

ASSINATURAS TAFONÔMICAS DE UM RECIFE ALGÁLICO DE ALTA ENERGIA E BAIXA TURBIDEZ: EXEMPLO DO ÚNICO ATOL DO ATLÂNTICO SUL

Marcelo de Oliveira SOARES ¹, Marcela Marques VIEIRA ², Narendra Kumar SRIVASTAVA ², Maria Marlúcia Freitas SANTIAGO ³, Valesca Brasil LEMOS ⁴

- (1) Laboratório de Plâncton e Análise Ambiental, Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Universidade Federal do Ceará (UFC). Avenida da Abolição, 3207, Bairro Meireles, CEP 60165-081, Fortaleza, CE. Endereço eletrônico: marcelosoares@ufc.br
- (2) Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59072-970, Natal, RN, Brasil.
- (3) Departamento de Física, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Av. Mister Hull, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil.
- (4) Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

Introdução
Materiais e métodos
 Área de estudo
 Análise tafonômica
Resultados
 Descrição geral das bioconstruções
 Assinaturas tafonômicas
Discussões
Conclusões
Agradecimentos
Referências bibliográficas

RESUMO - Os estudos tafonômicos recifais estão concentrados em modelos elaborados para recifes de corais do Cenozóico. Visando elaborar um conjunto de assinaturas tafonômicas aplicáveis a um recife algálico, analisaram-se amostras recifais do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial, Brasil). As fácies carbonáticas (*Framestone* I e II) demonstraram pequena variabilidade permitindo a formação de um critério tafonômico indicativo de recifes algálicos com insignificante influência de materiais terrígenos, com baixa turbidez e de alta energia. As algas calcáreas representam a tafocenose bioconstrutora dominante. Encontraram-se grossas e amplamente distribuídas encrustações calcárias de algas coralinas, gastrópodes vermetídeos, briozoários e foraminíferos. A bioerosão dos clastos e amostras do paleorecife foram dominadas por traços de esponjas (*Cliona*), poliquetas, sipunculídeos e, em menor proporção, moluscos bivalves. A alta diversidade de organismos cimentadores, presença de cimentos aragoníticos e calcíticos na cimentação inter-granular e sedimentação exclusivamente carbonática são importantes assinaturas tafonômicas encontradas. A energia das ondas e, principalmente, as variações eustáticas holocênicas foram importantes fatores tafonômicos geradores dos depósitos sedimentares recifais deste recife oceânico. As assinaturas tafonômicas encontradas têm um forte potencial como ferramenta para o reconhecimento e interpretação de recifes algálicos com características ambientais semelhantes e para o entendimento da história geobiológica do único Atol do Atlântico Sul Equatorial.

Palavras-chaves: Tafonomia, recife algálico, Atol, Atlântico Sul, Ilhas.

ABSTRACT – *M.O. Soares, M.M. Vieira, N.K. Srivastava, M.M.F. Santiago, V.B. Lemos. Taphonomic signatures of an algal reef of high energy and low turbidity: Example of the only Atoll in the South Atlantic* - Taphonomic reef studies are concentrated in models elaborated for Cenozoic coral reefs. Seeking to elaborate a

set of taphonomic signatures applicable to an algal reef, samples from the Rocas Atoll (Equatorial South Atlantic, Brazil) were analyzed. The carbonate facies (*Framestone* I and II) show small variability allowing for the formation of a taphonomic criteria indicative of algal reefs with insignificant influence of terrigenous grains, with low turbidity and high energy. The calcareous algae represent the dominating taphocoenosis bioconstructor. Calcareous encrustations of coralline algae, vermetid gastropods, bryozoans and foraminifers are thick extensively distributed encrustation. The bioerosion of clasts and samples of the paleo-reef are dominated by traces of sponges (*Cliona*), polychaetes, sipunculids and, in lesser proportion, bivalve mollusks. The high diversity of cementing organisms, presence of aragonites and calcitic cements and exclusively carbonate sedimentation are important taphonomic signatures. The energy of the waves and, especially, the holocenic eustatic variations were important taphonomic factors generators of the reef growing development. The taphonomic signatures are a potential tool for the recognition and interpretation of algal reef with similar environmental characteristics and for understanding the geobiologic history of the Equatorial South Atlantic Atoll.

Keywords: Taphonomy, coralline algal reef, Atoll, South Atlantic, Islands

INTRODUÇÃO

O termo tafonomia, exposto primariamente por Efremov (1940), refere-se ao estudo da história pós-morte do material orgânico. Em ambientes de recifes coralíneos, onde a estrutura recifal é predominantemente biogênica e a atividade biológica é intensa, a tafonomia é uma disciplina particularmente importante devido a maior parte do material carbonático ser submetido a alteração pós-morte (Perry & Hepburn, 2008).

Os esqueletos dos organismos fossilizados na estrutura recifal, bem como traços da atividade paleobiológica (perfurações por organismos bioerosivos), têm fornecido importantes dados paleoambientais, através de estudos tafonômicos (Perry & Smithers, 2006). As assinaturas preservadas dos processos tafonômicos podem ser identificadas em diferentes ambientes recifais, fornecendo uma ferramenta para refinar os padrões de desenvolvimento do recife (Blanchon & Perry, 2004). Os organismos bioconstrutores têm um potencial significativo como indicadores não só do ambiente deposicional, mas da história de formação da estrutura carbonática (Gischler & Hudson, 2004).

Um grande número de estudos tem revelado o potencial do uso individual de grupos tafonomicamente importantes (organismos calcários encrustantes e macrobioerosivos) para delinear zonas batimétricas nos recifes cenozóicos, além de identificar eventos deposicionais e “eventos geológicos” como tempestades (Perry, 1996; Pandolfi & Greenstein, 1997; Perry, 1998; Cabioch et al., 1999; Greenstein & Pandolfi, 2003; Perry & Smithers, 2006, 2008). Entretanto, nota-se uma aparente ausência de trabalhos sobre tafonomia de recifes coralíneos em ilhas do Atlântico Sul Equatorial, sobretudo em recifes predominantemente bioconstruídos por algas.

Este trabalho documenta pela primeira vez para o Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial): (1) os tipos de processos tafonômicos que operam em condições de alta energia e baixa influência de siliciclásticos em um recife algálico, (2) a influência destes processos no desenvolvimento da estrutura recifal; e (3) o conjunto de assinaturas tafonômicas, as quais são indicativas de um ambiente recifal em desenvolvimento em uma zona de alta energia e de baixa turbidez.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O Atol das Rocas está localizado no topo de um *guyot* localizado em uma cadeia de montanhas submarinas no Oceano Atlântico

Sul, cuja base encontra-se a 4000 metros de profundidade no leito oceânico. A localização geográfica foi determinada em 3°51'S de latitude e 33°49'W de longitude, distante 266 km da Cidade

de Natal e a 150 km a oeste do Arquipélago de Fernando de Noronha, no Nordeste Brasileiro (Echeverría & Pires, 1997; Kikuchi & Leão, 1997) (Figura 01). Rocas é o único atol no Atlântico Sul Ocidental e um dos menores do

mundo (Soares *et al.*, 2010). O recife carbonático é composto, principalmente, por algas calcárias encrustantes e moluscos vermetóides (Gherardi & Bosence, 1999, 2005).

