

# MORFOLOGIA, MICROFACIOLOGIA E DIAGÊNESE DE *BEACHROCKS* COSTA-AFORA ADJACENTES À COSTA NORTE DO RIO GRANDE DO NORTE, BRASIL

Izaac CABRAL NETO<sup>1,2</sup>; Valéria Centurion CÓRDOBA<sup>1,3</sup> & Helenice VITAL<sup>1,3,4</sup>

(1) PPGG/UFRN – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, PRH-ANP22

(2) CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil – Rua Professor Antônio Henrique de Melo, 2010, Capim Macio, Natal/RN, CEP 59078-580.

(3) Departamento de Geologia/UFRN.

(4) Pesquisadora CNPq.

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caixa Postal 1596, CEP. 59072-970, Natal/RN, Brasil. Departamento de Geologia. Endereços eletrônicos: izaac\_cabral@yahoo.com, valeria.geo@ufrnet.br, helenice@geologia.ufrn.br.

Introdução	
Localização	
Materiais e métodos	
Compilação bibliográfica	
Imagem de satélite e morfologia	
Campo	
Coleta de amostras	
Petrografia	
Maturidade Mineralógica	
Microfácies	
Arcabouço geológico	
Bacia Potiguar	
Coberturas holocênicas – Depósitos plataformais	
Resultados	
Morfologia dos <i>beachrocks</i>	
Microfaciologia	
Microfácies Quartzarenítica	
Microfácies Quartzarenítica Bioclástica	
Microfácies Bio-Quartzarenítica	
Diagênese	
Compactação	
Cimentos	
<i>Cutículas Cripto-Cristalinas</i>	
<i>Franjas Prismáticas Isópacas</i>	
<i>Calcita Microcristalina</i>	
<i>Agregados Pseudo-Peloidais</i>	
<i>Espato Equante</i>	
Dissolução e Geração de Porosidade Secundária	
Oxidação	
Discussões	
Microfácies Quartzarenítica	
Parâmetros Texturais	
Parâmetros Composicionais	
Microfácies Quartzarenítica Bioclástica	
Parâmetros Texturais	
Parâmetros Composicionais	
Microfácies Bio-Quartzarenítica	
Parâmetros Texturais	
Parâmetros Composicionais	
Relação entre as três microfácies	
Evolução diagenética	
Considerações finais	
Agradecimentos	
Referências	

**RESUMO** - *Beachrock* é o termo atribuído às rochas sedimentares formadas pela cimentação de sedimentos praias por carbonatos de cálcio em zona de intermaré. Relatos deste tipo de rochas referem-nas, predominantemente, a ambiente transicional. Entretanto, um exemplo raro de *beachrocks* de zona costa-afora é constatado na plataforma setentrional do estado do Rio Grande do Norte. Estudo sistemático foi aqui desenvolvido para levantar informações a respeito da morfologia, composição, textura e gênese de tais rochas, e a partir delas, tecer comentários a respeito de suas implicações geológicas e seu significado paleoambiental. Para tanto, análises de um recorte da cena 215-063, do Landsat 7ETM+, e de 22 seções delgadas de amostras dos *beachrocks* foram utilizadas. Os *beachrocks* estudados estão dispostos sob dois tipos morfológicos predominantes: “recifes de plataforma externa” e “recifes de plataforma intermediária”. Ambos os tipos apresentam direção predominante WNW-ESE, semelhante a da atual linha de costa. De acordo com os aspectos petrográficos observados, três microfácies sedimentares foram identificadas, Quartzarenítica, Quartzarenítica Bioclástica e Bio-quartzarenítica, as quais sugerem composição silici-bioclástica para o arcabouço dos *beachrocks*. Composição esta idêntica a dos sedimentos plataformais e praias atuais. O cimento, predominantemente carbonático, é encontrado sob cinco morfologias principais: cutículas cripto-cristalinas, franjas prismáticas isópacas, calcita microcristalina, agregados pseudopeloidais e

espato equante. A evolução diagenética a qual a rocha foi submetida ocorreu em ambiente diagenético marinho raso, abrangendo, predominantemente, o estágio de eodiagênese. Por fim, pode-se afirmar que os *beachrocks* de zona costa-afora do estado do Rio Grande do Norte constituem um registro geológico de uma antiga linha de costa, a qual se encontra atualmente a 25 km do litoral setentrional.

Palavras-chaves: *beachrocks*, zona costa-afora, diagênese, microfácies, Rio Grande do Norte.

**ABSTRACT** - Beachrock is the term given to the sedimentary rock formed by the cementation of coastal sediments by calcium carbonates in the intertidal zone. Reports of this type of rocks are predominantly derived from transitional environment. However, a rare example of offshore beachrocks is found on the platform of the Rio Grande do Norte state. Systematic study has been developed to obtain information about the morphology, composition, texture and genesis of such rocks, and from them, make comments about their geological implications and its paleoenvironmental significance. For both analyzes, a cut scene 215-063 Landsat 7ETM and 22 thin sections were used. The beachrocks studied are arranged in two morphological types predominate: "outer shelf reefs" and "mid-shelf reefs". Both types have predominant WNW-ESE direction, similar to the current shoreline. According to observed petrographic aspects three sedimentary microfacies were identified: *Quartzarenítica*, *Quartzarenítica Bioclástica* and *Bio-Quartzarenítica*, which suggest composition siliciclastic and bioclastic to the beachrock framework. This is identical composition of shelf and coastal sediments. Cement, predominantly carbonate, is found in five main morphologies: cryptocrystalline coatings, isopachous prismatic rims, cryptocrystalline or micritic porefilling, pseudo-peloidal aggregates and equant spar. The diagenetic evolution which the rock was subjected occurred in shallow marine diagenetic environment, covering predominantly the stage eodiagenesis. Finally, it can be stated that offshore beachrocks besides the state of Rio Grande do Norte are a geological record of an ancient shoreline, which is currently 25 km far from the northern coast.

Keywords: beachrocks, offshore zone, diagenesis, microfacies, Rio Grande do Norte.

## INTRODUÇÃO

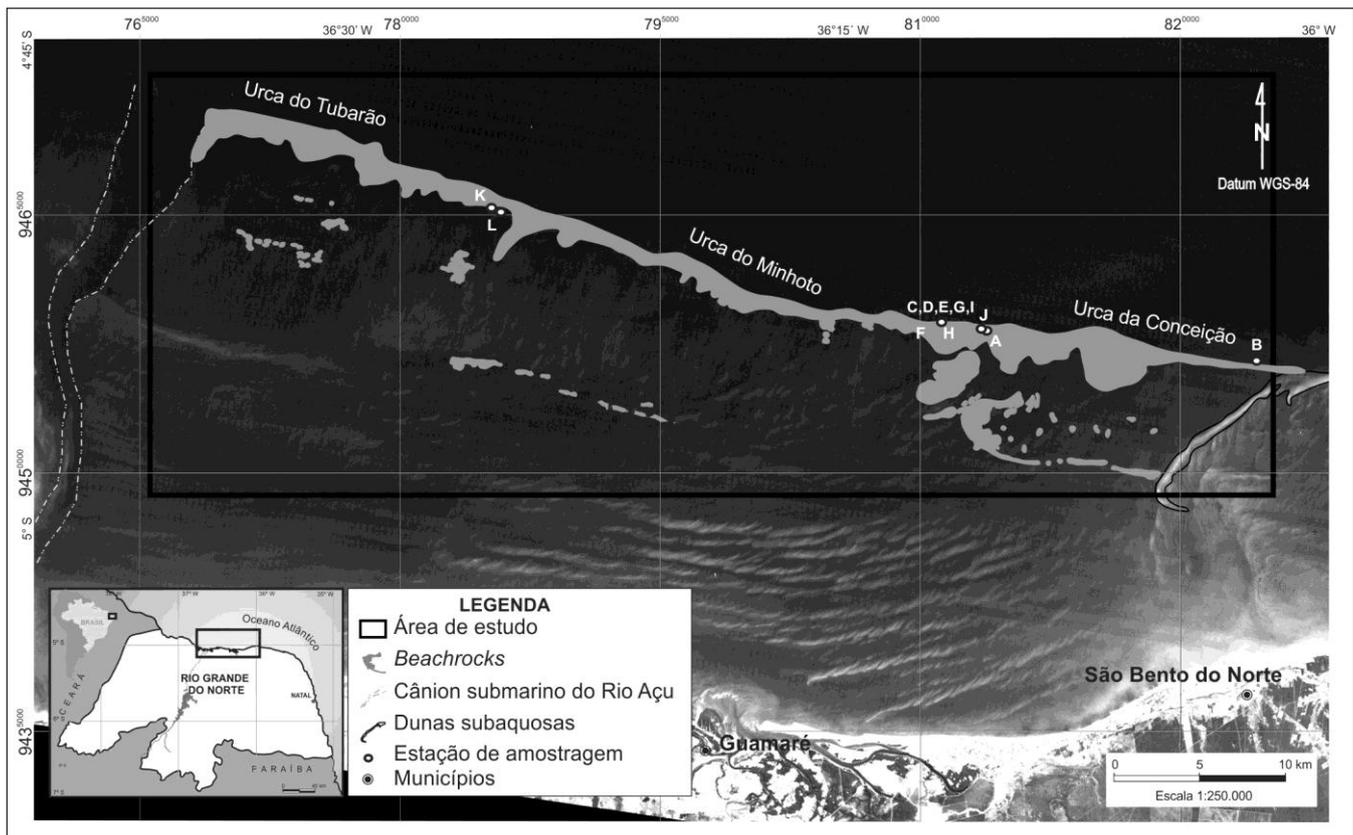
*Beachrock* é o termo atribuído às rochas sedimentares formadas pela cimentação de sedimentos praias por carbonatos de cálcio em zona de intermarés (Bricker, 1971; Hopley, 1986; Voudoukas *et al.*, 2007). A presença destas rochas é muito comum no estado do Rio Grande do Norte, onde ocorrem tanto na zona costeira quanto na zona costa-afora. Ressalta-se que estes últimos constituem um exemplo raro e pouco conhecido na literatura especializada. Os *beachrocks* de zona costeira do Rio Grande do Norte têm sido bastante estudadas ao longo dos últimos anos, quando diversos trabalhos foram realizados enfocando os mais variados temas, como, por exemplo: (i) datação e correlação como indicadores de variação do nível do mar (Caldas, 2002; Bezerra *et al.*, 2003); (ii) aspectos estruturais (Bezerra *et al.*, 2005); (iii) descrição, classificação,

identificação de microfácies sedimentares e diagênese (Vieira, 2005; Viera & De Ros, 2006; Vieira *et al.*, 2007); (iv) mapeamento (Santos *et al.*, 2007), entre outros. Apesar da quantidade relativamente grande de trabalhos publicados, poucos abordaram os *beachrocks* encontrados na porção costa-afora. Dentre esses têm destaque os trabalhos de Testa & Bosence (1999), Santos *et al.* (2007), Cabral Neto (2007) e Cabral Neto *et al.* (2010), os quais priorizam, respectivamente, controles biológicos/físicos na formação, morfologia em macro-escala e caracterização petrográfica. Tendo em vista a carência de informação, o presente trabalho pretende contribuir para o avanço do conhecimento a respeito dos *beachrocks* de zona costa-afora do Rio Grande do Norte, a partir do estudo dos aspectos morfológicos, micropetrográficos e diagenéticos.

