da Trindade, obtida por EDS.

Amostras	Elementos (% em peso)									
	Ca*	O*	C*	Mg	Si	Fe	Al	Cl	Ti	Na
Clorita	7,6	37,9	19,9	7,3	10,3	7,9	5	-	3,4	0,7
	1,5	42,4	18,1	19	0,8	4,5	11,4	2,3	0,5	-
	0,7	44,8	18,7	15,6	6,7	4,1	8,3	0,7	-	-
	0,4	49,7	16,8	16	5,2	2,8	8,2	0,8	0,6	-
	0,7	52	14,6	16,3	4,9	2,5	7,9	0,5	3,5	-
	3,9	41,7	12,9	12,8	4	14,5	6,2	0,6	0,7	-
	1,3	48,4	16,9	14,7	4,6	5,6	7,1	0,8	-	-
	0,8	48,4	16,7	16,3	6,1	2,9	8,2	0,6	-	-
	0,4	53,1	13,6	15,4	5,8	2,5	7,4	0,6	1,5	-
	4,4	38	23,4	12	8,3	5	6,7	0,7	-	-
TR4	9,29	62,3	15,38	7,55	0,34	0,41	3,39	0,85	-	0,25
	3,49	55,5	16,05	11,99	2,9	1,88	5,76	1,35	0,37	0,38
	0,75	56,82	15,26	14,68	0,42	0,92	7,27	2,99	-	0,42
	0,37	61,16	20,27	10,25	0,09	0,27	4,79	2,55	0,07	-
	19,29	49,17	14,35	4,22	3,49	2,3	2,5	2,07	0,85	1,22
	18,08	46,67	15,91	4,7	3,18	2,05	3,05	3,91	0,76	1,07
TR5	12,04	50,27	13,05	5,61	3,75	6,97	2,8	1,45	2,25	1,51

\* Possível efeito de interferência de material adjacente (CaCO<sub>3</sub>).

Amostra TR5: imagens de MEV (elétrons secundários).

**Figura 10.** A) agulhas de aragonita (a) autigênica, sucedidas por formação de pseudo-pelotilhas (p) e biofilme (b); B) pseudo-pelotilhas (p) de calcita magnesiana associadas a biofilme (b); C) detalhe de pseudo-pelotilhas (p) sobrepondo-se a cristais de aragonita acicular (a) associadas a biofilme (b); e D) detalhe de pseudo-pelotilhas revestidas por biofilme.

Processos diagenéticos		Eodiagênese		
		inicial	Ambiente freático marinho ativo	tardio
Compactação	mecânica	—————		
Cimentação	calcita Mg microcristalina	—————		
	aragonita acicular	.....		
	pseudo-pelotilhas de calcita Mg	—————		
	clorita	.....		
Dissolução	grãos terrígenos	.....		
Organomineralização	biofilme	.....		

**Figura 11.** Evolução diagenética dos *beachrocks* da ilha da Trindade. Os segmentos tracejados indicam incertezas sobre a ocorrência do processo.

subsuperficial, possivelmente, como o resultado da cimentação rápida (Hopley, 1986).

Assim como identificado em outros *beachrocks* (Ginsburg, 1953; Strasser et al., 1989; Vieira e De Ros, 2006; Teng e Shen, 2008), o cimento de aragonita com hábito isópaco ou de calcita magnesiana acicular, também são predominantes na IT, indicando predomínio de precipitação em zona marinha freática ativa como o produto da ação das ondas e marés na face praial. Na IT, apesar de algumas franjas de aragonita terem se desenvolvido diretamente no espaço intergranular, há também ocorrência frequente de aragonita como segunda fase de cimentação, desenvolvida sobre um envelope micrítico (Webb et al., 1999; Neumeier, 1999; Al-Ramadan, 2013).

Em ambiente freático marinho ativo, o espriamento das ondas nos intermarés gera aumento da circulação intersticial da água do mar. A turbulência propicia a saturação dos carbonatos por desgaseificação de CO<sub>2</sub>, resultando na precipitação de cimentos (Longman, 1980) microcristalinos, aciculares e fibrosos (Figura 12).