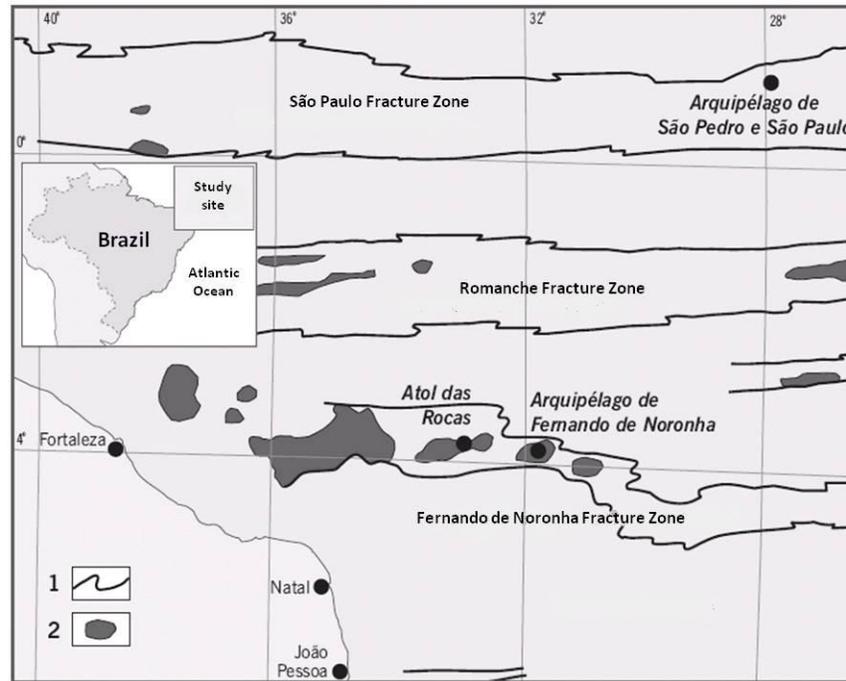


Figura 01. Região Oceânica adjacente ao Nordeste do Brasil: Situação do Atol das Rocas na Zona de Fratura de Fernando de Noronha e outras ilhas no Oceano Atlântico. 1. Limites das zonas de fratura; 2. Rochas magmáticas. Modificado de Almeida (2006).

O ambiente tectônico e as características do substrato foram considerados por Almeida (1955) e Ponte & Asmus (2004), que afirmaram que Rocas, assim como o Arquipélago de Fernando de Noronha, pertencem a um alinhamento de montes submarinos que consistiriam numa ramificação da dorsal meso-oceânica. Bryan & Kumar (1973) apresentam evidências da continuidade desse alinhamento projetando-se pela plataforma continental brasileira no Estado do Rio Grande do Norte e continente adentro, no Estado do Ceará. Gorini (1981) confirmou a morfologia desse alinhamento de montes submarinos, o qual foi

nomeado de Zona de Fratura de Fernando de Noronha.

O Atol possui uma estrutura ligeiramente elipsoidal, na qual o eixo maior (E-W) tem cerca de 3,7 km de comprimento e o eixo menor (N-S), cerca de 2,5 km. Dentro do anel recifal, existem duas ilhas: do Farol e do Cemitério, ambas compreendendo 7,2 km² de área emersa (Soares *et al.* 2009) (Figura 02). Testemunhos obtidos em perfurações realizadas neste recife oceânico apresentaram algas calcárias como o organismo predominante, formando mais de 60% da estrutura recifal; os corais contribuíram com cerca de 10% desta estrutura (Kikuchi & Leão, 1997; Gherardi & Bosence, 2005).

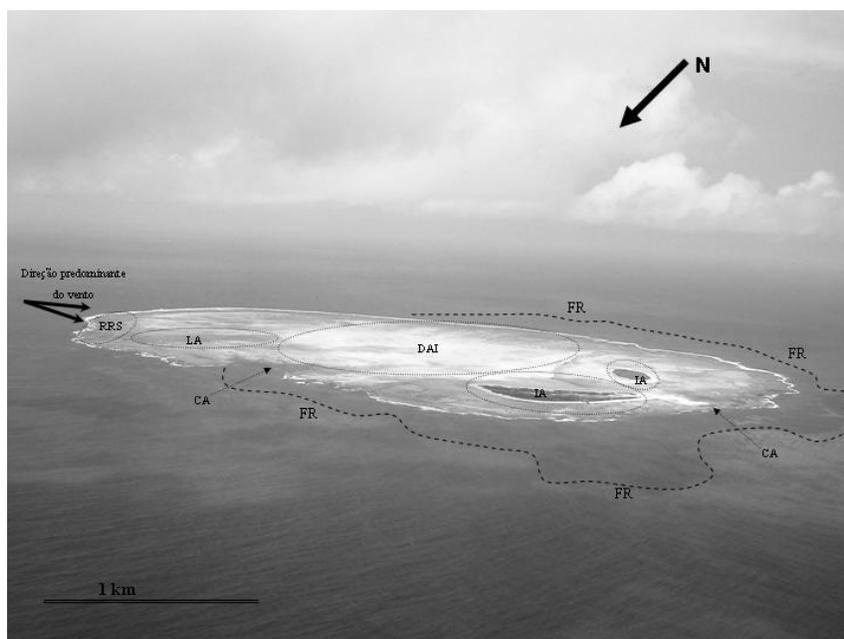


Figura 02. Feições geomorfológicas e geológicas identificadas no Atol das Rocas: demonstrando a forma elipsóide, IA: ilhas arenosas a sotavento; LA: laguna; CA: canais; FR: frente recifal; DAI: depósito arenoso intermarés; RRS: resíduos de recifes. Interpretação feita a partir de foto obtida pela Força Aérea Brasileira (FAB), durante as atividades de campo, em janeiro de 2008, em condições de maré baixa de sizígia. Modificado de Soares et al. (2009).

Os ventos de sentido oeste e noroeste são predominantes ao longo do ano com uma frequência de 45% e velocidades variando entre 6,0 a 10,0 m/s. Estes parâmetros possuem relativa sazonalidade: nos meses de inverno (de junho a agosto), observa-se 35% para ventos de SE e 15% para E, com velocidades variando entre 11,0 e 15,0 m/s; para o verão (de dezembro a abril), a frequência fica em torno de 20% para os ventos SE e 25% para os de E, com velocidades frequentemente acima de 20,0 m/s (Kikuchi & Leão, 1997; Soares et al. 2009).

A temperatura da água do mar possui média de 27,0 °C, podendo chegar a 42 °C nas piscinas, com salinidade na superfície variando

entre 36,0 ‰ e 37 ‰. O regime de marés é semidiurno e de mesomares, com uma variação máxima de 2,7 m, deixando exposto o platô recifal em maré de sizígia baixa (Gherardi & Bosence, 1999).

Análise tafonômica

Visando estudar as assinaturas tafonômicas e aspectos da estrutura recifal utilizaram-se amostras recifais, coletadas através de mergulhos autônomos, e do paleorecife encontrado nos resíduos de recife (Figura 03). Foram estudados aspectos diversos como: encrustação calcárea, bioerosão interna e processos de cimentação dos constituintes da estrutura do recife.