## LOCALIZAÇÃO

A área em estudo compreende um retângulo com aproximadamente 140.000 ha, limitado pelas coordenadas 4°46'45'' S/ 36°37'20'' W e 4°57'60''S/ 36°1'15'' W, ao datum WGS-84, correspondendo respectivamente aos vértices

superior esquerdo e inferior direito (Figura 1). O objeto de estudo é constituído de um corpo de rocha denominado por pescadores locais de urcas de Conceição, Minhoto e Tubarão (Figura 1).



**Figura 1.** Carta-imagem a partir de recorte da cena 215-63 do Landsat7 ETM+ com localização da área estudada e delimitação dos *beachrocks* de zona costa-afora e das estações de amostragem.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Compilação bibliográfica

Como parte inicial do presente estudo, extensa pesquisa bibliográfica foi realizada para obtenção de trabalhos que abordassem direta ou indiretamente o tema *beachrocks*. Estudos de diversas partes do mundo foram consultados, incluindo livros técnicos, teses, dissertações, monografias e artigos de periódicos. Grande parte deste apanhado bibliográfico foi acessada através do Portal Periódicos CAPES (<http://www.periodicos.capes.gov.br>) e encontra-se citada ao longo do corrente texto.

### Imagem de satélite e morfologia

Para localização e delimitação espacial dos *beachrocks* de zona costa-afora, a cena 215-63 do Landsat 7 ETM+ de 05/04/2001, devidamente recortada e tratada digitalmente através do software Envi© versão 3.5, foi empregada. Esta etapa precedeu e subsidiou as etapas de campo, amostragem e interpretações morfológicas. Para os estudos de morfologia dos *beachrocks* foi adotado o esquema de classificação de recifes proposto por Scoffin &

Dixon (1983), o qual associa a forma do recife com o ambiente tectônico onde ocorrem.

### Campo

O campo foi realizado em duas etapas, sendo elas em março e setembro. Nestes períodos, o mar da plataforma norte-riograndense apresenta águas limpas e calmas, com condições ideais para mergulho. O acesso à área foi realizado por meio de barco motorizado com combustão de 6 cilindros a diesel. Este foi locado na cidade de Guararé que, por sua vez, também serviu de apoio logístico para as etapas de campo.

### Coleta de amostras

O esquema de amostragem adotado consistiu em coletar, de maneira aleatória, o maior número possível de amostras em cada uma das três diferentes regiões: Urca da Conceição, Urca do Minhoto e Urca do Tubarão (Figura 1). Ao todo, 22 amostras foram coletadas em 12 estações de amostragem (Figura 1). A coleta foi realizada por mergulhador profissional, devidamente equipado, munido de marreta,

talhadeira e sacos plásticos. GPS Garmin, modelo eTrex com 12 canais paralelos de recepção, foi utilizado para fornecer a localização das estações de amostragem.

### Petrografia

A partir das amostras coletadas, 22 seções delgadas foram confeccionadas num tamanho padrão de 3,0 cm x 5,0 cm sem utilização de lamínulas. Azul de oracet B foi aplicado para auxiliar na determinação e quantificação do espaço poroso. Análises petrográficas de cunho qualitativo e quantitativo foram realizadas a fim de identificar os parâmetros composicionais,

texturais e diagenéticos, bem como, estimar valores percentuais para cada um deles. Tabelas padrões de porcentagem foram adotadas para auxiliar na quantificação dos parâmetros analisados. Todas as seções delgadas foram descritas através de microscópio de luz transmitida da marca Olympus, modelo BX41TF, dotado de platina giratória e objetivas de 4x, 10x, 40x e 100x. Câmera digital Sony, modelo DSC-91, com 5.0 mega pixels de resolução, acoplada ao microscópio, foi empregada para captura de imagens. As análises de composição e textura tiveram por base os trabalhos apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Trabalhos utilizados como base para análise micropetrográfica.

	PARÂMETRO	TRABALHO EMPREGADO
COMPOSIÇÃO	Cimento	Vieira & De Ros (2006)
	Porosidade	Scholle (1979)
TEXTURA	Granulometria	Wentworth (1922)
	Grau de seleção	Folk (1968)
	Arredondamento e esfericidade	Powers (1953)
	Empacotamento	Kahn (1956)
	Maturidade mineralógica	(convenção própria)
	Maturidade textural	Folk (1974 <i>apud</i> Scholle 1979)
	Classificação	McBride (1963)

Por ausência de métodos apropriados, foram desenvolvidos e adotados procedimentos próprios para análises de maturidade textural e microfácies de *beachrocks* de zona costa-afora.

#### Maturidade Mineralógica

Convencionou-se para este estudo usar os limites de 75% e 95% de quartzo + chert para classificar as amostras analisadas quanto à maturidade mineralógica. Dessa forma, a rocha que apresentar valor de quartzo + chert abaixo de 75% é classificada como imatura, entre 75 e 95%, matura e acima de 95%, supermatura.

#### Microfácies

Convencionou-se usar a composição dos grãos do arcabouço para a diferenciação das microfácies nos *beachrocks* estudados, em que a quantidade de bioclastos presentes se tornou o fator determinante. Este parâmetro foi escolhido devido a constatação de agrupamentos das amostras analisadas em intervalos distintos. A partir desta observação, três intervalos foram separados, de acordo com o percentual de bioclastos, nas seguintes faixas: de 0 a 2,9%, de 3,0 a 9,9% e de 10 a 30%, as quais correspondem, respectivamente, às microfácies: Quartzarenítica, Quartzarenítica Bioclástica e Bio-quartzarenítica.

## ARCABOUÇO GEOLÓGICO

A área em estudo encontra-se no domínio de plataforma continental brasileira, adjacente ao estado do Rio Grande do Norte, que é dominada por depósitos plataformais de

natureza mista: carbonatos e siliciclastos (Vital *et al.* 2005). Embora, especificamente, esta região não possua estratigrafia quaternária bem definida, estudos realizados com depósitos

análogos na linha de costa norte-rio-grandense (Caldas, 2002; Bezerra *et al.*, 2003, 2005; Vieira & De Ros, 2006; Vieira *et al.*, 2007) sugerem que se tratam de depósitos holocênicos. Estes repousam discordantemente sobre unidades terciárias da Bacia Potiguar.

### **Bacia Potiguar**

Localizada no extremo NE da Província Borborema (Almeida & Hasuy, 1984), a Bacia Potiguar abrange uma área total de aproximadamente 49.000 km<sup>2</sup>, dos quais 26.500 km<sup>2</sup> (~ 54%) correspondem à porção submersa, onde está inserida a área de estudo, e 22.500 km<sup>2</sup> (~ 46%) à porção emersa (Soares *et al.*, 2003). Pessoa Neto *et al.* (2007) dividiram o registro estratigráfico da Bacia Potiguar em três Supersequências: *i. Rifte*, caracterizadas por folhelhos, argilitos, arenitos e conglomerados de sistemas fluvial, lacustres e leques aluviais, das formações Pendências e Pescada, e por vulcânicas toleíticas da Formação Rio Ceará-Mirim; *ii. Pós-Rifte*, marcada por rochas siliciclásticas e carbonáticas de sistemas fluvial e deltáico da Formação Alagamar; e *iii. Drifte*, caracterizada por rochas siliciclásticas de sistema fluvial (formações Açú, Tibau e

Barreiras) e plataformal (formações Quebradas e Ubarana), carbonáticas de origem plataformal (formações Ponta do Mel, Jandaíra e Guamaré) e vulcânicas da formação Macau. Tais supersequências estão relacionadas aos diferentes estágios tectônicos ocorridos ao longo da formação da bacia: duas fases de rifteamento (Rifte I e II), uma fase pós-rifte e uma fase termal (Drifte).

### **Coberturas holocênicas – Depósitos plataformais**

Vital *et al.* (2005) subdividiram os depósitos plataformais adjacentes ao litoral setentrional do Rio Grande do Norte em 10 fácies distintas, sendo elas: areia siliciclástica, areia silicibiolástica, areia bio-siliciclástica, areia bioclástica, marga calcária, lama calcária, lama terrígena, marga arenosa, cascalho siliciclástico, cascalho bioclástico. *Beachrocks* compreendem a outra unidade presente na plataforma setentrional do Rio Grande do Norte. Estes foram pouco estudados até o momento e constituem objeto de pesquisa do presente trabalho. As características destas rochas serão detalhadas no item subsequente.

## **RESULTADOS**

### **Morfologia dos *beachrocks***

Os *beachrocks* estudados apresentam duas formas predominantes que, de acordo com a classificação de Scoffin & Dixon (1983), podem ser denominadas de: *recife de plataforma externa* e *recife de plataforma intermediária*. O recife de plataforma externa compreende um corpo extenso e contínuo, de direção WNW-ESE, com largura variável, tendo as porções mais largas próximas à Urca da Conceição e as mais estreitas próximo à Urca do Minhoto (Figura 1), e espessura de até 25 m. Já os recifes de plataforma intermediária, também com direções WNW-ESE, se apresentam irregulares tanto em continuidade quanto em dimensões. Aqueles situados junto à Urca da Conceição se apresentam mais largos e, em geral, com formas elípticas a semicirculares, enquanto

que os demais – junto às urcas do Minhoto e do Tubarão – apresentam dimensões, relativamente, menores e formas lineares (Figura 1).

### **Microfaciologia**

Três microfácies foram identificadas nos *beachrocks* estudados: (1) Quartzarenítica, (2) Quartzarenítica Bioclástica e (3) Bio-Quartzarenítica. Estas foram propostas de acordo com sistemática adotada no corrente trabalho (ver item **MATERIAIS E MÉTODOS**). Em termos proporcionais, todas as microfácies são equivalentes, uma vez que de um total de 22 lâminas descritas, 07 estão relacionadas à microfácies 1 (32%), 08 à microfácies 2 (36%) e 07 à microfácies 3 (32%) (Tabela 2).

**Tabela 2.** Análise quantitativa das microfácies estudadas. Valores em %. Qz - quartzo; Feld - feldspatos; Bio - bioclastos; Frx - fragmentos de rochas. \*Ver localização das estações de amostragem na Figura 1.