Segundo McCutcheon et al. (2016) a aragonita derivada de atividade biológica em *beachrocks* é tipicamente enriquecida em Sr. Entretanto, entre as amostras analisadas por EDS neste estudo, apenas a TR4 apresentou quantidades significativas de Sr em seus cimentos. A ausência de estruturas biogênicas associadas diretamente aos cristais de aragonita acicular e a distribuição homogênea das agulhas, revestindo tanto grãos terrígenos quanto bioclásticos, e não unicamente sobre os envelopes de calcita magnesiana micrítica, são indicativos que, nos *beachrocks* da IT, provavelmente, a segunda fase de cimentação não é geneticamente relacionada à organomineralização. Entretanto, se pode descartar a possibilidade de que os cristais de aragonita tenham sido nucleados por organomineralização pois, assim como observado por Lowenstam (1955), agulhas de aragonita também foram descritas como produto de secreção de algas, sendo encontradas de maneira desordenada e com

cristais entre 2 e 9 µm. Braithwaite et al. (2000), também afirmaram que bivalves são capazes de precipitar cimentos carbonáticos com hábitos idênticos a cristais formados de maneira abiótica, de cristais prismáticos e aciculares.

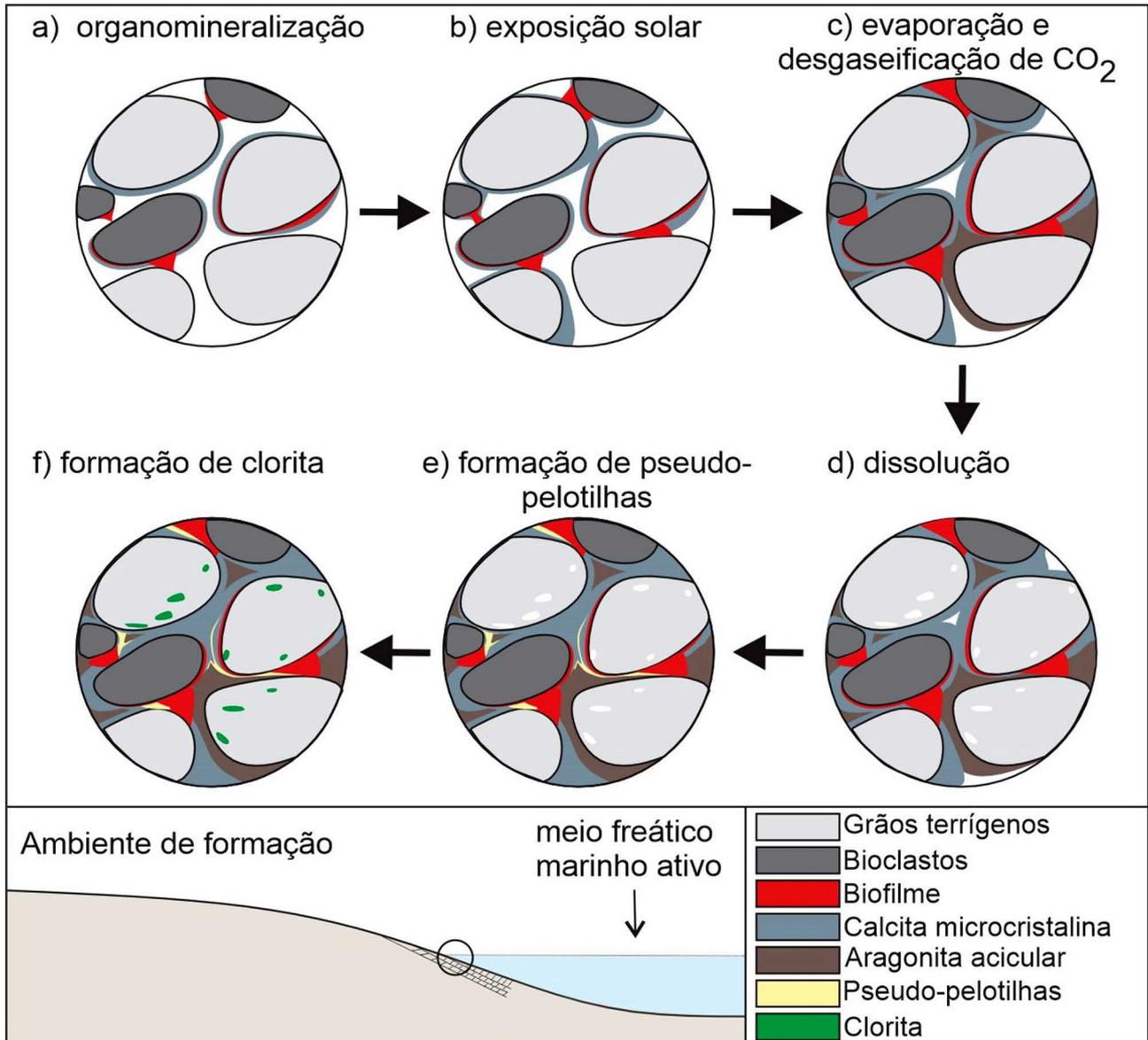
A associação de cimento micrítico com biofilmes, de maneira isolada ou em pseudo-pelotilhas, em uma última fase de cimentação, sobrepondo agulhas de aragonita, sugere que a nucleação desses cimentos pode ter sido controlada ou induzida por atividade microbiológica (e.g. Bathurst, 1966; Amieux et al., 1989; Strasser et al., 1989; Neumeier, 1999; Webb et al., 1999; Kneale e Viles, 2000; Teng e Shen, 2008).