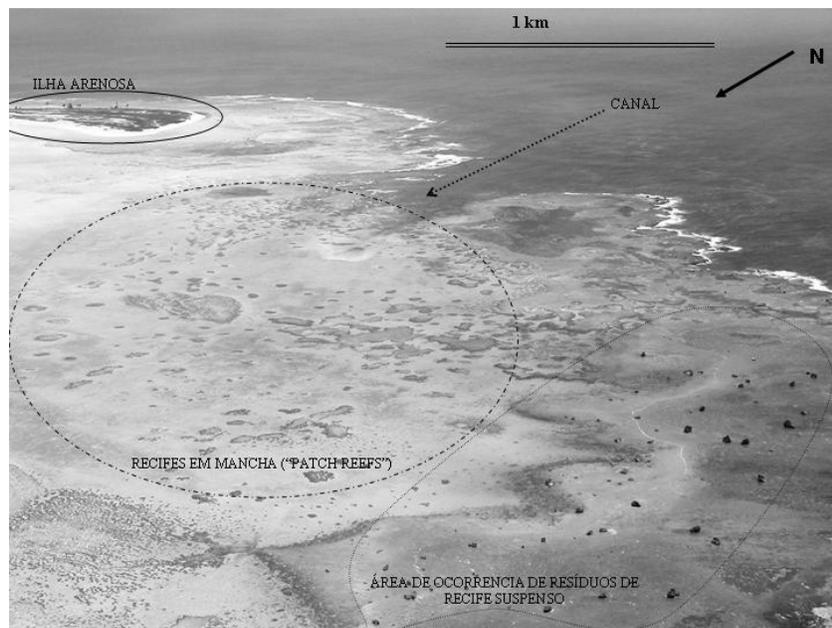


Figura 03. Aerofotografia do Atol das Rocas (NE, Brasil) mostrando os resíduos de recifes, nos quais realizou-se a coleta de amostras do paleorecife; os recifes em mancha e o maior canal que liga a área interna do atol ao Oceano Atlântico Sul. Observa-se também a Ilha do Farol, à sotavento, formada por areia carbonática biogênica. Foto da Força Aérea Brasileira (FAB) obtida em janeiro de 2008, sob condições de maré baixa de sizígia.

O recife oceânico de Rocas apresenta áreas consideradas de baixa energia como certas piscinas e a pequena laguna a nordeste (Figura 04). Entretanto, zonas de alta energia e baixa turbidez são encontradas como a frente

recifal, o anel recifal atual e os resíduos do recife (chamados de “Rocas” o que levou ao nome do Atol estudado) à barlavento (Soares et al. 2009) (Figura 05).

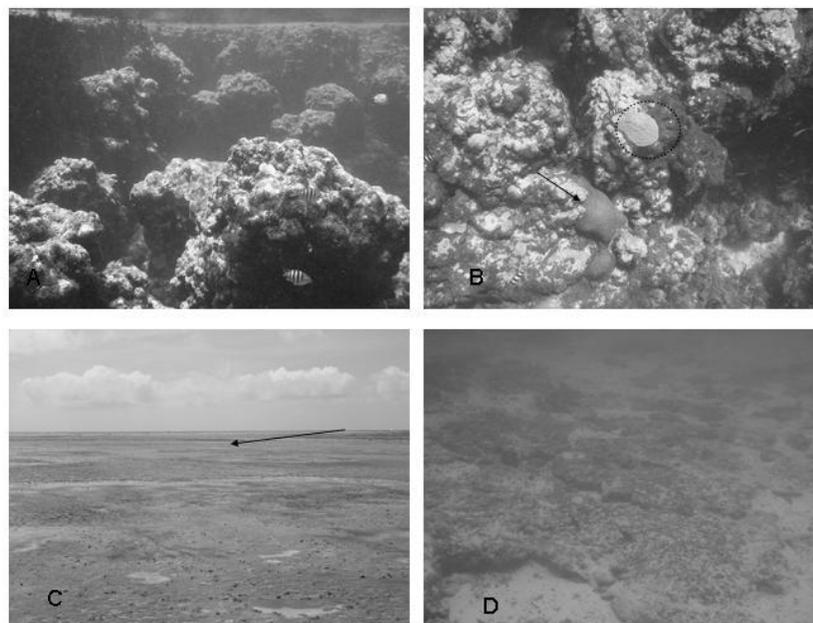


Figura 04. Ambientes de baixa energia do Atol das Rocas: (A) Piscina do Salãozinho, no platô recifal, na qual ocorrem colunas de algas calcáreas bioconstrutoras; (B) Fundo bioconstruído de uma piscina de

baixa energia mostrando a presença predominante de algas coralinas, com colônias de corais isolados de *Siderastrea stellata* (seta) e *Porites* sp. (círculo); (C) Platô recifal, sob condições de maré baixa, mostrando uma piscina (seta); (D) Fundo da laguna mostrando a planície arenosa com recifes em mancha (*patch-reefs*).



Figura 05. Ambientes de alta energia do Atol das Rocas: (A) Frente recifal submetida ao choque direto das ondas; (B) Resíduos de recifes, a barlavento, mostrando resquícios de uma construção recifal formada em nível de mar mais elevado; (C) Anel recifal recente, a barlavento, mostrando encrustação e bioconstrução ampla por alga calcárea *Porolithon pachydermum*; (D) Frente recifal vista de fora do Atol das Rocas, mostrando a entrada da água oceânica a partir das ondas.

Após a coleta do material de áreas recifais recentes de alta energia e do paleorecife procedeu-se a verificação da litofácies nas rochas carbonáticas. No contexto da tafonômicidade analisaram-se o estado tafonômico da preservação fossilífera. Tal estudo enfocou, principalmente, os processos tafonômicos que produzem (seja como depósitos ou traços) assinaturas preservadas que podem auxiliar como indicadores paleoambientais (ex: encrustação calcárea, traços de bioerosão, e porosidade interna total ou parcialmente cimentada ou preenchida por sedimentos).

Foram analisados diversos grupos, tais como algas coralinas, briozoários, foraminíferos, serpulídeos e vermetídeos, sendo estes identificados de acordo com a bibliografia específica de cada grupo.

As amostras recifais foram subsequentemente cortadas para análise da estrutura interna da bioerosão. Os organismos macrobioerosivos e seus traços típicos foram verificados (como originados da ação de esponjas, sipunculídeos, nematódeos, peixes, etc.), além dos traços de icnoespécies segundo o trabalho de Bromley (1994).

RESULTADOS

Descrição geral das bioconstruções

A estrutura recifal e os resíduos do paleorecife são dominados pela acumulação de restos de algas calcárias, corais, vermetídeos e

foraminíferos além de colônias isoladas de corais *in situ* como *Siderastrea stellata*, *Favia gravida*, *Porites* sp., dentre outros. A fábrica recifal varia de clasto a matriz-suportada, sendo que a matriz é

composta por sedimentos carbonáticos. Observa-se cimentação biológica dos componentes da estrutura recifal por algas coralinas (principalmente *Porolithon pachydermum*), foraminíferos *Homotrema rubrum* e *Planorbulina* sp., serpulídeo *Serpula* sp. e briozoários. A cimentação é predominantemente marinha, ocorrendo nos poros primários intragranulares e intergranulares, sendo constituída por cimentos

aragoníticos (acicular fibroso e acicular paliçada) e de calcita magnesiana

Das amostras recifais coletadas na frente recifal e no anel recifal à barlavento observam-se extensas bioconstruções (Litofácies *Framestone* I), caracterizadas por colônias *in-situ* e bioclastos, compostas principalmente por biolitos de algas coralinas, corais, foraminíferos e gastrópodes vermetídeos indicadores de ambientes intermarés (Figura 06).