	Lâmina	Estação de amostragem*	Composição do arcabouço					Grãos do arcabouço	Cimento	Matriz	Porosidade
			Qz	Feld	Bio	Frx	Acessórios				
Microfácies Quartzarenítica	UT_1.1	K	96	1.5	1	0.5	1	83	15	0	2
	UT_2.1	L	98	1	0.5	0.5	0	85	10	0	5
	UT_2.2	L	98	1	1	0	0	90	5	0	5
	UT_2.3	L	98	1	0.5	0.5	0	90	7	0	3
	UM_3.1	C	92	5	1	1	1	72	20	3	5
	UM_5.1	E	96	2	0	1	1	80	13	2	5
	UM_9.3	J	93.5	3	2	1	0.5	75	20	1	4
Microfácies Quartzarenítica Boclásfica	UT_1.2	K	90	2	5	1	2	60	20	17	3
	UT_1.3	K	90	2	7	0.5	0.5	55	25	15	5
	UM_8.2	H	91	2	5	1	1	83	12	0	5
	UM_8.3	I	91.5	3	4	1	0.5	88	10	0	2
	UM_8.4	I	91	1	3	5	0	90	8	0	2
	UM_9.2	J	82	4	8	5	1	82	15	0	3
	UC_10.1	A	90.5	3	4	2	0.5	77	15	5	3
	UC_10.2	A	93	3	3	1	0	81	10	4	5
Microfácies Bio- Quartzarenítica	UT_1.5	K	86	3	10	0.5	0.5	65	15	18	2
	UM_4.1	D	76	3	20	1	0	75	15	5	5
	UM_6.1	F	71	2	25	1	1	84	10	1	5
	UM_7.1	G	85	3	10	1	1	84	5	3	8
	UM_8.1	H	79	1	17	2	1	79	15	0	6
	UM_9.1	J	74.5	2	20	3	0.5	88	10	0	2
	UC_11.1	B	82	1	12	4	1	85	12	0	3

### *Microfácies Quartzarenítica*

Texturalmente (Tabela 3), esta microfácies é caracterizada por apresentar granulometria que varia desde areia muito fina até areia muito grossa com desvio padrão (f) de até 2,0 f. O grau de seleção é variável, e partir dele é possível separar três litotipos distintos dentro desta microfácies, sendo eles: (1) muito bem selecionado a bem selecionado, composto pela fração mais fina (areia muito fina e areia fina a areia média); (2) bem selecionado, composto pela fração mais grossa (areia média a grossa); e (3) pobremente selecionado, composto por grãos de todas as frações (desde areia muito fina até areia muito grossa). Quanto à

esfericidade, os siliciclastos apresentam padrões variáveis, ora tendendo a baixo, ora tendendo a alto, enquanto que o grau de arredondamento é predominantemente subarredondado. Os grãos flutuantes refletem o empacotamento frouxo desta microfácies. A quantidade de constituintes resistentes (quartzo + chert) é muito superior à quantidade de constituintes instáveis (feldspatos + fragmentos de rochas), de forma que é classificada como mineralogicamente supermatura, enquanto que texturalmente pode ser enquadrada nas classes submatura (litotipo 3) e supermatura (litotipos 1 e 2).

**Tabela 3.** Análise qualitativa das microfácies estudadas. Cimento: CMc - calcita microcristalina; FPi - franja prismática isópaca; CCc - cutículas cripto-cristalinas. Constituinte principal: qz - quartzo; bio – bioclastos. Minerais acessórios: bt - biotita; musc - muscovita; ep - epidoto; hn - hornblenda; zr – zircão. Tamanho do grão: af - areia fina; amf - areia muito fina; am - areia média; ag - areia grossa; amg - areia muito grossa; Grau de Seleção: bs - bem selecionado; mbs - muito bem selecionado; ms - moderadamente selecionado; ps - pobremente selecionado; mps - muito pobremente selecionado. Esfericidade/Arredondamento: med - média; alt - alta; bx - baixa; subarr - subarredondado; subang - subanguloso; arr - arredondado; ang – anguloso.

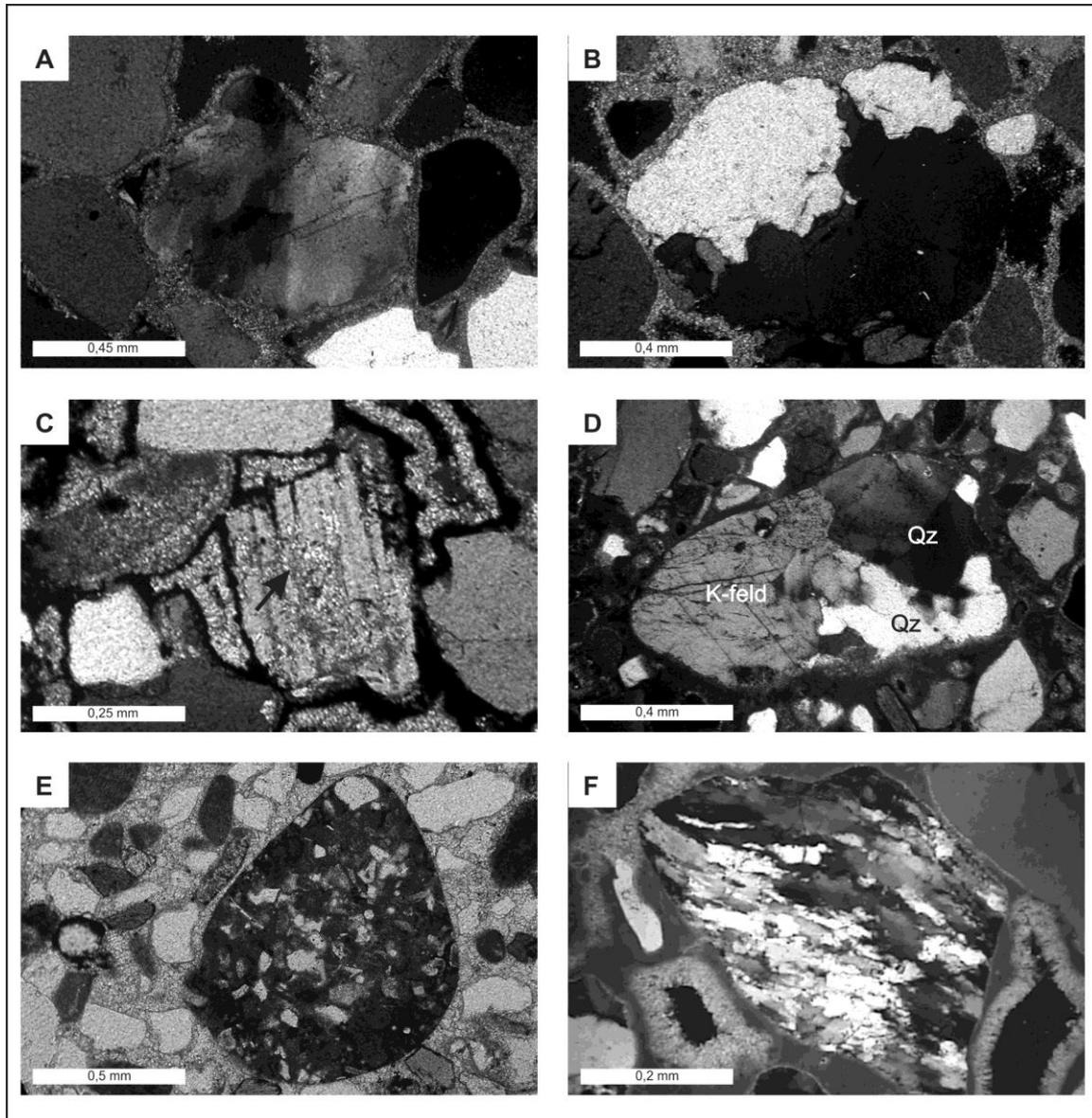
	Lâmina	Classificação (McBride 1963)	Tamanho do grão	Seleção	Constituinte principal	Cimento principal	Porosidade	Minerais acessórios	Esfericidade/Arredondamento
Microfácies Quartzarenítica	UM_9.3	Quartzarenito	af-am	ms-bs	qz	CMc	secundária	-	med-bx/ subang
	UT_2.3	Quartzarenito	af-amg	ps	qz	CMc	primária	-	med-bx/ subarr-subang
	UT_2.1	Quartzarenito	am-ag	bs	qz	FPi	primária	musc	med-alt/ subarr-arr
	UT_2.2	Quartzarenito	am-ag	bs-mbs	qz	FPi	primária	-	med/ subarr-arr
	UT_1.1	Quartzarenito	amf	mbs	qz	CMc	secundária	ep, bt, hn	med-bx/ subang-ang
	UM_3.1	Subarcósio	amf-ag	ps-ms	qz	CCc	secundária	bt, ep, hn, musc, zr	med-alt/ subarr-subang
	UM_5.1	Quartzarenito	amf-amg	mps	qz	CCc	secundária	bt, hn, ep, zr	med-alt/ subang e subarr- arr
Microfácies Quartzarenítica Bioclástica	UM_8.3	Quartzarenito	af	bs-mbs	qz + bio	CMc	secundária	musc, ep, hn.	med / subang-subarr
	UM_8.2	Quartzarenito	af-am	ms	qz + bio	CMc	secundária	bt, hn	med/ subarr
	UC_10.1	Quartzarenito	af-am	ms	qz + bio	CMc	secundária	-	med/ ang
	UC_10.2	Quartzarenito	af-am	ms-bs	qz + bio	CMc	primária	bt	med-alta/ subarr
	UT_1.2	Quartzarenito	af-amg	mps	qz + bio	CMc	secundária	musc, bt, ep, hn	bx/ang
	UM_8.4	Quartzarenito	af-amg	ps-mps	qz + bio	CMc	secundária	musc	med-alt/ ang
	UM_9.2	Quartzarenito	am-ag	ms-ps	qz + bio	CCc	secundária	-	med-bx/ ang
	UT_1.3	Quartzarenito	amf-am	ms	qz + bio	CMc	secundária	hn, bt	med-bx/ subarr-arr
Microfácies Bio-Quartzarenítica	UM_4.1	Quartzarenito	af-ag	ms-ps	bio + qz	CMc	secundária	bt	med-alt/ subarr-subang
	UC_11.1	Quartzarenito	af-ag	ms-ps	bio + qz	FPi	secundária	bt, hn, musc	med-bx/ subarr-arr
	UM_9.1	Quartzarenito	am-ag	bs	bio + qz	CMc	secundária	musc, bt	-
	UM_8.1	Quartzarenito	am-ag	ms-ps	bio + qz	CMc	secundária	ep, musc, bt, hn, zr	-
	UM_7.1	Quartzarenito	amf-ag	ms-ps	bio + qz	CMc	secundária	ep, bt, hn	med-alt/ subarr-arr
	UT_1.5	Quartzarenito	amf-am	ms-ps	bio + qz	CMc	secundária	musc, zr, bt, ep	med-bx/ subang-subarr
UM_6.1	Quartzarenito	amf-amg	mps	bio + qz	FPi	secundária	ep, bt, hn	med-alt/ arr-subarr	

Quanto à composição do arcabouço, os grãos mais importantes são os siliciclastos, sobretudo grãos de quartzo (média > 90%; Tabelas 2 e 3). Além desse, ainda estão presentes feldspatos, bioclastos, fragmentos de rochas e minerais acessórios, respectivamente, em ordem decrescente de percentual (Tabela 2). Grãos de quartzo monocristalino com extinção ondulante (Figura 2A) é o tipo mais comum. Grãos de quartzo policristalino ocorrem de forma rara e, em geral, apresentam textura equigranular com

fenocristais (Figura 2B) e alongada – típicas de derivação ígnea e metamórfica, respectivamente. Dentre os feldspatos presentes (média 2%, máx. 5%; Tabela 2), o mais comum é a microclina, seguida por ortoclásio e plagioclásio. Em geral, os feldspatos tendem a se concentrar nas frações mais finas e normalmente apresentam bordas corroídas e maclas alteradas (Figura 2C). Bioclastos (média < 2,9%; Tabela 2) ocorrem de modo isolado e, muitas vezes, recristalizados. Fragmentos de

algas calcárias e bivalves (incluindo os filos *Mollusca* e *Brachiopoda*) são os mais importantes. Fragmentos de rocha (média < 1,0%; Tabela 2) são derivados principalmente de rochas plutônicas (Figura 2D) e

sedimentares, os quais se concentram principalmente na fração mais grossa. Muscovita, biotita, epidoto, hornblenda e zircão constituem a assembléia de minerais acessórios (Tabela 3).