As pseudo-pelotilhas associadas com matéria orgânica na forma de biofilme sugerem participação biológica na precipitação desse tipo de cimento, como segundo casos similares relatados na literatura (e.g. Moore, 1973; Amieux et al., 1989; Vieira e de Ros, 2006).

Em *beachrocks*, em locais com altas concentrações de cátions liberados por atividade microbiológica, os íons seriam rapidamente carregados para fora do sistema pela ação das ondas e marés durante a maré alta. A presença de biofilmes e substâncias poliméricas extracelulares (EPS), entretanto, permite que esses cátions permaneçam retidos no sistema por adsorção (McCutcheon et al., 2016).

A irregularidade nas camadas de envelopes micríticos observadas na primeira fase de cimentação dos *beachrocks* da IT, segundo Neumeier (1999), pode estar relacionada com a diferença de espessura do biofilme presente nos grãos no momento da sua cimentação. As partículas suspensas na água intersticial seriam aprisionadas no biofilme e posteriormente cimentadas por processos bióticos ou abióticos.

A atividade microbiológica na precipitação dos carbonatos era desconsiderada em ambientes rasos de áreas tropicais, posto que a água do mar já seria supersaturada em CaCO<sub>3</sub>. Entretanto, Krumbein (1979), Webb et al. (1999) e mais recentemente McCutcheon et al. (2016) questionaram se a formação dos *beachrocks* está mais intimamente



**Figura 12.** Modelo esquemático de evolução diagenética proposto para os *beachrocks* da ilha da Trindade.

ligada à precipitação físico-química dos carbonatos, por qual razão não é possível evidenciar uma distribuição mais homogênea em praias em que as condições físico-químicas são semelhantes.

Apesar de processos físico-químicos, como evaporação e desgaseificação de CO<sub>2</sub>, serem importantes na indução da precipitação de carbonato, a cimentação nos *beachrocks* seria controlada pela distribuição de matéria orgânica e atividade microbiológica necessária para nucleação, com base, por exemplo, em Neumeier (1999), Webb et al. (1999), McCutcheon et al. (2016).

Considerando um ambiente de alta energia de ondas, torna-se pouco provável que a primeira fase de cimentação, composta por calcita magnesiana micrítica, tenha se desenvolvido de maneira puramente abiótica e físico-química, visto que, para que haja cimentação, é necessário que os sedimentos permaneçam estáveis ao menos por um

período. Mesmo assim, algumas camadas mais profundas de sedimentos, que estariam mais protegidas da ação das ondas e processos erosivos na região entremarés, permanecem inconsolidadas.

Nos modelos de organomineralização de Dupraz et al. (2009), a precipitação por ação biológica poderia ser induzida ou influenciada. A atividade metabólica dos microorganismos pode atuar como mediador, alterando a alcalinidade da água do mar intersticial, favorecendo a precipitação do carbonato à medida que aumenta a saturação. Ou, considerando que a água do mar já é alcalina e supersaturada, a matéria orgânica e/ou biofilme também pode atuar como substrato, promovendo a nucleação do CaCO<sub>3</sub> particulado.

Neumeier (1999) observou que experimentos com biomineralização apresentavam mais precipitados carbonáticos do que os experimentos controlados apenas por fatores abióticos. O modelo utilizado foi inspirado nas mais co-

munas formações de *beachrocks*, em praias com inclinações suaves (5 – 15°) e lajes de 5 – 30 cm de espessura, onde a cimentação ocorreria em uma camada mais profunda coberta por sedimentos inconsolidados. Similar às características dos *beachrocks* da IT, segundo Neumeier (1999), a ausência de luz faria com que houvesse um predomínio de heterotrofismo, que consumiria a matéria orgânica naturalmente disponível na água mar.