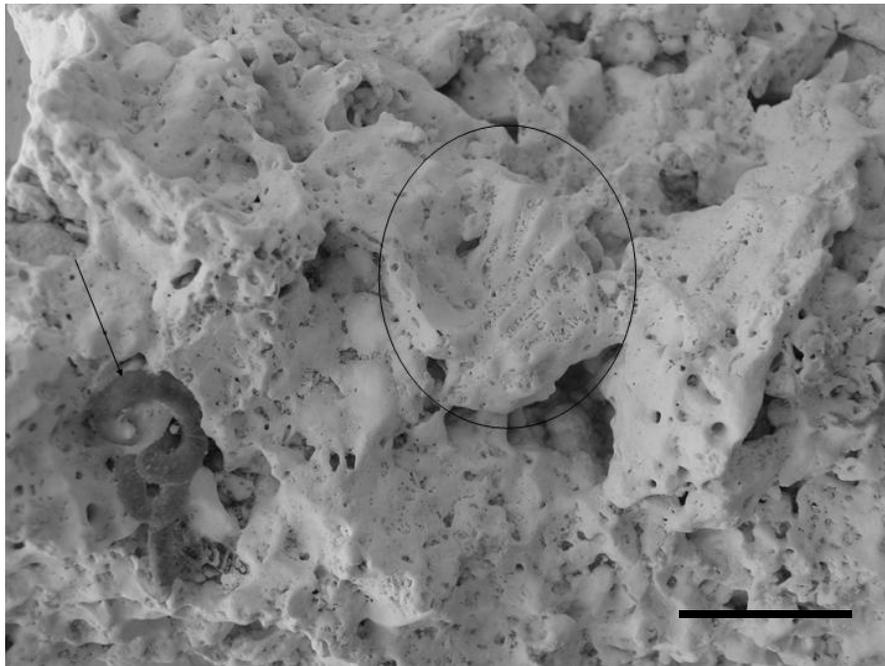


Figura 06. Detalhe de uma amostra do recife do Atol das Rocas, na qual se observam os principais bioconstrutores, fossilizados: Gastrópode vermetídeo bioconstrutor *Dendropoma irregulare*, indicador de ambiente intermarés (seta) e coral escleractíneo (elipse). Arcabouço principal: Algas calcáreas. Litofácies *Framestone* Alga-Coral-Mollusca I. Escala: 1 cm.

Nas amostragens realizadas no paleorecife (resíduos de recife pretérito) têm-se blocos bioconstruídos predominantemente por

algas calcáreas, com corais e foraminíferos como construtores recifais secundários (Figura 07).

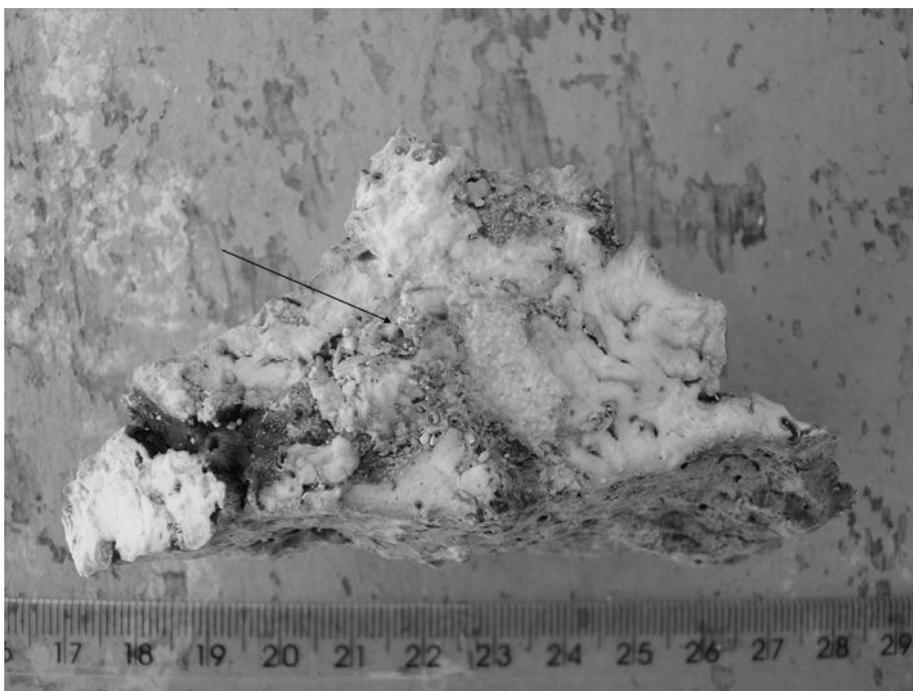


Figura 07. Litofácies *Framestone* coralíneo II identificada em amostra do paleorecife do Atol das Rocas (resíduos de recifes, na zona à barlavento), principalmente formada por uma tafocenose de algas coralinas (não-geniculadas), principalmente *Porolithon pachydermum*. Seta indica preenchimento por sedimentos arenosos exclusivamente carbonáticos.

A ausência de vermetídeos bioconstrutores de zonas entremarés e a tafocenose representada pela Litofácies *Framestone* II (caracterizada pela bioconstrução carbonática algal-coral-foraminíferos) sugere um nível de mar mais alto. As datações por carbono-14 das amostras do paleorecife variaram de 1543 ± 51 (base) a 3374 ± 55 (topo) AP. A preservação tafonômica destes resíduos está ligada a eventos deposicionais de ondas de tempestade e *swell*. Entretanto, o principal fator tafonômico na geração destes depósitos sedimentares fossilíferos foram, pela datação radiométrica e tafofácies observadas, os eventos de oscilações eustáticas no Holoceno.

Assinaturas tafonômicas

As assinaturas tafonômicas de diferentes áreas recifais foram analisadas e as fácies (*Framestone* I e II) mostram pequena variabilidade permitindo a formação de um

conjunto de critérios tafonômicos, indicativo de recifes longe da costa e de zona de alta energia e de baixa turbidez por ausência de materiais terrígenos e siliciclásticos.

Em termos de processos bioestratinômicos, houve uma mortalidade em massa decorrente da queda do nível do mar, deixando o topo dos recifes expostos e sujeitos à exposição subaérea. Nesta fase, a biocenose foi afetada pela forte radiação solar e alta taxa de sedimentação devido aos processos denudacionais nas áreas expostas. A zona de deposição dos resíduos de recifes é composta por uma tafocenose politípica possuidora de elementos autóctones e parautóctones. Certos elementos sofreram transporte (sobretudo os blocos recifais de pequeno tamanho) por ondas de tempo bom e de tempestade, entretanto continuam no sítio de morte (zona de barlavento). Tais processos tafonômicos levaram à perda de informação fossilífera, gerando o sedimento que foi transportado e formou as ilhas arenosas (Figuras 02 e 08).