**Figura 2.** Principais siliclastos presentes nas microfácies analisadas. (A) Grão de quartzo com extinção ondulante de provável origem metamórfica (lâmina UT\_2.2, microfácies Quartzarenítica). (B) Grão de quartzo policristalino com textura equigranular, típica de derivação plutônica (lâmina UT\_2.3, microfácies Quartzarenítica). (C) Grão de plagioclásio com bordas corroídas e alteração ao longo dos planos de clivagem, indicado pela seta (lâmina UC\_11.1, microfácies Bio-Quartzarenítica). (D) Fragmento de rocha ortoderivado formado por cristais de quartzo e K-feldspato (lâmina UM\_3.1, microfácies Quartzarenítica). (E) Fragmento de rocha paraderivado, provavelmente de *beachrocks*. Observe as bordas bem arredondadas, resultante de processos deposicionais atuantes (lâmina UM\_8.4, microfácies Bio-Quartzarenítica Bioclástica). (F) Fragmento de rocha com textura alongada, típica de grãos derivados de quartzitos e xistos (lâmina UM\_9.1, microfácies Bio-Quartzarenítica).

O cimento (média 13%; Tabela 2) está presente sob três tipos principais: calcita

microcristalina, franjas prismáticas isópacas e cutículas cripto-cristalinas, citados em ordem

decrecente de acordo com o grau de importância (Tabela 3). Os cimentos de calcita microcristalina e de cutículas cripto-cristalinas ocorrem no centro dos poros, e, em raros casos, calcita microcristalina ocorre preenchendo cavidades internas de bioclastos. O do tipo franja prismática isópaca cresce na borda dos grãos.

A matriz (média < 2%; Tabela 2) – de tonalidade marrom e contendo fragmentos muito pequenos (< 0,063 mm) de bioclastos – concentra-se em porções isoladas e, em geral, ocorre associada ao cimento de cutículas cripto-cristalinas.

A porosidade (média 4%; Tabela 2) mais importante é a secundária (Tabela 3) dos tipos agigantada e móldica. Porosidade primária interpartícula também está presente, porém em menor proporção.

#### *Microfácies Quartzarenítica Bioclástica*

Apresenta moda granulométrica tendendo a se concentrar nas frações mais finas (areias muito fina e fina; Tabela 3). O desvio padrão varia de baixo (0,5 f) a alto (2,0 f), em que a ocorrência desses altos valores é influencia da quantidade de bioclastos e fragmentos de rocha presente nas amostras (Tabela 2). Dois litotipos texturais são reconhecidos: (1) bem selecionado a moderadamente selecionado, composto pela fração mais fina (areia muito fina e areia fina a média), e (2) pobremente a muito pobremente selecionado, composto por frações diversas (desde areia muito fina até areia muito grossa). Os grãos do arcabouço tendem a apresentar esfericidade, predominantemente, intermediária e exibir baixo índice de arredondamento, em que são tipicamente angulosos a subangulosos (Tabela 3). Assim como na microfácies Quartzarenítica, o arranjo entre os grãos é flutuante, muito embora os contatos pontual e reto ocorram de modo raro. É considerada uma microfácies mineralogicamente matura, enquanto que texturalmente se enquadra em dois campos de classificação: submatura (litotipo 2) e matura (litotipo 1).

Com respeito à composição do arcabouço, quartzo de longe é o siliciclasto predominante, seguido por feldspatos e fragmentos de rocha. Grãos de quartzo ocorrem principalmente na forma monocristalina com extinção imediata. Microclina e ortoclásio representam os

feldspatos mais importantes, os quais tendem a se concentrar nas frações mais finas. Estes feldspatos apresentam normalmente bordas corroídas e alteração ao longo dos planos de clivagens. Fragmentos de rocha são raros nesta microfácies (< 2,0%; Tabela 2) e, geralmente, são compostos por fragmentos do próprio *beachrock* (Figura 2E). Apesar da grande quantidade de siliciclastos, atenção é dada aos bioclastos (3,0 a 9,9%; Tabela 2), representados principalmente por: algas calcárias, bivalves (abrangendo os filos *Mollusca* e *Brachiopoda*) e foraminíferos bentônicos (subordens *rotaliína*, *textulariína* e *milioliína*). A assembléia de minerais acessórios é idêntica à observada na microfácies Quartzarenítica, sendo composta por: muscovita, biotita, epidoto, zircão e hornblenda (Tabela 3).

O cimento (média 15%; Tabela 2) ocorre principalmente sob o tipo calcita microcristalina tanto nas bordas dos grãos como nos espaços intergranulares. O cimento de cutículas cripto-cristalinas também é comum em alguns casos ocorrendo, em geral, ao redor dos siliciclastos. Além desses, ainda estão presentes os tipos pseudo-peloidal e espato-equante.

A matriz presente é secundária e apresenta quantidades bastante variadas nas amostras analisadas (Tabelas 2 e 3). Em algumas delas, a quantidade de matriz chega a ser quase que equiparável com a do cimento presente, alcançando até 17% (Tabela 2). Apresenta-se como uma massa extremamente fina, de tonalidade amarrozanda com fragmentos de bioclastos.

A porosidade (média de 3,5%) é principalmente do tipo secundária interpartícula, evidenciada pela dissolução parcial e poros alongados. Porosidade primária interpartícula ocorre, porém, de forma menos frequente.

#### *Microfácies Bio-Quartzarenítica*

Apresenta grãos com tamanhos bastante variados, os quais podem exibir frações desde areia muito fina até areia muito grossa (Tabela 3). As frações de areia muito fina a areia média são compostas quase que exclusivamente por siliciclastos, enquanto que as frações mais grossas são formadas por bioclastos. Essa grande variação no tamanho das partículas

reflete o valor elevado do desvio padrão (até 2,0 f) e, conseqüentemente, influencia no grau de seleção, definido como pobremente a moderadamente selecionado (Tabela 3). Quanto ao conjunto esfericidade/arredondamento, a microfácies apresenta grãos com esfericidade intermediária, tendendo a alta, e subarredondados, tendendo a arredondados (Tabela 3). Os grãos do arcabouço estão arranjados de maneira flutuante, muito embora contatos pontuais (comuns) e retos (raros) possam ocorrer. Tais contatos refletem o empacotamento do tipo frouxo presente nesta rocha. Esta microfácies é classificada como mineralogicamente madura e texturalmente submatura.

Composicionalmente (Tabela 2), esta microfácies é formada por grãos de naturezas siliciclástica e bioclástica. Embora a quantidade de bioclastos seja relativamente elevada (aproximadamente 17%), a quantidade de siliciclastos é bastante superior. Quartzo (média 79%) monocristalino com extinção imediata é o siliciclasto mais importante, seguido por feldspatos (média 2,1%; principalmente plagioclásios e K-feldspatos). Fragmentos de rocha, apesar de raros (média 1,8%), são principalmente para- e metaderivados (Figura 2F). Bioclastos (média 16,3%; Tabela 2) são representados por: algas calcárias (Figura 3A), foraminíferos bentônicos (Figuras 3B e 3C; subordens *rotaliína*, *milioliína*, *textulariína* e *fusuliína*), bivalves (Figura 3D; incluindo os filos *Mollusca* e *Brachiopoda*), gastrópodes (Figura 3E), briozoários e equinodermatas (Figura 3F).

Com uma média de 12% (Tabela 2) dos constituintes composicionais da rocha, o cimento predominante ocorre sob a forma de calcita microcristalina, apesar dos tipos franja

prismática isópaca e cripto-cristalino estarem presentes. O tipo predominante ocorre, em geral, preenchendo espaço intergranular como uma fase posterior à franja e/ou ao cimento cripto-cristalino.

A matriz predominante é do tipo secundário (Tabela 3) e, assim como nas demais microfácies, contém fragmentos muito pequenos de bioclastos.

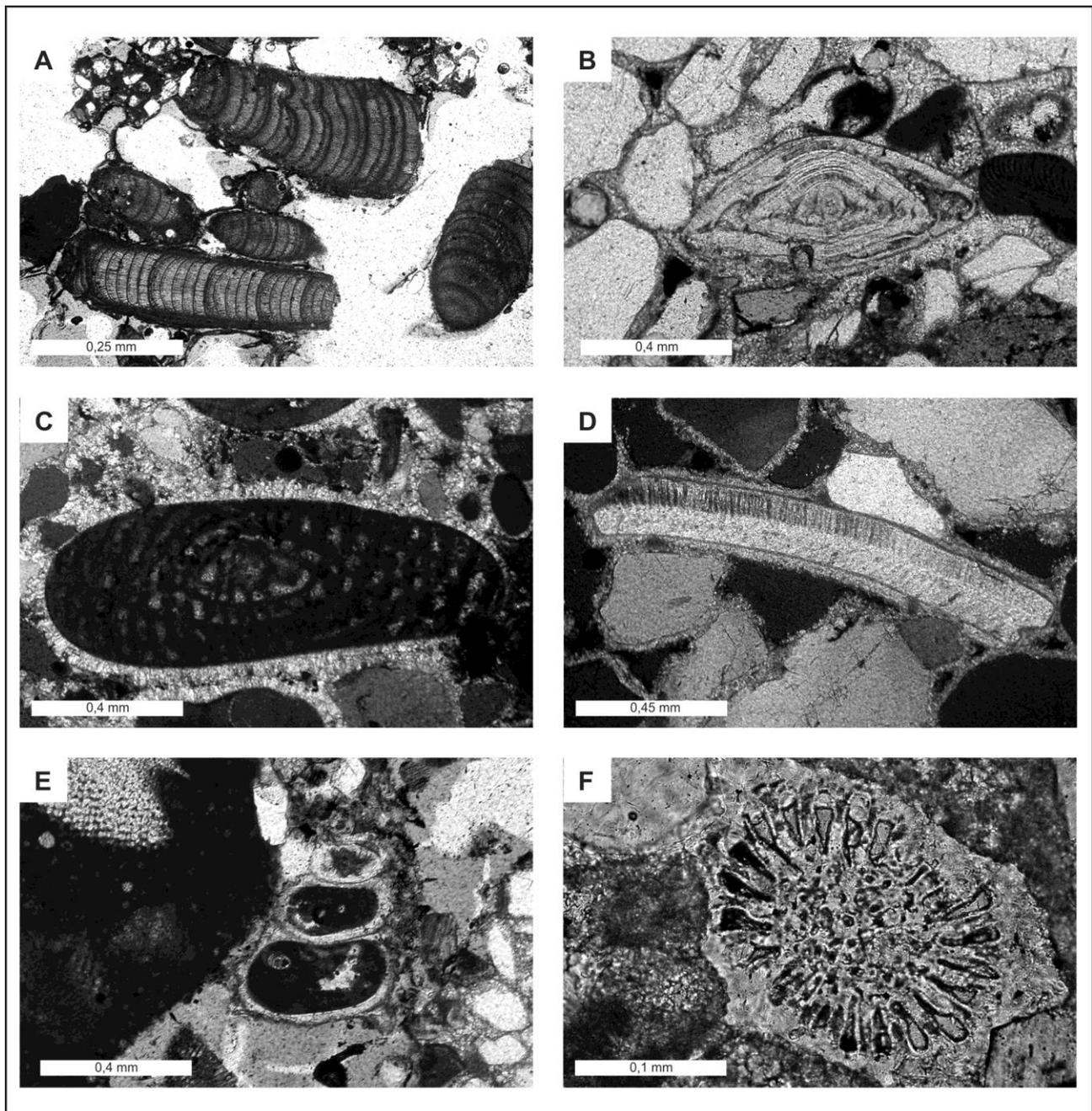
Porosidade (média 4,5%) é predominantemente secundária do tipo interpartícula. Porém, porosidade primária também está presente, sob o tipo interpartícula e, de modo mais raro, intrapartícula nos bioclastos.