Sedimentos de praia inconsolidados na zona intermaré servem de *hábitat* para bactérias heterotróficas litofíticas, que inicialmente ajudariam a estabilizar o depósito praial a partir do biofilme. Elas perfuram os grãos de areia, aumentando a concentração de cátions solúveis nos interstícios. Esses cátions podem ser precipitados posteriormente na forma de cimento, iniciando o processo de estabilização dos sedimentos. Uma vez que a porosidade é reduzida, o espaço disponível como *hábitat* para esses organismos endolíticos também diminui drasticamente, abrindo espaço para maior influência de agentes físico-químicos e fotossintetizantes (McCutcheon et al., 2016).

O consumo e degradação de substâncias poliméricas extracelulares (EPS) por organismos heterotróficos libera íons ligados a elas, por descarboxilação. O aumento da concentração de cátions em solução possibilita a ligação com íons carbonatos e subsequentemente a precipitação dos mesmo em forma de calcita magnesianiana, havendo então a substituição do EPS por calcita (Dupraz et al., 2004).

A ausência de biofilme nas fases iniciais de precipitação da calcita magnesianiana micrítica pode estar associada ao consumo dessa matéria orgânica por bactérias e organismos heterotróficos durante o processo. As últimas fases de cimentação, na forma de pseudo-pelotilhas e micrita, sobrepondo as franjas de aragonita acicular, podem ter influência da luz e de organismos fotossintetizantes, fazendo com que haja a precipitação facilitada do  $\text{CaCO}_3$ .

Assim como observado por Webb et al. (1999), a distribuição de cimentos em fases alternadas, com diferenças em composição e hábitos cristalinos, é governada por parâmetros físico-químicos e principalmente biológicos, que variam temporalmente e espacialmente em escalas pequenas, onde bactérias heterotróficas e fungos teriam maior participação na formação de carbonatos e que cianobactérias (fotossintetizantes) estariam em segundo lugar. Entretanto, para Teng e Shen (2008), as cianobactérias foram os microrganismos predominantes na formação dos *beachrocks* nas ilhas Hainan, em até 10 m de profundidade, em zona intermaré.

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 abundância entre os bioclastos constituintes do arcabouço, são organismos que vivem em águas com salinidade variando entre 33 e 42 ppt (Scholle e Ulmer-Scholle, 2003). As algas vermelhas mais encontradas em *beachrocks* descritos na literatura são as ramificadas, normalmente associadas com ambientes de moderada energia de onda. A ocorrên-

cia 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 (Angulo et al., 2018).

Considera-se, portanto, que nos *beachrocks* formados na IT, com uma inclinação suave da praia rumo ao mar, a litificação teria ocorrido inicialmente na parte mais profunda dos sedimentos e com menor influência de ondas.

Com a incidência de luz limitada, a participação de organismos heterotróficos e do biofilme teriam auxiliado na precipitação e nucleação do  $\text{CaCO}_3$  (Vousdoukas et al., 2007). Após esta fase inicial os *beachrocks* foram expostos pela ação das ondas e erosão de sedimentos não consolidados sobrejacentes. Os grãos, inicialmente imobilizados pela cobertura sedimentar e aprisionados no biofilme, foram submetidos alternadamente às condições marinhas freáticas e marinhas vadosas, entre a preamar e a baixa-mar (Vousdoukas et al., 2007). Sob maior exposição a luz solar e a condições vadosas, a ação físico-química de desgaseificação de  $\text{CO}_2$  e evaporação teriam maior influência, junto a organismos fotossintetizantes, possibilitando o crescimento dos cristais de aragonita acicular em uma segunda fase e pseudo-pelotilhas em uma terceira fase (Vousdoukas et al., 2007).

Embora a clorita singenética não seja comum em sedimentos e rochas sedimentares, tal fato tem sido relatado em estudos mais recentes (e.g. Worden et al., 2020; Šegvića et al., 2020). A identificação de clorita singenética em arenitos de praia da ilha da Trindade é um resultado muito interessante.