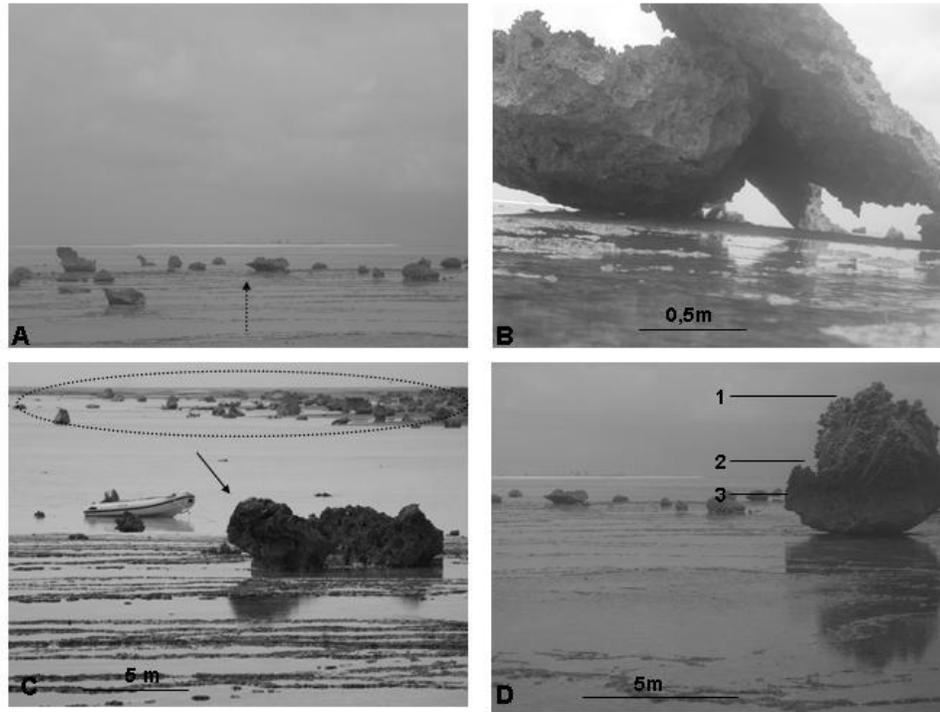


Figura 08. Processos tafonômicos no paleorecife do Atol das Rocas: (A) Em primeiro plano, resíduos de recifes. Ao fundo, observa-se a Ilha do Farol constituída de sedimentos carbonáticos bioclásticos. A seta mostra o sentido da corrente unidirecional que predominou ao longo do Holoceno; (B) Elementos recifais bioconstruídos parautoctones, demonstrando transporte e intensos sinais de corrosão na zona a barlavento do Atol das Rocas; (C) Zona do sítio de morte da biota construtora do recife mostrando elementos autóctones (seta) e parautoctones (elipse). (D) Maior matacão originado do paleorecife gerado em um nível de mar mais alto. Nível 1 representa fase mais antiga em que o paleorecife ficou exposto com o evento regressivo (datação por carbono 14: 3374 ± 55 ka AP). Nível 2 representa fase mais recente em que o recife tentou se ajustar a um nível mais baixo (datação por carbono 14: 1543 ± 51 ka AP). Nível 3 representa o nível de mar atual. Foto obtida em maré baixa de sizígia.

Elementos de abrasão, bioerosão e dissolução foram observados, principalmente nos restos esqueléticos recifais que permaneceram expostos na interface água/sedimento, por prolongados períodos de tempo. A corrosão foi observada em feições de desgaste mecânico, predominantemente nas

fácies com alto grau de bioerosão. A Bioerosão é dominada por traços de *Cliona* sp. (esponja), *Lythophaga bisulcata* (molusco) e traços de perfuração de poliquetas e sipunculídeos (Figura 09). A corrosão e a bioerosão estão relacionadas, devidos os elementos ficarem expostos por longo tempo na TAZ (Zona Tafonomicamente Ativa).

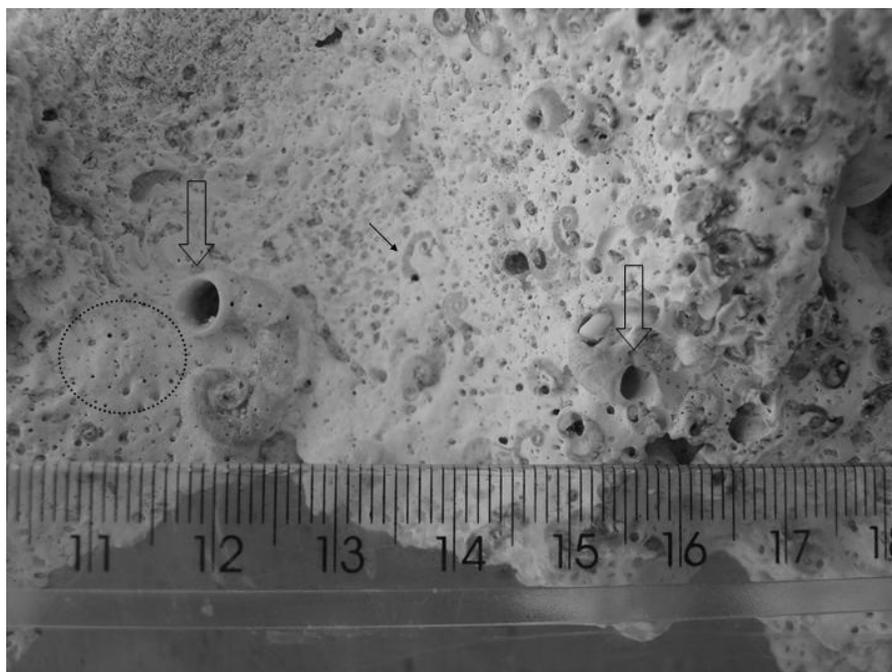


Figura 09. Predominância de marcas de bioerosão de esponjas *Cliona* (formas arredondadas menores indicadas pela elipse) e de poliquetas/sipunculídeos (seta mais fina) em amostras do paleorecife do Atol das Rocas. As setas largas indicam porções da bioacumulação fóssilífera constituídas de conchas de moluscos vermetídeos. Litofácies *Framestone I*

As encrustações de organismos fotofílicos como as algas coralinas, primariamente *Porolithon pachydermum*, *Lythophyllum* sp., *Lythoporella* sp. e *Sporolythion* sp., gastrópodes vermetídeos *Dendropoma irregulare* e *Petalconchus varians*, além de grossas encrustações do hidrocoral *Millepora alcicornis* são comuns na Litofácies

Framestone I e II. Certas superfícies, ao invés de apresentar estes organismos incrustantes, têm finas crostas de tafocenoses encrustantes de organismos ciáfilos caracterizados por formas arborescentes e globosas do foraminífero *Homotrema rubrum* (Figura 10A). Na Litofácies *Framestone II* observa-se a presença de bivalves cimentados na estrutura do paleorecife (Figura 10B).