### Diagênese

Os principais processos diagenéticos atuantes nos *beachrocks* analisados são compactação e, de forma mais intensa, cimentação. A descrição de tais processos será apresentada seguindo ordem cronológica proposta.

#### Compactação

O processo de compactação atuante, independentemente da microfácies analisada, se restringiu à compactação física. Tal conclusão se baseia no fato de que os grãos presentes nas rochas apresentam contatos predominantemente flutuantes, condicionando empacotamento do tipo frouxo a estas rochas. Este fato indica que antes mesmo que os efeitos da compactação física se mostrassem muito pronunciados, deram-se início de forma precoce os eventos de cimentação. Evidências de compactação química, tais como estilólitos ou contatos interpenetrativos, não foram observadas nas amostras estudadas.



**Figura 3.** Principais bioclastos encontrados nas microfácies analisadas. (A) Algas calcárias vermelhas. Compreende o tipo mais comum de bioclastos presente nas amostras estudadas (lâmina UT\_1.5, microfácies Bio-Quartzarenítica). (B) Foraminífero bentônico da subordem rotaliina (lâmina UM\_4.1, microfácies Bio-Quartzarenítica), indicativo de ambiente marinho raso. (C) Foraminífero bentônico da subordem fusuliina (lâmina UM\_4.1, microfácies Bio-Quartzarenítica), indicativo de ambiente marinho raso. (D) Fragmento de bivalve, possivelmente do filo Mollusca. Notar o arranjo interno bem preservado com textura fibrosa (lâmina UT\_2.2, microfácies Quartzarenítica). (E) Seção longitudinal de gastrópode bem preservada. Cimento de cutículas cripto-cristalinas preenche cavidades internas (lâmina UT\_1.5, microfácies Bio-Quartzarenítica). (F) Raro exemplar de espinho de equinóide visto em seção transversal. Este tipo de microorganismo vive em ambiente marinho com salinidade normal a baixa (lâmina UC\_11.1, microfácies Bio-Quartzarenítica).

## *Cimentos*

### ***Cutículas Cripto-Cristalinas***

Caracterizado como uma massa de textura extremamente fina (cristal < 5µm), de cor marrom escuro (Figura 4A). Esta morfologia de cimento carbonático aparece frequentemente ao redor tanto dos siliciclastos quanto dos bioclastos. De modo geral, o cimento carbonático se precipita primeiramente sob esta forma, sendo observado em todas as microfácies analisadas. Esse tipo de cimento representa pequena fração (em média 10%) em relação aos demais observados.

### ***Franjas Prismáticas Isópacas***

Correspondem à precipitação de cristais prismáticos de carbonato, dispostos perpendicularmente ao redor dos grãos (Figura 4B). Esse tipo de cimento é muito comum nas amostras analisadas de todas as microfácies. Ele ocorre circundando bioclastos e siliciclastos. Porém, ora pode apresentar-se como uma franja espessa – com até 0,20 mm de espessura – e bem desenvolvida, ora como uma franja delgada e incipiente. Em alguns casos essa franja pode precipitar dentro de bioclastos, preenchendo as cavidades internas dos mesmos. De forma geral, as franjas presentes ao redor de bioclastos tendem a ter cristais com maior espessura, enquanto que naquelas ao redor de siliciclastos os cristais são menos espessos. Muito embora não seja o predominante, esse tipo de cimento é bastante disseminado nas amostras analisadas (em torno de 20% do total) e é o segundo tipo morfológico a se precipitar – quando não é o primeiro – crescendo predominantemente na superfície dos grãos ou sobre o cimento criptocristalino.

### ***Calcita Microcristalina***

Este tipo de cimento é caracterizado pela precipitação de pequenos cristais (< 0,01 mm)

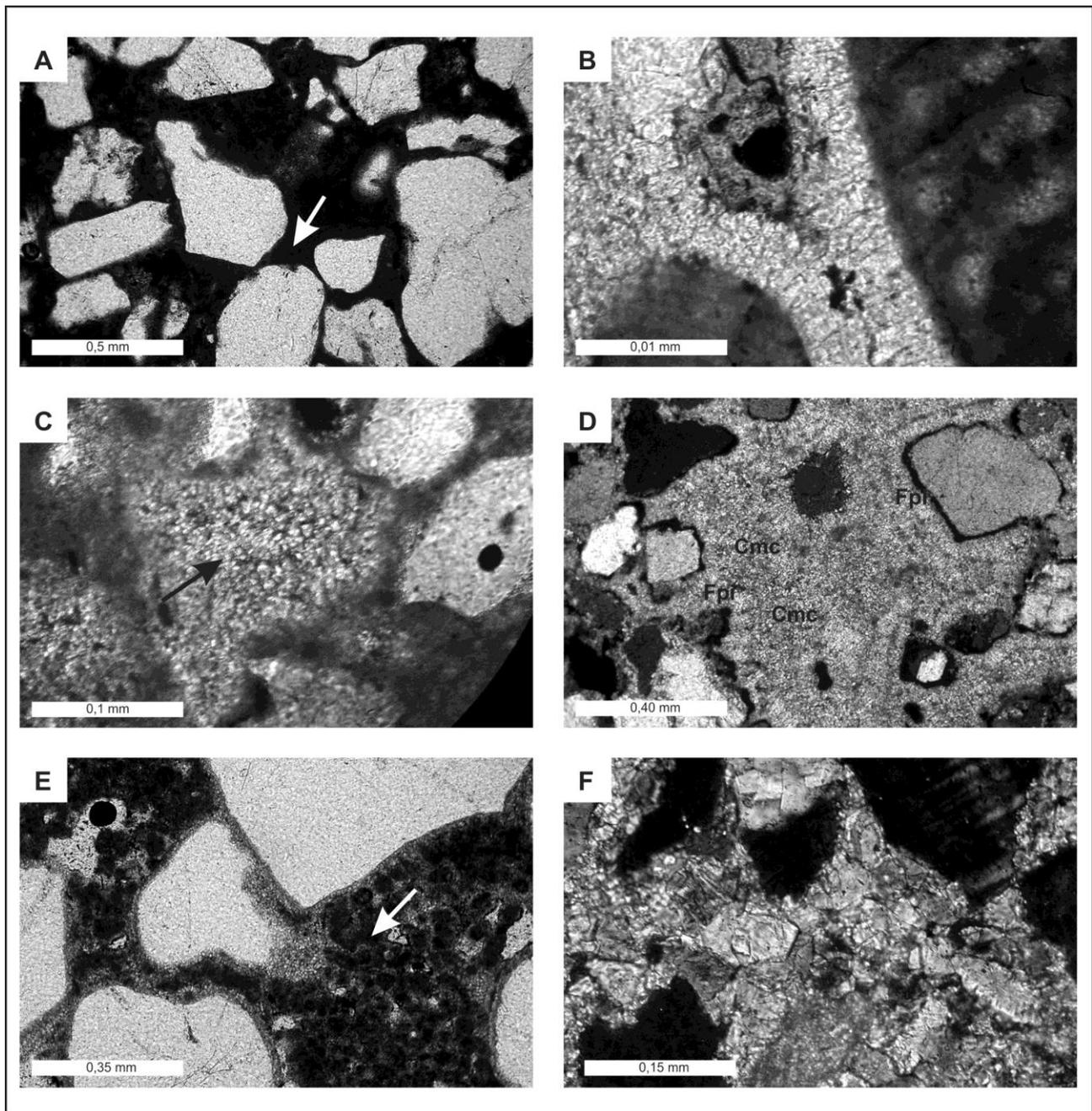
de calcita, predominantemente, nos espaços intergranulares (Figura 4C), sendo o mais comum nas rochas estudadas (em torno de 50%). Ele ocorre sempre associado às franjas prismáticas isópacas. Acredita-se que esse tipo compreenda ao terceiro estágio de cimentação (Figura 4D).

### ***Agregados Pseudo-Peloidais***

Consiste de uma massa, em geral, de tonalidade amarronzada que contém partículas subesféricas a elipsoidais, de tamanho silte fino (< 0,016 mm), bastante micritizadas (Figura 4E). A cristalinidade bastante fina impossibilita o reconhecimento de possíveis estruturas internas. Esse tipo de cimento ocorre de forma isolada (média 12%) preenchendo o espaço intergranular nas amostras analisadas. Muitas vezes pode ser confundido com a lama carbonática presente em algumas amostras, entretanto não contém fragmentos de bioclastos como tal lama apresenta. Agregados pseudo-peloidais se precipitam no interior do poro.

### ***Espato Equante***

Caracterizado por apresentar cristais relativamente grandes (até 0,03 mm), em geral bem formados (subédricos a euédricos), que se precipitam nas bordas ou, mais freqüentemente, no interior dos poros (Figura 4F). Essa morfologia de cimento ocorre de forma frequente nas amostras analisadas, porém, com pouca expressividade (média 7%). Ele cresce, predominantemente, sobre as franjas prismáticas isópacas ou sobre a superfície dos grãos do arcabouço, tendendo a aumentar o tamanho dos cristais à medida que se aproxima do centro do poro. Curiosamente, não ocorre associado com o tipo calcita microcristalina, de modo que onde um se precipita o outro não aparece, e vice-versa.



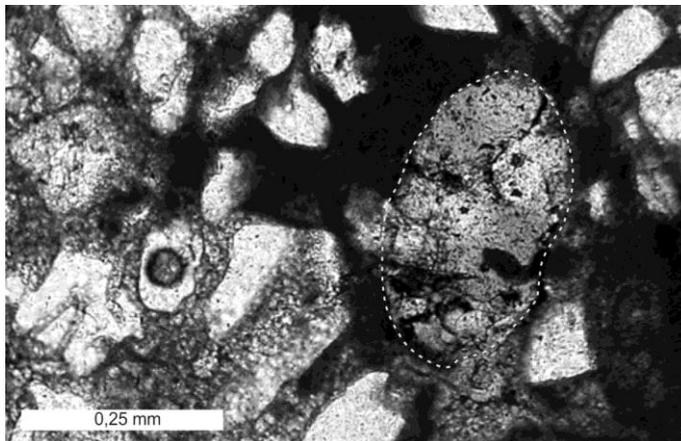
**Figura 4.** Principais morfologias de cimento carbonático encontrados nas microfácies estudadas.