A clorita pode ter muitas origens, mas é provável que como revestimento de grãos resulte de diagênese em sistema fechado. As fontes de clorita incluem transformação de berthierina detrítica rica em Fe, transformação de esmectita rica em Mg, reação de caulinita com fontes de Fe e quebra de grãos vulcânicos. A origem específica da clorita controla sua composição, com a clorita em arenitos marinhos tendo uma fonte de berthierina e a clorita em arenitos continentais tendo uma fonte de esmectita. A incorporação de argilas precursoras necessárias para o crescimento da clorita pode ser obtida por uma variedade de processos. Estes ocorrem mais comumente em ambientes marinhos marginais, possivelmente explicando por que as camadas de clorita ricas em Fe são mais comumente encontradas em arenitos marinhos marginais. (Worden et al., 2020).

Uma das hipóteses para o surgimento da clorita autigênica, em forma de cimento preenchendo o espaço intergranular, ou como processo de substituição, está associada à alteração por dissolução de grãos terrígenos provenientes das rochas vulcânicas, que forneceriam íons necessários para a sua formação. A dissolução dos minerais pode ser resultado da ação de águas meteóricas ou até mesmo de atividade microbiológica (Vousdoukas et al., 2007). O fato de a clorita ser encontrada em cavidades junto com cimentos aragoníticos e filmes biológicos pode indicar um ambiente

de formação em zona intermaré mais estagnado. Segundo McCutcheon et al. (2016), os *beachrocks* podem ser um micro-*habitat* para microrganismos endolíticos, o que posteriormente continuaria a favorecer os processos de dissolução e biomineralização a partir da fotossíntese.

É possível que a ocorrência de *beachrocks* apenas nas praias arenosas no sudeste da ilha deva-se à alta energia de ondas, que favorece a degaseificação de CO<sub>2</sub>, associada à presença de recifes de *Lithothamnium*, que servem como barreira hidrodinâmica (Kunkel et al., 2006) e fonte de sedimentos carbonáticos.

## CONCLUSÃO

O estudo de *beachrocks* da ilha oceânica da Trindade indicou a ação de diversos processos diagenéticos, com distribuição de cimentos em fases alternadas e diferenças em composição e hábito cristalino, governada por parâmetros físico-químicos e principalmente biológicos, em pequenas escalas.

Os *beachrocks* estudados são compostos por grãos pobremente selecionados e mineralogicamente similares aos dos sedimentos inconsolidados da face praias.

Os cimentos são de carbonato de cálcio em polimorfos de aragonita e calcita com alto teor de magnésio. A textura mais comum dos cimentos é a de franjas isópacas de aragonita acicular, seguida por envelopes micríticos de calcita com alto teor de magnésio.

As características petrográficas e feições diagenéticas observadas indicam ambiente freático marinho ativo e vadoso, característico de zona intermaré, como contexto genético dos *beachrocks* estudados.

A ocorrência de filmes orgânicos, mesmo que em pequenas quantidades, comprova que a gênese de *beachrocks* não está associada apenas a processos de cimentação de origem físico-química, mas também a processos biogênicos. Entretanto, para resultados mais acurados são necessários estudos microbiológicos, com amostras de fragmentos frescos e fixados para preservação de microrganismos.

Os resultados obtidos permitiram estabelecer a seguinte evolução diagenética para os *beachrocks* da ilha da Trindade (Figuras 11 e 12):

- 1) precipitação de cimento de calcita com alto teor de magnésio, em forma de envelopes micríticos, em meio freático marinho ativo. É formada por organomineralização, possivelmente com influência de microrganismos heterotróficos em camadas mais profundas dos sedimentos inconsolidados, juntamente com ampla circulação de água salina saturada nos interstícios em ambiente intermaré;
- 2) exposição da fase inicial de formação do *beachrock*, quando os sedimentos estariam mais coesos devido à presença do biofilme e ao cimento micrítico. Maior incidência de luz e possivelmente de organismos fotossintetizantes;
- 3) precipitação de cimento de aragonita acicular, também

em meio freático marinho ativo, formando franjas isópacas que revestem os grãos do arcabouço e reduzem o espaço intergranular. A formação e o crescimento desse cimento aparentam ser puramente associados a processos físico-químicos, principalmente de degaseificação de CO<sub>2</sub> e/ou evaporação;

- 4) dissolução de grãos terrígenos provenientes das rochas vulcânicas, podendo estar associada à percolação de águas subsaturadas em CaCO<sub>3</sub> e/ou à ação microbiológica;
- 5) precipitação e formação de pseudo-pelotilhas de calcita com alto teor de magnésio por atividade microbiológica e estabelecimento de micro-*habitat* favorável; e
- 6) precipitação da clorita, devido à liberação de íons de Fe, Mg, Al e Si, por decomposição e lixiviação de íons de grãos de minerais terrígenos.