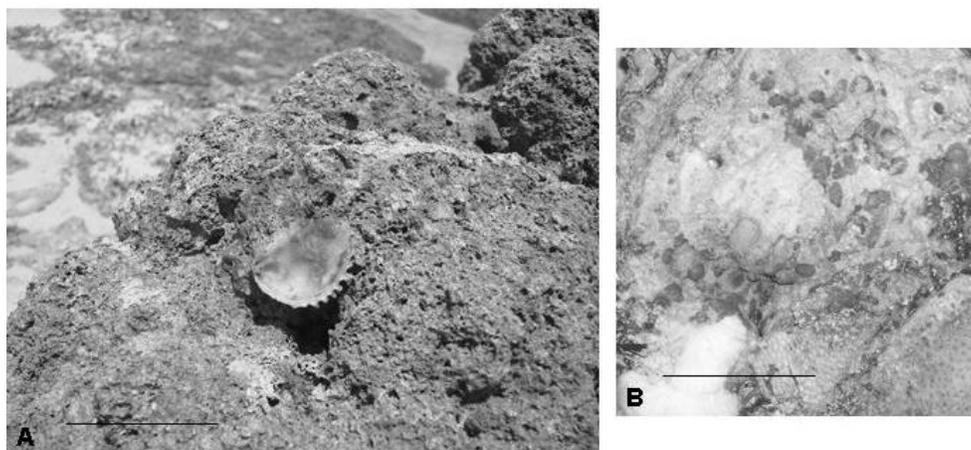


Figura 10. Feições tafonômicas no Atol das Rocas: (A) Bivalve cimentado na estrutura do paleorecife à barlavento do atol. Escala: 5cm; (B) Aspecto macroscópico de várias bioacumulações (glóbulos vermelhos) do foraminífero *Homotrema rubrum* em amostra recifal do atol. Escala: 5cm.

DISCUSSÕES

A dominância das algas coralinas como organismos cimentadores e bioconstrutores do paleorecife do Atol das Rocas é um importante critério tafonômico para interpretação paleoambiental da zona de alta energia do recife à barlavento. Recifes de alta energia são dominados por encrustações densas de algas coralinas com crescimento compacto, lento e de baixa porosidade. Entretanto, recifes de baixa energia são caracterizados por estrutura porosa de corais acroporídeos de crescimento rápido (Gischler & Hudson, 1998; Blanchon & Perry, 2004; Gherardi & Bosence, 2005).

O desenvolvimento da estrutura de recifes coralíneos é comumente dominada pela acumulação de restos de Corais, além de colônias isoladas de corais *in situ* (Perry & Hepburn, 2008) diferentemente do recife algálico do Atol das Rocas, onde predominam algas calcáreas. Em recifes de alta turbidez, temos uma influência na composição dos grãos da matriz por uma mistura de siliclastos e carbonatos (Perry & Smithers, 2006). Nestes ambientes, a assinatura tafonômica, em relação às encrustações carbonáticas, é restrita a finas e isoladas crostas, principalmente de algas e serpulídeos. Comumente não ocorre cimentação biológica dos componentes da estrutura recifal, havendo baixos níveis de bioerosão e pouca ou nenhuma cimentação na estrutura do recife (Martindale, 1992; Perry & Hepburn, 2008). Observou-se que em recifes de alta turbidez e com influência de siliciclásticos (Scoffin, 1992) a porosidade esquelética primária e secundária é basicamente não cimentada, com grãos finos e presença de sedimentos terrígenos. Estas características claramente diferem das assinaturas tafonômicas verificadas no Atol das Rocas.

Parte das assinaturas tafonômicas encontradas no Atol das Rocas são concordantes com recifes rasos e de alta energia abordados por Perry & Smithers (2008). Entretanto, tais modelos tafonômicos são elaborados para recifes de corais diferentemente do recife oceânico de Rocas que é predominantemente construído por algas

calcáreas (Kikuchi & Leão, 1997, Gherardi & Bosence, 1999, 2005; Soares et al. 2009). Ampla cimentação é característica das assinaturas tafonômicas de paleoambientes recifais rasos, de alta energia e com baixa influência de sedimentação de terrígenos com cimentos micríticos peloidais comumente formados ao redor dos bioclastos, e cimentos aragoníticos aciculares, na parte interna (Perry & Hepburn, 2008). Em termos dos processos tafonômicos referentes à cimentação, o modelo tafonômico de recifes de corais mostra-se aplicável ao recife algálico do Atol das Rocas.

O ambiente de sedimentação recifal estudado por Perry & Smithers (2006), na Grande Barreira da Austrália, é semelhante ao Atol das Rocas (águas rasas, quentes, agitadas, com alta produtividade carbonática), porém, os aspectos tafonômicos não são os mesmos. A principal razão é a ausência de sedimentos terrígenos / siliciclásticos na região do Atol das Rocas devido à grande distância da costa (250km) podendo ser classificado como “offshore”, tendo se desenvolvido no topo de uma montanha vulcânica (Cadeia de Fernando de Noronha) (Andrade, 1959; Gherardi & Bosence, 2005; Soares et al. 2010). Perry & Smithers (2006) estudaram recifes do tipo “inshore” da Grande Barreira de Corais, com forte influência da turbidez e dos sedimentos terrígenos que influenciaram na classificação das fácies e das assinaturas tafonômicas encontradas, como por exemplo, no caso da Bioerosão.

A ausência de cimentos biológicos (encrustações que ligariam os bioclastos) nos recifes próximos à costa é decorrente das condições sedimentares e da turbidez que gera uma alta mortalidade dos organismos encrustantes. Recifes de corais costeiros influenciados por alta sedimentação têm como assinaturas tafonômicas um corpo inconsolidado de sedimentos terrígenos e carbonáticos misturados, além de uma assembléia diversa na tafocenose (Perry & Smithers, 2006). No Atol das Rocas, acontece uma forte encrustação e bioerosão (águas claras e sem sedimentação de siliciclásticos) com a estrutura do recife basicamente consolidada por sedimentos bioclásticos carbonáticos devido às condições de

turbidez, sedimentação por terrígenos e matéria orgânica.

Holz & Simões (2002) abordam que bioclastos intensamente bioerodidos ou encrustados indicam, também, prolongada exposição na interface água / sedimento, especialmente nos casos onde é possível a identificação de múltiplos episódios de encrustação, possibilitando o reconhecimento de sucessões ecológicas de substrato duro. Gherardi & Bosence (1999) demonstraram a sucessão ecológica dos organismos encrustantes do Atol das Rocas (principalmente as algas calcáreas) reforçando a hipótese tafonômica aqui apresentada.

Um dos aspectos mais importantes na discussão de trabalhos tafonômicos realizados em recifes de alta turbidez (Martindale, 1992; Scoffin, 1992; Pandolfi & Greenstein, 1997; Sanders & Baron-Szabo, 2005; Perry & Smithers, 2006, 2008) é a característica mais aparente dos aspectos tafonômicos: a encrustação calcárea. Nos recifes de Paluma e Lugger (Austrália), só ocorrem encrustações finas (<1mm) e isoladas de algas calcáreas (*Lithoporella* sp. e *Lithothamnion* sp.), de serpulídeos e briozoários. Observa-se também

que não há evidência de sucessão de organismos encrustantes e de bioerosão nas encrustações (Perry & Smithers, 2006). Ambos os fatos indicam limitado tempo de residência dos clastos na superfície ativa do recife (Scoffin, 1992). Estes resultados contrastam profundamente com as encrustações de recifes de alta energia com águas claras e anéis de algas intermarés como o estudado no Atol das Rocas. Este recife oceânico exibe evidência da sucessão de estágios de organismos encrustantes com uma assembléia diversa formada por algas coralinas (*Sporolithon* sp., *Lithophyllum* sp., *Lithoporella* sp., *Porolithon pachydermum*), corais, vermetídeos e foraminíferos encrustantes que refletem exposição do substrato por um longo número de anos, através de uma sucessão de ambientes fotofílicos a ciáfilos (protegidos da luz direta).