(A) Cutículas cripto-cristalinas precipitado no espaço intergranular. Em geral, é a primeira morfologia de cimento a se formar (lâmina UM\_3.1, microfácies Quartzarenítica). (B) Franjas prismáticas isópacas precipitadas ao redor de bioclastos. Ocorre como segunda – quando não, primeira – morfologia de cimento a se formar (lâmina UM\_4.1, microfácies Bio-Quartzarenítica). (C) Calcita microcristalina preenchendo espaço intergranular. Corresponde à terceira morfologia de cimento a se precipitar, em geral, ocupando o centro dos poros (lâmina UT\_1.1, microfácies Quartzarenítica). (D) Relação entre as várias morfologias de cimento e suas fases de precipitação. Inicialmente, cutículas cripto-cristalinas são formadas ao redor dos grãos (notar película escura). Em fase posterior, ocorre a precipitação de franjas prismáticas isópacas (Fpi), seguida por formação de calcita microcristalina (Cmc) no interior do poro (UC\_10.1, microfácies Quartzarenítica Bioclástica). (E) Agregados pseudo-peloidais com suas finas partículas subesféricas a elipsoidais típicas (pseudo-pelóides; lâmina UT\_1.2, microfácies Quartzarenítica Bioclástica). (F) Calcita espática-equante precipitada no espaço intergranular. Em geral, essa morfologia corresponde a uma fase de cimentação posterior a de calcita microcristalina. Notar o tamanho relativamente grande dos cristais espato-equantes (lâmina UT\_1.2, microfácies Quartzarenítica Bioclástica).

### *Dissolução e Geração de Porosidade Secundária*

Dissolução é iniciada logo após a precipitação dos primeiros tipos de cimentos e está diretamente ligado à quantidade de íons em solução nos fluidos intersticiais. O processo de

dissolução (Figura 5) é o grande responsável pela geração da porosidade secundária na rocha que, por sua vez, está disposta nos tipos interpartícula – quando há dissolução de cimentos precoces – e intrapartícula (Figura 5).

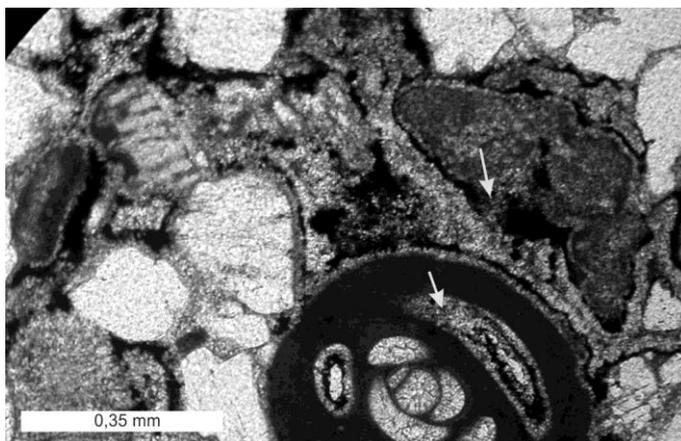


**Figura 5.** Porosidade secundária (delimitada pela linha tracejada) resultante de dissolução de grão (lâmina UT\_1.2, microfácies Quartzarenítica Bioclástica).

### *Oxidação*

Processo de oxidação foi observado em algumas amostras analisadas, sendo representado por manchas amareladas a avermelhadas (Figura 6) disseminadas nos cimentos. Acredita-se que este processo se deu de maneira bastante incipiente – uma vez que

os mesmos ocorrem em pequenas proporções (< 1%) –, quando a rocha foi submetida a condições favoráveis de oxidação logo após a precipitação dos cimentos. Tais condições podem ter sido provocadas por mudança nas condições físico-químicas dos fluidos intersticiais.



**Figura 6.** Processo de oxidação em *beachrocks* ocasionado por mudanças físico-químicas nos fluidos intersticiais. Notar a película escura envolta e no interior dos grãos (lâmina UC\_11.1, microfácies Quartzarenítica).

## DISCUSSÕES

Em virtude da interpretação proporcionada por cada parâmetro, discussões serão aqui apresentadas de acordo com cada uma das microfácies, onde serão levados em

consideração os dois principais parâmetros analisados: textura e composição. Posteriormente, a evolução diagenética proposta para os *beachrocks* estudados será

apresentada com base nas interpretações dos processos e produtos identificados.

### **Microfácies Quartzarenítica**

#### *Parâmetros Texturais*

A moda granulométrica bastante dispersa para esta microfácies sugere que o meio deposicional apresentava moderada eficiência de selecionamento ou que a deposição dos sedimentos que deram origem aos *beachrocks* estudados foi influenciada por sistemas deposicionais distintos. De acordo com Folk (1974), sistemas praias apresentam boa eficiência de selecionamento, exibindo grau de seleção variando entre muito bem selecionado a moderadamente selecionado, ao passo que sistemas fluviais tendem a apresentar eficiência de selecionamento moderada a baixa, em que grãos de diversos tamanhos são comuns. Baseando-se nessa afirmação e nas características apresentadas, podemos sugerir que a deposição dos sedimentos que deram origem aos *beachrocks* de fácies Quartzarenítica estudados tiveram influência de sistema fluvial, além, é claro, do sistema praias. Este mesmo padrão de seleção, moderadamente a pobremente selecionado, ocorre em *beachrocks* costeiros do Rio Grande do Norte (Vieira *et al.*, 2007) e ao redor do mundo (Vousdoukas *et al.*, 2007), cujos sedimentos podem ter tido influência de sistemas fluviais. O conjunto esfericidade/arredondamento sugere que a rocha-fonte se encontrava pouco distante do sítio deposicional. Por outro lado, o contato entre os grãos, predominantemente flutuante, associado ao grau de empacotamento, tipo frouxo, indica que a litificação completa dos sedimentos ocorreu de forma precoce a profundidades relativamente baixas, inibindo estágios avançados de compactações mecânica e/ou química. O rápido processo de litificação é típico da formação de *beachrocks* costeiros, sendo constatado em diversos estudos (Lyell, 1832; Russell, 1959; Frankel, 1968; Bricker, 1971; Kelletat, 2006; Vousdoukas *et al.*, 2007). A maturidade mineralógica apresentada representa um grau de estabilidade físico-química bastante elevado, enquanto que a maturidade textural reflete a atuação relativamente enérgica (Folk, 1974) dos processos deposicionais. Quanto a este parâmetro, Nichols (2009) afirma que a

maturidade textural aumenta à medida que a quantidade de energia dos processos deposicionais aumenta. Tal afirmação corrobora a hipótese da atuação de processos deposicionais de alta energia nos sedimentos que deram origem aos *beachrocks* estudados.

#### *Parâmetros Composicionais*

A natureza dos grãos que compõem o arcabouço de um *beachrock* são bastante diversificados e dependem essencialmente dos sedimentos depositados na praia onde foram formados (Gavish & Friedman, 1969; Friedman, 1975; Vousdoukas *et al.*, 2007). Baseando-se nesta premissa, podemos inferir a natureza dos sedimentos costeiros depositados durante a formação dos *beachrocks* através do estudo de proveniência.

Quanto a este aspecto, as características apresentadas pelos grãos de quartzo da microfácies Quartzarenítica são típicas de rochas metamórficas, enquanto que a razão K-feldspatos/plagioclásios relativamente elevada indica uma origem predominantemente álcali-granítica para a assembleia de feldspatos presentes (Blatt & Tracy, 1997). Esta afirmação é corroborada pela presença de fragmentos de rochas ortoderivados. A concentração de grãos de feldspatos nas frações mais finas e com bordas corroídas sugere que intenso intemperismo atuou nos sedimentos durante o trajeto rocha-fonte ao sítio deposicional. Os intraclastos compostos de fragmentos de rocha paraderivada comprovam que a mesma, ao longo de sua história evolutiva, foi submetida a processos intempéricos e/ou erosivos responsáveis pela fragmentação e liberação de grãos de volta ao ambiente sedimentar. Contudo, pode-se inferir que a proveniência dos sedimentos siliciclásticos que deram origem a esta microfácies teve contribuição dos três principais tipos litológicos, porém, com maior ênfase para as rochas cristalinas, sobretudo as metamórficas ricas em quartzo, e em menor peso às sedimentares. Os poucos bioclastos presentes são de ambiente, predominantemente, marinho raso e/ou praias, refletindo o ambiente em que os sedimentos foram depositados.

### **Microfácies Quartzarenítica Bioclástica**

#### *Parâmetros Texturais*

O padrão granulométrico apresentado para esta microfácies sugere que a energia hidráulica de baixa magnitude prevaleceu na deposição dos sedimentos. Esse mesmo padrão granulométrico é constatado em alguns afloramentos de *beachrocks* da zona costeira do Rio Grande do Norte (Vieira *et al.*, 2007; Cabral Neto, 2011). O grau de seleção apresentado revela que a eficiência do meio deposicional em separar grãos de tamanhos diferentes é relativamente elevada, uma vez que esta microfácies exhibe apenas dois litotipos, sendo eles: (1) bem selecionado a moderadamente selecionado e (2) pobremente selecionado a muito pobremente selecionado, salvo que este último é influenciado pelos bioclastos presentes. Tomando por base apenas os constituintes siliciclásticos, podemos afirmar que o sistema fluvial teve uma menor, ou até mesmo nenhuma, participação na deposição dos sedimentos que deram origem a fácies Quartzarenítica Bioclástica, uma vez que neste sistema grãos grossos são comuns e, frequentemente, apresentam grau de seleção moderado a pobremente selecionado (Folk, 1974). Analisando o conjunto esfericidade/arredondamento é possível inferir que a distância rocha-fonte — sítio deposicional era relativamente pequena, pois os grãos se apresentam, em geral, angulosos a subangulosos e com esfericidade intermediária. O arranjo textural com grãos flutuantes e empacotamento tipo frouxo reflete a baixa profundidade de soterramento a qual a rocha foi submetida, assim como ocorre na microfácies Quartzarenítica aqui estudada e em *beachrocks* costeiros do Rio Grande do Norte (Vieira *et al.*, 2007; Cabral Neto, 2011) e em diversas partes do mundo (Vousdoukas *et al.*, 2007).

#### *Parâmetros Composicionais*

O elevado conteúdo e a forma monocristalina com extinção imediata dos grãos de quartzo sugerem que eles possam ser de origens diversas, uma vez que tais características são comuns tanto em rochas metamórficas quanto em rochas ígneas. Porém, levando-se em consideração a assembleia de feldspatos presentes, na sua grande maioria K-feldspatos, pode-se sugerir que a rocha-fonte dos grãos siliciclásticos era ígnea e que os sedimentos sofreram forte intemperismo

durante o trajeto rocha-fonte — sítio deposicional, uma vez que estão concentrados nas frações finas e frequentemente exibem bordas corroídas e alteração ao longo das clivagens. Os fragmentos de rocha presentes são intraclastos. Tais grãos, por suas vezes, servem como indicadores do alto nível de erosão que os *beachrocks* foram submetidos, resultando na sua fragmentação. Registro do alto nível erosional ocorridos em *beachrocks* também são relatados por Maxwell (1962), Amieux *et al.* (1989) e Vieira *et al.* (2007), onde há grande quantidade de intraclastos presentes no arcaço. Os bioclastos presentes (algas calcárias e bivalves) representam sedimentação estritamente marinha rasa.