A ocorrência de clorita singenética em sedimentos e rochas sedimentares não é comum. Sua identificação nos arenitos de praia da ilha da Trindade é um resultado muito interessante.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos laboratórios de Estudos Costeiros e de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar da UFPR pelo suporte laboratorial e acervo petrográfico, em especial ao técnico Daniel Cesar Antunes Paredes; ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR pelo acesso ao microscópio eletrônico de varredura. São gratos à Marinha do Brasil e ao seu programa Protrindade pela possibilidade de acesso, o transporte e o apoio logístico nas pesquisas na ilha. Agradecem às críticas e sugestões dos revisores anônimos, que propiciaram aprimorar o manuscrito. Agradecimentos são devidos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento à pesquisa (Proc. 457714/2013-1), assim como pela concessão das bolsas CNPq de Produtividade em pesquisa aos segundo e terceiro autores, processos 308359/2023-2 e 311837/2022-0, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. (1961). *Geologia e petrologia da Ilha da Trindade. Monografia XVIII*. Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv83805.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2024.
- Almeida, F. F. M. (2002). Ilha de Trindade - Registro de vulcanismo cenozoico no Atlântico Sul. In: Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Queiroz, E. T., Winge, M., Berbert-Born, M. L. C. (Edits.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 1, 369-377. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP). Disponível em: <http://sigep.eco.br/sitio092/sitio092.htm>. Acesso em 8 jan. 2025.

- Almeida, F. F. M. (2006). Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. *Terra e Didática*, 2(1), 3-18. <https://doi.org/10.20396/td.v2i1.8637462>
- Al-Ramadan, K. (2013). Diagenesis of Holocene beachrocks: a comparative study between the Arabian Gulf and the Gulf of Aqaba, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(11), 4933-4942. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1127-7>
- Amieux, P., Bernier, P., Dalongeville, R., Medwecki, V. (1989). Cathodoluminescence of carbonate-cemented Holocene beachrock from the Togo coastline (West Africa): an approach to early diagenesis. *Sedimentary Geology*, 65(3-4), 261-272. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(89\)90028-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(89)90028-6)
- Angulo, R. J., Souza, M. C. (2014). Revisão conceitual de indicadores costeiros de paleoníveis marinhos quaternários no Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 5(2), 1-32. <https://doi.org/10.5380/abequa.v5i2.36533>
- 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., Disaró, S. T., Ferreira, A. G., Martin, C. M. (2018). Quaternary sealevel changes and coastal evolution of the Island of Trindade, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 84, 208-222. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.00>
- Arrieta, N., Goienaga, N., Martínez-Arkarazo, I., Murelaga, X., Baceta J. I., Sarmiento, A., Madariaga, J. M. (2011). 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(1), 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.01.031>
- Bathurst, R. G. C. (1966). Boring algae, micrite envelopes and lithification of molluscan biosparites. *Geological Journal*, 5(1), 15-32. <https://doi.org/10.1002/gj.3350050104>
- Braithwaite, C. J. R., Taylor, J. D., Glover, E. A. (2000). Marine Carbonate Cements, Biofilms, Biomineralization, and Skeletogenesis: Some Bivalves Do It All. *Journal of Sedimentary Research*, 70(5), 1129-1138. <https://doi.org/10.1306/091699701129>
- Cabral Neto, I. (2011). *Beachrocks do Rio Grande do Norte: Correlação entre os depósitos costeiros e os de zona costa-afora com base na faciologia, petrografia e diagênese*. Dissertação (Mestrado). Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/412>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- Cabral Neto, I., Córdoba, V. C., Vital, H. (2010). Petrografia de beachrock em zona costa afora adjacente ao litoral norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 2 (2), 12-18. <https://doi.org/10.5380/abequa.v2i1-2.14116>
- Cabral Neto, I., Córdoba, V. C., Vital, H. (2013). Morfologia, microfaciologia e diagênese de beachrocks costa-afora adjacentes à Costa Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Geociências*, 32(3), 471-490. Disponível em: [https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/32/volume32\\_3.html](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/32/volume32_3.html). Acesso em 8 jan. 2025.
- Calliari, L. J., Pereira, P. S., Short, A. D., Sobral F. C., Machado, A. A., Pinheiro Y. G., Fitzpatrick, C. (2016). Sandy beaches of Brazilian oceanic islands. In: A. D. Short, A. H. F. Klein (Eds.), *Brazilian beach systems* (v.17, 543-571). Boca Raton: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_19)
- Castro, J. W. A. (2010). Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 10(3), 303-319. <https://doi.org/10.5894/rgci170>
- Castro, J. W. A., Antonello, L. L. (2006). Geologia das ilhas oceânicas brasileiras. In: R. J. V. Alves, J. W. A. Castro (Eds.), *Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo* (29-57). Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente. ISBN 978-85-7738-076-3
- Castro, J., Suguio, K., Seoane, J. C. S. (2014). Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(2), 671-683. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420140007>
- Cooper, J. A. G. (1991). Beachrock formation in low latitudes: implications for coastal evolutionary models. *Marine Geology*, 98(1), 145-154. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(91\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0025-3227(91)90042-3)
- Danjo, T., Kawasaki, S. (2013). A Study of the Formation Mechanism of Beachrock in Okinawa, Japan: Toward Making Artificial Rock. *International Journal of GEOMATE*, 5(9), 634-639. Disponível em: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2026>. Acesso em 8 jan. 2025.
- Danjo, T., Kawasaki, S. (2014). Characteristics of Beachrocks: A Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32, 215-246. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9712-9>
- Daryono, L. R., Nakashima, K., Kawasaki, S., Suzuki, K., Suyanto, I., Rahmadi, A. (2020). Investigation of Natural Beachrock and Physical-Mechanical Comparison with Artificial Beachrock Induced by MICP as a Protective Measure against Beach Erosion at Yogyakarta, Indonesia. *Geosciences*, 10(4), 143 <https://doi.org/10.3390/geosciences10040143>
- Dupraz, C., Visscher, P. T., Baumgartner, L. K., Reid, R. P. (2004). Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology*, 51, 745-765. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00649.x>