Na tabela 01, podem ser comparadas as assinaturas tafonômicas de um recife de coral próximo à costa e com alta turbidez em relação a um recife algálico oceânico de alta energia e baixa turbidez. Os parâmetros bioestratinômicos e diagenéticos foram a encrustação calcárea, bioerosão interna, cimentação intra-esqueletal, cimentação inter-granular e sedimentos intra-esqueletais (Figura 11).

Tabela 01. Comparação das assinaturas tafonômicas de recifes de alta turbidez com influência de sedimentos terrígenos (Perry & Smithers, 2006; Perry & Hepburn, 2008) com recifes algálicos de alta energia e baixa turbidez (longe da costa) a partir dos dados do presente trabalho.

<i>Assinaturas Tafonômicas</i>	Recifes de alta turbidez com influência de terrígenos	Recifes algálicos de alta energia e baixa turbidez (longe da costa)
Tafocenose recifal bioconstrutora predominante	Corais	Algas calcáreas
Encrustação Calcárea	Restritas a finas (<1mm) e isoladas encrustações de algas coralinas (<i>Lythophyllum</i> , <i>Lithothamnion</i> , <i>Neogoniolython</i>), serpulídeos e briozoários. Conchas de bivalves cimentados podem ocorrer. Não há cimentação biológica dos clastos e muitos clastos não são incrustados	Amplamente distribuída com encrustações grossas e agregadas de algas coralinas (<i>Porolithon</i> , <i>Lythophyllum</i> , <i>Sporolithon</i> , <i>Lythoporella</i>) serpulídeos, gastrópodes vermetídeos, briozoários e foraminíferos. Conchas de bivalves cimentados podem ocorrer. Ocorre

		cimentação biológica (principalmente por algas coralinas) e poucos clastos não são encrustados
Bioerosão Interna (táxons macrobioerosivos)	Dominada por traços da esponja <i>Entobia</i> sp., icnogênero <i>Gastrochaenolites</i> sp. é comum em fragmentos de clastos largos. Muitos clastos não sofreram bioerosão.	Dominada por uma grande variedade de traços de esponjas <i>Cliona</i> sp., e de poliquetas / sipunculídeos. Traços bioerosivos do icnogênero <i>Gastrochaenolites</i> sp. são restritos as porções de bioconstrução por corais. Ocorre bioerosão em menor frequência de moluscos e nematódeos. A maioria dos clastos sofreu bioerosão.
Cimentação intra-esquelética	Ausência de cimentação ou restrita a raras aragonitas aciculares e cimento peloidal micrítico. Não ocorre cimentação biológica.	Ocorre forte cimentação biológica por algas coralinas, foraminíferos <i>Homotrema rubrum</i> e <i>Planorbulina</i> sp., serpulídeo <i>Serpula</i> sp. e briozoários.
Cimentação inter-granular	Ausente	Presente. Formado por cimentos aragoníticos e calcíticos.
Sedimentos intra-esqueléticos	Abundante porosidade nas margens dos clastos. Presença de grãos finos não cimentados de sedimentos terrígenos e carbonáticos	Baixa porosidade nos bioclastos. Presença unicamente de sedimentos carbonáticos arenoso-cascalhosos alóctones e autóctones
Indicativo do ambiente de sedimentação	Característico de recifes de corais próximos à costa (influência de sedimentos terrígenos) com zonas de alta turbidez.	Característico de recifes algálicos rasos, longe da costa, de alta energia e de baixa turbidez.

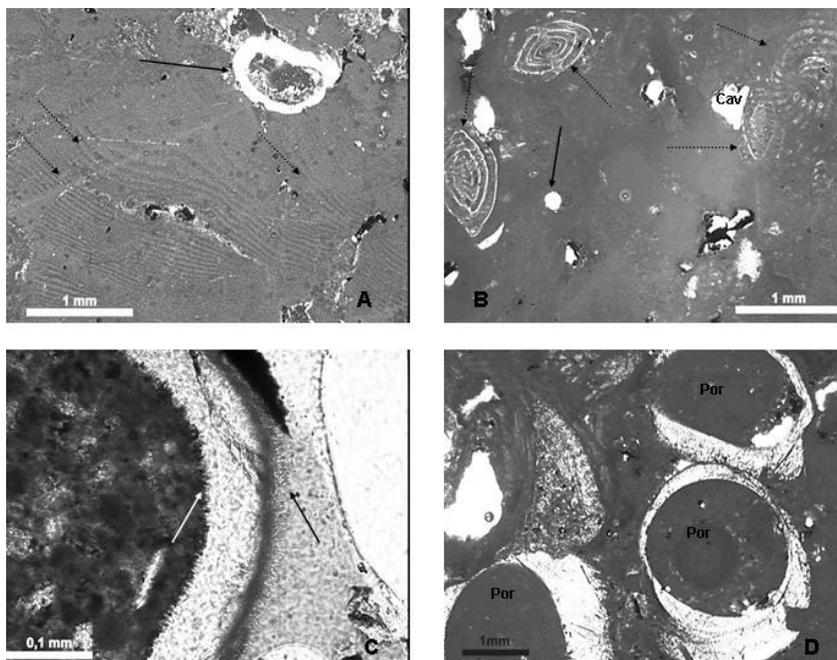


Figura 11. Assinaturas tafonômicas de um recife algálico de alta energia e baixa turbidez / influência de terrígenos e siliciclásticos (Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial): (A) Encrustações típicas de algas vermelhas coralinas da Fácies *Bindstone* Coralíneo (setas pontilhadas). Observa-se a presença de concha de vermetídeo com porosidade interna parcialmente preenchida (seta contínua). Estes gastrópodes constituem a estrutura recifal secundária com alto potencial bioconstrutivo; (B) Bioacumulação microfossilífera de foraminíferos bentônicos (setas pontilhadas). Presença de cavidades / perfuração (Cav) e atividade bioerosiva da esponja *Cliona* sp. (seta contínua); (C) Detalhe das franjas aciculares de aragonita, na porção extraesqueletal (seta de cor preta) e intraesqueletal (seta de cor branca). Na porção intermediária, temos a calcita magnesiânica. A cimentação ocorre por franjas isópacas de cristais prismáticos indicadores de processos diagenéticos iniciais em zona freática marinha com poros preenchidos e saturados por água. Observar arcabouço primário de algas coralinas; (D) Conchas de gastrópodes vermetídeos com preenchimento total da porosidade interna por pelóides e bioclastos (Por).

Diferentes tipos de recifes de águas rasas (cada um ocorrendo em diferentes regimes de energia das ondas, penetração de luz, turbidez e taxas de sedimentação) podem ser caracterizados por diferentes processos bioestratinômicos e diagenéticos exibindo diferentes padrões de assinaturas tafonômicas. Um exame mais detalhado da tafonomia de

bioconstrutores (corais, algas, etc.), deve compreender análises não só das alterações biológicas, mas também das alterações físico-químicas (ex. cimentação) de uma grande amplitude de recifes atuais para permitir o desenvolvimento de modelos de tafofácies para uso em reconstrução paleoambiental de ambientes recifais biogênicos.