#### **Microfácies Bio-Quartzarenítica**

##### *Parâmetros Texturais*

O tamanho dos siliciclastos presentes, predominantemente areia fina a areia média, sugere que energia hidráulica de magnitude intermediária prevaleceu durante a deposição dos sedimentos que deram origem a essas rochas. Padrão granulométrico semelhante também é constatado em afloramentos de *beachrocks* costeiros do Rio Grande do Norte (Bezerra *et al.*, 1998; Caldas *et al.*, 2006; Vieira *et al.*, 2007; Cabral Neto, 2011) e ao redor do mundo (Gischler, 2007; Vousdoukas *et al.*, 2007). A distância entre rocha-fonte e sítio deposicional era suficientemente longa a ponto de dar tempo aos processos de transporte imprimirem um padrão arredondado e esférico aos siliciclastos, ou os mesmos foram intensamente retrabalhados em seu sítio de deposição. O arranjo entre os grãos, predominantemente flutuante, e o empacotamento frouxo sugerem que a rocha sofreu pouca compactação físico-química, sendo submetida a soterramento raso e cimentação precoce, bem como apresentado pelas microfácies Quartzarenítica e Quartzarenítica-Bioclástica. Mineralogicamente, a rocha que compõe a microfácies Bio-Quartzarenítica é considerada matura, apresentando alta resistência aos processos erosivos físicos e/ou químicos. Por outro lado, é considerada texturalmente submatura, como resultado da atuação enérgica e precoce dos processos deposicionais e diagenéticos, sobretudo, a cimentação.

### *Parâmetros Composicionais*

A análise dos siliciclastos presentes indica proveniência principalmente de rocha metamórfica, reflexo da quantidade relativamente elevada de ortoclásios. Porém, grãos de origem ígnea e sedimentar também são observados em menor proporção. Os feldspatos estão presentes tanto nas frações mais finas quanto nas mais grossas, que sugere área-fonte próxima ao sítio deposicional ou que os processos intempéricos atuantes não foram suficientemente intensos para destruir os grãos instáveis. Os bioclastos se apresentam superiores em quantidade e em diversidade em relação às outras microfácies. Todos eles indicam um ambiente exclusivamente marinho raso.

### **Relação entre as três microfácies**

Considerando que o corpo principal de *beachrocks* é subdividido nas urcas de Tubarão, Minhoto e Conceição (Figura 1), respectivamente, de oeste para leste, as microfácies apresentam a seguinte distribuição: quartzarenítica aparece predominantemente na porção oeste da área, dentro da região denominada Urca do Tubarão; a Bio-Quartzarenítica na Urca do Minhoto; e, a Quartzarenítica Bioclástica está disseminada ao longo de todo o corpo, envolvendo a região das três urcas. A predominância da microfácies Quartzarenítica na porção oeste da área é creditada à influência, em grande proporção, dos sedimentos carreados pelo rio Açú, cujas fontes proximais (<100 km) são predominantemente de origem metamórfica e ígnea. Esta hipótese está em consonância com a participação de sistema fluvial na deposição dos sedimentos que deram origem a esta microfácies. A Urca do Minhoto, região central da área, onde ocorre predominantemente a microfácies Bio-Quartzarenítica, é tida como a porção de maior concentração de assembleias de microorganismos marinhos, responsáveis pela geração dos bioclastos encontrados nas microfácies estudadas. A partir dessa região, os bioclastos sofreram transporte e se depositaram em regiões próximas, contribuindo para sua presença nas outras urcas. Por último, a microfácies Quartzarenítica Bioclástica é considerada como a transição entre as outras duas microfácies.

### **Evolução diagenética**

Inicialmente, durante os primeiros metros de soterramento, os sedimentos que deram origem aos *beachrocks* estudados foram submetidos a um rearranjo textural, resultante das condições de pressão atuantes no ambiente de eodiagênese. Tais condições de pressão são influenciadas pela sobrecarga de sedimentos e pela pressão dos fluidos intersticiais. O rearranjo dos sedimentos caracteriza o processo de compactação física que atuou como primeiro estágio diagenético e se manteve atuante até o total preenchimento dos poros por fases cimentantes subsequentes. Este processo é responsável pela redução da porosidade primária do depósito, provocada principalmente pelo esmagamento dos grãos dúcteis, tais como argilo-minerais e micas, e pela reorientação dos grãos rígidos, como o quartzo e fragmentos de rochas. Os grãos flutuantes e o empacotamento do tipo frouxo observados nas amostras analisadas sugerem que os sedimentos sofreram pouca compactação física.

Processo de cimentação ocorre como o segundo evento diagenético ainda no ambiente de eodiagênese. Dentre as sete morfologias de cimentos carbonáticos reconhecidos por Vieira & De Ros (2006) em *beachrocks* costeiros, apenas duas não foram observadas nos *beachrocks* de zona costa-afora estudados, sendo elas: (1) agregados radiais e (2) agregados isolados e desorientados de cristais escalenoédricos. As demais cinco morfologias foram identificadas e são apresentadas a seguir de acordo com sua ordem proposta de evolução. A cimentação é iniciada pela precipitação de cutículas cripto-cristalinas, que crescem na superfície dos grãos e, em alguns casos, adentram para o interior dos poros. Em poucas amostras, é observado que esse tipo de cimento precipitou-se concomitantemente às franjas prismáticas isópacas.

O cimento do tipo franjas prismáticas isópacas é o segundo tipo morfológico a se precipitar e, geralmente, ocorre ou diretamente na superfície dos grãos ou sobre o cimento cripto-cristalino precipitado precocemente.

Posteriormente às franjas prismáticas isópacas, ocorre precipitação de calcita microcristalina, que é caracterizada por ampla distribuição e por ocorrer no interior do poro.

Após o desenvolvimento do cimento de calcita microcristalina, a rocha foi submetida a condições físico-químicas que propiciaram o surgimento da porosidade secundária, gerada pela dissolução de cimentos precipitados precocemente e de grãos instáveis (feldspato e fragmentos de rocha, e bioclastos).

Posteriormente à geração de porosidade secundária, ocorreu uma nova sequência de precipitação onde foram gerados os cimentos de agregados pseudo-peloidais e espato equante. Acredita-se que ambos se precipitaram

simultaneamente em diferentes porções da rocha, uma vez que não foi observada relação de contato entre eles.

Por fim, como último estágio evolutivo ao qual os *beachrocks* foram submetidos, observa-se a oxidação parcial de pequenas porções nos cimentos previamente gerados, fato este atribuído a condições de alta quantidade de oxigênio experimentada pela rocha. Oxidação não é relatada em trabalhos anteriores sobre *beachrocks*. A Figura 7 ilustra a ordem de ocorrência dos eventos diagenéticos.

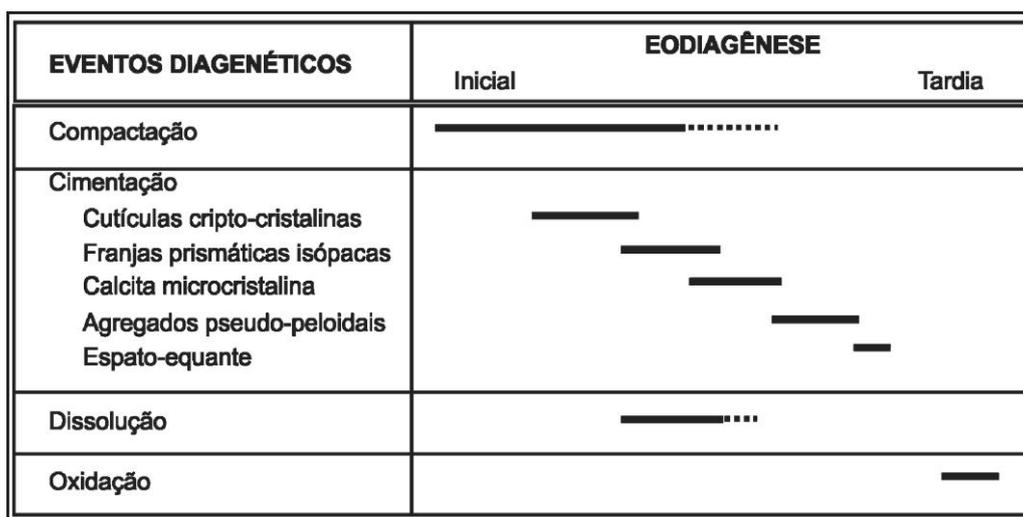


Figura 7. Ordem de evolução dos eventos diagenéticos que atuaram nos *beachrocks* estudados.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A morfologia e a direção apresentadas pelos recifes de plataforma externa aqui estudados sugerem uma comparação visual com a da atual linha de costa. Enquanto os *beachrocks* de zona costa-afora exibem uma direção WNW-ESE, a atual linha de costa apresenta um padrão predominantemente E-W. Quanto à morfologia, Gischler (2007) afirma que *beachrocks* tendem a apresentar forma semelhante à da linha de costa onde foram formados. Este aspecto, associado ao modelo genético geral para *beachrocks*, remete ao fato das rochas aqui estudadas constituírem uma antiga linha de costa que, atualmente, se encontra em zona costa-afora a até 25 km do litoral. A espessura relativamente muito grande apresentada pelos recifes de plataforma externa (até 25 m) contrasta com a média geral para *beachrocks* costeiros que, em geral, é inferior a 5 m (Vousdoukas *et al.*, 2007). Este fato sugere que grandes flutuações do nível do mar ocorreram

durante a formação destas rochas (Vousdoukas *et al.*, 2007).

As microfácies identificadas nos *beachrocks* é reflexo da composição dos sedimentos presentes nesta antiga linha de costa, a qual era formada por siliciclastos e bioclastos, assim como reconhecido em estudos de sedimentos plataformais recentes (Vital *et al.*, 2005). Aspecto nunca abordado em trabalhos sobre a temática em questão, as características de proveniência observadas são sugestivas de que rochas metamórficas ricas em quartzo e feldspatos calco-sódicos constituem a principal rocha-fonte dos *beachrocks* estudados, muito embora siliciclastos provindos de rochas plutônicas e sedimentares também estejam presentes. Nesse paleoambiente, o rio Açu foi o maior responsável pelo aporte de siliciclastos para formação dos *beachrocks* estudados, afirmação esta corroborada pela presença predominante da microfácies Quartzarenítica

próxima à Urca do Tubarão. De acordo com estudos faciológicos para sedimentos plataformais recentes na área de estudo (Vital *et al.* 2005), a região próxima ao cânion submarino do rio Açú apresenta predominância de sedimentos carbonáticos. Isso sugere que houve uma mudança no tipo predominante de sedimentos presentes próximos a foz deste rio. A região da Urca do Minhoto abrigava grande concentração de microorganismos que deram origem aos bioclastos presentes nos *beachrocks* estudados. Predomínio este que ainda prevalece nos sedimentos plataformais recentes nestas proximidades (Vital *et al.* 2005).