- Dupraz, C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho A. W., Norman, R. S., Visscher, P. T. (2009). Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96, 141-162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005h>
- Emerson, S. R., Hedges, J. L. (2008). *Chemical Oceanography and the marine carbon cycle*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511793202>
- Flügel, E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>
- Folk, R. L. (1974). The natural history of crystalline calcium carbonate; effect of magnesium content and salinity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 40-53. <https://doi.org/10.1306/74d72973-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Friedman, G. M. (1971) Staining. In: R. E. Carver (Ed.), *Procedures in Sedimentary Petrology* (511-530). New York: Wiley-Interscience. ISBN 047113855X, 9780471138556
- Ginsburg, R. N. (1953). Beachrock In South Florida. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), 85-92. <https://doi.org/10.1306/D4269558-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Gischler, E. (2007). Beachrock and intertidal precipitates. In: D. J. Nash, S. J. McLaren (Eds.), *Geochemical sediments and landscapes* (365-390). Malden: Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470712917.ch11>
- Guimarães, T., Mariano, G., Barreto, A., Sá, A. A. (2016). Beachrocks of Southern Coastal Zone of the State of Pernambuco (Northeastern Brazil): Geological Resistance with History. *Geoheritage*, 9, 111-119. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0181-4>
- Hanor, J. S. (1978). Precipitation of beachrock cements: Mixing of marine and meteoric waters vs CO<sub>2</sub> degassing. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48(2), 489-501. <https://doi.org/10.1306/212F74B4-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Hopley, D. (1986). Beachrock as a sea-level indicator. In: O. van de Plassche (Ed.), *Sea-level Research: A manual for the collection and evaluation of data* (157-173). Norwich: Geo Books. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-4215-8\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-4215-8_6). Acesso em 8 jan. 2025.
- Kneale, D., Viles, H. A. (2000). Beach cement: Incipient CaCO<sub>3</sub>-cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland. *Sedimentary Geology*, 132(3-4), 165-170. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00029-4)
- Krumbein, W. E. (1979). Phototrophic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiology Journal*, 1(2), 139-203. <https://doi.org/10.1080/01490457909377729>
- Kumar, K. S., Chandrasekar, N., Seralathan, P., Sahayam, D. (2012). 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*, 121(3), 733-745. <https://doi.org/10.1007/s12040-012-0183-9>
- Kunkel, C. M., Hallberg, R. H., Oppenheimer, M. (2006). Coral reefs reduce tsunami impact in model simulations. *Geophysical Research Letters*, 33(23). <https://doi.org/10.1029/2006GL027892>
- Longman, M. W. (1980). Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments. *AAPG Bulletin*, 64(4), 461-487. <https://doi.org/10.1306/2F918A63-16CE-11D7-8645000102C1865D>
- Lowenstam, H. A. (1955). Aragonite needles secreted by algae and some sedimentary implications. *Journal of Sedimentary Research*, 25(4), 270-272. <https://doi.org/10.1306/74D7047A-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- McCutcheon, J., Nothdurft, L. D., Webb, G. E., Paterson, D., Southam, G. (2016). Beachrock formation via microbial dissolution and re-precipitation of carbonate minerals. *Marine Geology*, 382, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.10.010>
- Mohr, L. V., Castro, J. W. A., Costa, P. M. S., Alves, R. V. (2009). *Ilhas Oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo* (vol. II). Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas. ISBN 978-85-7738-076-3
- Moore, C. H. (1973). Intertidal Carbonate Cementation Grand Cayman, West Indies. *Journal of Sedimentary Petrology*, 43(3), 591-602. <https://doi.org/10.1306/74D72810-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Neumeier, U. (1999). Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence. *Sedimentary Geology*, 126, 35-46. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00030-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00030-5)
- Pedroso, D., Panisset, J. S., Abdo, L. B. B. (2017). Climatologia da Ilha da Trindade. In: Abrantes, S. C. (Org.). *PROTRINDADE Programa de Pesquisas Científicas na Ilha da Trindade 10 Anos de Pesquisas* (v.1, 43-64). Brasília: Secretaria da Comissão Interministerial para os recursos do mar – SECIRM. ISBN 978-85-62033-03-2
- Pires, G. L. C., Bongiolo, E. M. (2016). 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*, 72, 49-62. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.008>
- Rey, D., Rubio, B., Bernabeu, A. M., Vilas, F. (2004). 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*, 169, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2004.05.001>