CONCLUSÕES

Foram delimitados os processos tafonômicos indicadores de um recife algálico de alta energia, com baixa turbidez e sedimentação siliciclástica reduzida a inexistente. As assinaturas tafonômicas estudadas incluíram aspectos da cimentação, encrustação calcária,

bioerosão, sedimentação e tafocenose bioconstrutora predominante. Diferentes aspectos da história tafonômica (bioestratinomia e diagênese) do Atol das Rocas foram analisados com ênfase nas variações eustáticas holocênicas como um importante fator.

As assinaturas tafonômicas aqui apresentadas devem ser estudadas em outros recifes de ilhas oceânicas e da zona costeira para observação das semelhanças e diferenças, considerando aspectos da idade geológica

tempo dos restos esqueléticos na zona tafonomicamente ativa, faixa de paleolatidade, fatores paleoambientais, tempo de acumulação carbonática e características das tafocenoses de organismos bioconstrutores recifais.

AGRADECIMENTOS

O autor principal agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico) pela concessão de bolsa de Doutorado durante o período da pesquisa. A PETROBRAS e a Fundação SOS Mata Atlântica pelo financiamento da pesquisa nos trabalhos de campo. Ao ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) pela concessão de licença de pesquisa e apoio nas atividades de campo (principalmente à Maurizélia Brito, coordenadora da Reserva Biológica Atol das Rocas). Ao Biólogo Carlos Augusto Oliveira Meirelles pelo auxílio nas coletas e fotografias subaquáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, F.F.M. **Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral/Divisão de Geologia e Mineralogia, 181p., 1955.
2. 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.
3. ANDRADE, G.O. O recife anular das Rocas (Um registro das recentes variações eustáticas no Atlântico equatorial). **Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, v. 11, p. 29-61, 1959.
4. BLANCHON, P. & PERRY, C.T. Taphonomic differentiation of *Acropora palmata* facies in cores from Campeche Bank Reefs, Gulf of Mexico. **Sedimentology**, v.51, p. 53-76, 2004.
5. BRYAN, G.M. & KUMAR, N. **The north Brazilian ridge and the extension of equatorial fracture zones into the continent**. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2, 1973. Belém, Resumos simples, SBG-Norte, p.133-144.
6. BROMLEY, R.G. The palaeoecology of bioerosion. In: DONOVAN, S.K. (Editor), **The Palaeobiology of Trace Fossils**. London: Wiley Sons, p. 134–154, 1994.
7. CABIOCH, G.; MONTAGGIONI, L.F.; FAURE, G. & RIBAUD-LAURENTI, A. Reef corallgal assemblages as recorders of paleobathymetry and sea level changes in the Indo-Pacific province. **Quaternary Science Reviews**, v.18, p.1681–1695, 1999.
8. ECHEVERRÍA, C.A. & PIRES, D.O. **Cnidarians of the Atol das Rocas**. In: PROC. 8TH. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM,1, 1997, Panamá, Resumos simples, p. 443-446.
9. EFREMOV, J. Taphonomy: a new branch of geology. **Pan-American Geologist**, v.74, p. 81–93, 1940.
10. GHERARDI, D.F.M. & BOSENCE, D.W.J. Modeling of the ecological succession of encrusting organisms in recent coralline-algal frameworks from Atol das Rocas, Brazil. **Palaïos**, v.14, n.2, p.145-158, 1999.
11. GHERARDI, D.F.M. & BOSENCE, D.W.J. Late Holocene reef growth and relative sea-level changes in Atol das Rocas, equatorial South Atlantic. **Coral Reefs**, v. 24, p. 264-272, 2005.

12. GISCHLER, E. & HUDSON, J.H. Holocene development of three isolated carbonate platforms, Belize, Central America. **Marine Geology**, v.144, p. 333-347, 1998.
13. GISCHLER, E. & HUDSON, J.H. Holocene development of the Belize Barrier Reef. **Sedimentary Geology**, v.164, p. 223-236, 2004.
14. GORINI, M.A. **Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais**. Rio de Janeiro: CENPES/DINTEP, 116p., 1981.
15. GREENSTEIN, B.J. & PANDOLFI, J.M. Taphonomic alteration of reef corals: effects of reef environment and coral growth form II: The Florida Keys. **Palaios**, v.18, p.495-509, 2003.
16. HOLZ, M. & SIMÕES, M.G. **Elementos fundamentais de tafonomia**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 231p., 2002.
17. Kikuchi, R.K.P. & Leão, Z.M.A.N. Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): an atoll built primarily by coralline algae. In: PROC. 8TH. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 1, 1997, Panamá, **Proceedings**, p. 731-736.
18. MACINTYRE, I.G. 1997. Reevaluating the role of crustose coralline algae in the construction of coral reefs. In: PROC. 8TH INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 1, 1997, Panamá, **Proceedings**, p. 725-730.
19. MARTINDALE, W. Calcified epibionts as palaeoecological tools: examples from the Recent and Pleistocene reefs of Barbados. **Coral Reefs**, v.11, p. 167-177, 1992.
20. PANDOLFI, J.M. & GREENSTEIN, B.J. Taphonomic alteration of reef corals: effects of reef environment and coral growth form. I. The Great Barrier Reef. **Palaios**, v.12, p. 27-42, 1997.
21. PERRY, C.T. Distribution and abundance of macroborers in an Upper Miocene reef system, Mallorca, Spain: implications for reef development and framework destruction. **Palaios**, v. 11, p. 40-56, 1996.
22. PERRY, C.T. Macroborers within coral framework at Discovery Bay, north Jamaica: species distribution and abundance, and effects on coral preservation. **Coral Reefs**, v.17, p. 277-287, 1998.
23. PERRY, C.T. & SMITHERS, S.G. Taphonomic signatures of turbid-zone reef development: Examples from Paluma Shoals and Lugger Shoal, inshore central Great Barrier Reef, Australia. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.242, p. 1-20, 2006.
24. PERRY, C.T. & HEPBURN, L.J. Syn-depositional alteration of coral reef framework through bioerosion, encrustation and cementation: Taphonomic signatures of reef accretion and reef depositional events. **Earth-Science Reviews**, v.86, p. 106-144, 2008.
25. PONTE, F.C. & ASMUS, H.E. As bacias marginais brasileiras: estágio atual de conhecimento. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v.12, n. 2, p. 385-420, 2004.
26. SANDERS, D. & BARON-SZABO, R.C. Scleractinian assemblages under sediment input: their characteristics and relation to the nutrient concept. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v.216, p. 139-181, 2005.
27. SCOFFIN, T.P. Taphonomy of coral reefs: a review. **Coral Reefs**, v.11, p. 57-77, 1992.
28. SOARES, M. O.; LEMOS, V.B. & KIKUCHI, R.K.P. Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: considerações sobre a classificação do recife biogênico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, p.238-243, 2009.

29. SOARES, M. O.; PAIVA, C.R ;
GODOY, T. ; SILVA, M.B. & CASTRO, C.S.S
. Gestão Ambiental de ecossistemas insulares: O caso da reserva Biológica do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, p. 347-361, 2010.

Manuscrito recebido em: 25 de fevereiro de 2011

Revisado e Aceito em: 25 de maio de 2013