Em consonância com inúmeros exemplos ao redor do mundo (Voutsoukas *et al.*, 2007), a litificação completa dos *beachrocks* de zona costa-afora aqui estudados se deu de maneira

muito rápida e em ambiente diagenético de profundidades rasas (eodiagênese), onde predominavam cimentos de calcita rica em Mg. A química do cimento, por sua vez, foi reconhecida através da correlação com a morfologia de acordo com a proposta de Vieira & De Ros (2006), que reconheceram este mesmo tipo de cimento em *beachrocks* costeiros do Rio Grande do Norte.

Por fim, o estudo sistemático dos parâmetros petrográficos e diagenéticos de *beachrocks* de zona costa-afora e, por consequência, sua classificação nas três litofácies ora reconhecidas constitui uma importante ferramenta para o entendimento desse tipo de rocha, uma vez que análises sedimentológicas com base em estruturas sedimentares e ou seções colunares nem sempre são acessíveis.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são devidos à Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN através do Departamento de Geologia; à Agência Nacional do Petróleo-ANP, pela concessão da bolsa ao primeiro autor; aos projetos de pesquisa POTMAR (REDE 05/FINEP/CTPETRO/CNPq/PETROBRAS), MAR-RN (FINEP/CTINFRA), UNIBRAL 21-04 (CAPES/DAAD) e Grant PQ-CNPq (31227/2006-4) pelo apoio financeiro; ao Laboratório de Geologia Marinha e Meio Ambiente-GEMMA/UFRN, pelo suporte logístico fornecido; ao Laboratório de Geoprocessamento-GEOPRO/UFRN, pela concessão das imagens e apoio computacional fornecido; ao Laboratório de Geologia e Geofísica do Petróleo-LGGP/UFRN, por ter cedido o laboratório de microscopia de pesquisa; à professora Marcela Marques Vieira, pelas proveitosas discussões sobre *beachrocks* e auxílio nas descrições das lâminas; e ao mergulhador e amigo, Francisco Canindé, pela ajuda na etapa de campo.

## REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA F.M. & HASUI Y. (Eds.) 1984. **O Pré-Cambriano do Brasil**. Edgard Blücher, São Paulo, 378 pp.
2. 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**: 261-272.
3. ANGELIM, L.A.A.; NESI, J.R.; TORRES, H.H.R.; MEDEIROS, V.C.; SANTOS, C.A.; VEIGA JÚNIOR, J.P.; MENDES, V.A. 2007. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 119p.
4. BEZERRA, F.H.R.; AMARAL, R.F.; LIMA FILHO, F.P.; FERREIRA JR., A.V.; SENA, E.S.; DINIZ, R.F. 2005. Beachrock fracturing in Brazil. **Journal of Coastal Research**, **42**:319-332.
5. BEZERRA, F.H.R.; BARRETO, A.M.F.; SUGUIO, K. 2003. Holocene sea level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. **Marine Geology**, **196**:73-89.
6. BEZERRA, F.H.R.; LIMA FILHO, F.P.; AMARAL, R.F.; CALDAS, L.H.O.; COSTA NETO, L.X. 1998. Holocene coastal tectonics in NE Brazil. In: Stewart I. and Vita-Finzi C. (Eds.). **Coastal Tectonics**. Geological Society Special Publication, 146, London, p. 279-293.
7. BEZERRA, F.H.R.; VITA-FINZI, C.; LIMA FILHO, F.P. 2000. The use of marine shells for radiocarbon dating of coastal deposits. **Revista Brasileira de Geociências**, **30** (1):211- 213.
8. BLATT, H. & TRACY, R.J. 1997. **Petrology: igneous, sedimentary and metamorphic**. New York: W.H. Freeman and Company, 529p.
9. BRICKER O.P. (Ed.). 1971. **Carbonate cements**. Johns Hopkins University, Studies in Geology, v.19.
10. CABRAL NETO, I. 2007. **Corpos rochosos offshore adjacente à costa norte do RN: Uma síntese geológica com base na caracterização faciológica e diagenética**. Relatório de Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 126 p.
11. CABRAL NETO, I. 2011. **Beachrocks do Rio Grande do Norte: correlação entre os depósitos costeiros e os de zona costa-afora com base na facilogia, petrografia e diagênese**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 145 p.

12. 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**, **02** (2):12-18.
13. CALDAS, L.H.O. 2002. **Late quaternary coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil**. PhD Thesis, University of Kiel, Germany, 92 p.
14. CALDAS, L.H.O.; STATTEGGER, K.; VITAL, H. 2006. Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. **Marine Geology**, **228**:39-53.
15. CESTARO, L.A. 1994. Os elementos do clima de Galinhos, RN, como recursos naturais à disposição do Homem. **Cadernos Norte-rio-grandense de Temas Geográficos**, **8**(1):13-28.
16. EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte. 2007. **Meteorologia**. Disponível em: <http://www.emparn.rn.gov.br/links/meteorologia/meteorologia.asp>. Acessado em 12mar2007.
17. FOLK, R.L. 1974. **Petrology of sedimentary rocks**. Hemphill, Austin, 184 pp.
18. FRANKEL, E. 1968. Rate of formation of beach rock. **Earth Planet. Sci. Lett.** **4**: 439-440.
19. FRIEDMAN, G.M. 1975. The making and unmaking of limestones or the downs and ups of porosity. **J. Sediment. Petrol.**, **45**: 379-398.
20. GAVISH, E. & FRIEDMAN, G.M. 1969. Progressive diagenesis in Quaternary to Late Tertiary carbonate sediments: sequence and time scale. **Journal of Sedimentary Petrology**, **39** (3): 980-1006.
21. GISCHLER, E. 2007. Beachrock and Intertidal Precipitates. In: NASH, D.J. & MCLAREN, S.J. (Eds.). 2007. **Geochemical Sediments and Landscapes**. Blackwell Publishing, Singapore, 490 p.
22. GORINI, M.A.; DIAS, G.T.M.; MELLO, S.L.M.; ESPÍNDOLA, C.R.S.; GALLEA, C.G.; DELLAPIAZZA, H.; CASTRO, J.R.J.C. 1982. Estudos ambientais para implantação de gasoduto na área de Guamaré (RN). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, **32**, **Anais...**, 4, p. 1531-1539.
23. JARDIM DE SÁ, E.F. 1994. **A Faixa Seridó (Província Borborema) e seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Panafricana**. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 803 p.
24. KAHN, J.S. 1956. The analysis and distribution of the properties of packing in sand-size sediments: 1. on the measurement of packing n sandstones. **Journal of Geology**, **64**: 385-395.
25. KELLETAT, D. 2006. Beachrock as sea-level indicator? Remarks from a geomorphological point of view. **J. Coast. Res.** **22** (6): 1555-1564.
26. KÖPPEN, W. 1900. Versuch einer classification der climate vorsugsweise nach ihren bazichungen zur pflanzenwelt. **Geograph Zeirsehr**, **6**: 593-611/657-679.
27. LYELL, C. 1832. **Principles of Geology: being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes now in Operation**. Vol. 2, London: John Murray, 356 p.
28. MAXWELL, W.G.H. 1962. Lithification of carbonate sediments in the Heron Island Reef, Great Barrier Reef. **Journal of the Geological Society of Australia**, **8**: 217-238.
29. MCBRIDE, E.F. 1963. A classification of common sandstones. **Journal of Sedimentary Petrology**, **33**: 664-669.
30. NICHOLS, G. 2009. **Sedimentology and Stratigraphy**. Wiley-Blackwell, United Kingdom, 432 p.
31. OLIVEIRA, M.I.M.; BAGNOLI, E.; FARIAS C.C.; NOGUEIRA, A.M.B.; SANTIAGO, M. 1990. Considerações sobre a geometria, petrografia, sedimentologia, diagênese e idades dos beachrocks do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, **36**, Natal, **Boletim de Resumos**, **2**, 621-634.
32. PESSOA NETO, O.C.; SOARES, U.M.; SILVA J.G.F. DA.; ROESNER, E.H.; FLORENCIO, C.P.; SOUZA, C.A.V. DE. 2007. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da Petrobras**, **15**(2): 357-369.
33. POWERS, M.C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Petrology**, **23**: 117-119.
34. RUSSELL, R.J. 1959. Caribbean beach rock observation. **Z. Geomorphol.** **3**: 227-236.
35. SANTOS, C.L.A.; VITAL, H.; AMARO V.E.; KIKUCHI, R.K.P. 2007. Mapeamento de recifes submersos na costa do Rio Grande do Norte, NE Brasil: Macau a Maracajá. **Revista Brasileira de Geofísica**, **25**(1):27-36.
36. SCHOLLE, P.A. 1979. **A collar illustrated guide to constituents, textures, cements, and porosities of sandstones and associated rocks**. AAPG Memoir 128, Tulsa, 201 pp.
37. SCHOLLE, P.A. & ULMER-SCHOLLE, D.S. 2003. **A Color Guide to the Petrography of Carbonate Rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis**. AAPG Memoir 77, Tulsa, 459 pp.
38. SOARES, U.M.; ROSSETTI, E.L.; CASSAB, R.C.T. 2003. **Bacia Potiguar**. Fundação Paleontológica Phoenix. Disponível em [http://www.phoenix.org.br/Phoenix56\\_Ago03.htm](http://www.phoenix.org.br/Phoenix56_Ago03.htm). Acessado em 10abr2007.
39. SCOFFIN, T. P. & DIXON, J. E. 1983. The distribution and structure of coral reefs: One hundred years since Darwin. **Biological Journal of Linnean Society**, **20**, 11-38.
40. TABOSA, W.F. & VITAL, H. 2005. Aspectos hidrodinâmicos e impactos ambientais costeiros e marinhos na região de São Bento do Norte - RN. In: CONGRESSO ABEQUA, **12**, Guarapari, 2005, **Pôster 127**.
41. TESTA, V. & BOSENCE, D.W.J. 1999. Physical and biological controls on the formation of carbonate and siliciclastic bedforms on the north-east Brazilian shelf. **Sedimentology**, **46**:279-301.
42. VIEIRA, M.M. & DE ROS, L.F. 2006. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. **Sedimentary Geology**, **192**:207-230.
43. VIEIRA, M.M. 2005. **Aspectos sedimentológicos e petrológicos dos beachrocks do estado do Rio Grande do Norte**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 243 p.
44. VIEIRA, M.M.; DE ROS, L.F.; BEZERRA, F.H.R. 2007. Lithofaciology and paleoenvironmental analysis of holocene beachrock in northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, **23**(6): 1535-1548.
45. VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V.E. 2005. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira - área Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, **23**, n.3, p.233- 241.
46. VOUSDOKAS, M.I.; VELEGRAKIS, A.F.; PLOMARITIS, T.A. 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. **Earth-Science Reviews**, **85**: 23-46.
47. WENTWORTH, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, **30**: 377-392.

Manuscrito recebido em: 14 de Fevereiro de 2012  
Revisado e Aceito em: 23 de Setembro de 2013