- Scholle, P. A., Ulmer-Scholle, D. S. (2003). *A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagenesis*. Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG). <https://doi.org/10.1306/M77973>
- Šegvića, B., Zanoni G., Moscariello, A. (2020). On the origins of eogenetic chlorite in verdine facies sedimentary rocks from the Gabon Basin in West Africa. *Marine and Petroleum Geology*, 112 (104064). <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104064>
- Silva, A. L. C., Silva, M. A. M., Souza, R. S., Pinto, M. L. V. (2014). The role of beachrocks on the evolution of the Holocene barrier systems in Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 70, 170-175. <https://doi.org/10.2112/SI70-029.1>
- Strasser, A., Davaud, E., Jedoui, Y. (1989). Carbonate cements in Holocene beachrock: example from Bahiret el Biban, southeastern Tunisia. *Sedimentary Geology*, 62, 89-100. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(89\)90103-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(89)90103-6)
- Teng J., Shen J. (2008). Microbial carbonates in Holocene beachrocks, Shui-weiling, Luhuitou Peninsula, Hainan Island. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(1), 30-40. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0132-7>
- Vieira, M. M., De Ros, L. F. (2006). Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 192, 207-230. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.04.011>
- Vieira, M. M., Sial, A. N., De Ros, L. F., Morad, S. M. (2017). Origin of holocene beachrock cements in northeastern Brazil: Evidence from carbon and oxygen isotope. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.002>
- Vousdoukas, M. I., Velegrakis, A. F., Plomaritis, T. A. (2007). Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. *Earth-Science Reviews*, 85, 23-46. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.002>
- Weaver, B. L. (1990). Geochemistry of highly-undersaturated ocean island basalt suites from the South Atlantic Ocean: Fernando de Noronha and Trindade islands. *Contrib Mineral Petrol*, 105, 502-515. <https://doi.org/10.1007/BF00302491>
- Webb, G. E., Jell, J. S., Baker, J. C. (1999). Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: Implications for the origin of microcrystalline beachrock cement. *Sedimentary Geology*, 126, 317-334. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00047-0](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00047-0)
- Worden, R. H., Griffiths, J., Wooldridge, L. J., Utley, J. E. P., Lawana, A.Y., Muhammed, D.D., Simon, N., Armitage P.J. (2020). Chlorite in sandstones. *Earth-Science Reviews*, 204 (103105). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103105>