CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO DE RECIFES DE CORAIS HOLOCÊNICOS A PARTIR DE DADOS DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO E DE PERFURAÇÃO

ZELINDA MARGARIDA DE A.N. LEÃO* e OLIVAR ANTÔNIO LIMA DE LIMA*

ABSTRACT Four seismic refraction profiles on the Coroa Vermelha Reef, Abrolhos Bank, revealed the presence of a wave-velocity discontinuity. Diagenetic alteration observed on a drill core from the same site at about the depth of the discontinuity indicates that such a surface, developed on a limestone reef, is due to processes related to subaerial exposure. This evidence of subaerial exposure correlated with the last Pleistocene low stand of sea level, plus the morphology of the subsurface sequence as well as its faunal composition indicate that the underlying substrate of the Holocene Coroa Vermelha Reef is a reef limestone of a probable Pleistocene age.

INTRODUÇÃO O recife da Coroa Vermelha faz parte do conjunto de recifes de corais que constituem o Complexo Recifal de Abrolhos (Fig. 1). Com o objetivo de obter informações sobre a espessura e a natureza do corpo recifal holocênico aí aflorante bem como sobre a morfologia e a composição de seu substrato foram executados, nesse recife, quatro perfis sísmicos de refração e uma perfuração com testemunho contínuo. Este trabalho fez parte de uma investigação mais aprofundada dos recifes de Abrolhos e forneceu subsídios para a interpretação da história evolutiva desses recifes (Leão, 1982).

A presença de uma pequena ilha carbonática no topo do recife da Coroa Vermelha permitiu a adaptação de equipamento e procedimentos de uso terrestre no ambiente marinho, embora os trabalhos só pudessem ser realizados durante as marés baixas, quando grande parte do topo do recife permanece exposta. Esta é a primeira tentativa do uso de sísmica de refração nos recifes de corais do Atlântico, talvez pelo fato de a maioria dos recifes caribeanos não apresentar topos emersos, ao contrário do recife da Coroa Vermelha, que expõe uma vasta área na baixa-mar. Uma tentativa semelhante foi realizada na grande Barreira Recifal da Austrália (Harvey, 1977) com excelentes resultados.

A investigação de substratos de recifes de corais holocênicos tem demonstrado que a morfologia atual desses recifes é controlada pela topografia de seu substrato. Assim, tem-se mostrado que recifes de corais modernos se acumulam em elevações dos tipos dunas costeiras (Shinn *et al.*, 1977), recifes pleistocênicos (Adey, 1975; Adey *et al.*, 1976a, 1976b e 1977; Harvey, 1977) ou remanescentes de uma topografia cárstica (Purdy, 1974; Davies, 1974).

RESULTADOS DE SÍSMICA DE REFRAÇÃO O dispositivo utilizado no campo é conhecido como método de perfilagem em linha. Neste dispositivo, pontos de tiro e geofones são alinhados ao longo de uma reta. No presente caso, os registros sísmicos foram obtidos num arranjo de 24 geofones com frequência natural de 4 Hz, espaçados 11 m entre si, com pontos de tiro limitando a expansão a 10 m de cada extremidade. Em geral, a superfície do recife está coberta por uma fina camada de lama ou areia carbonática que não ultrapassa 10 cm de espessura, de modo que os geofones foram fixados no topo do recife através dessa camada. Dessa maneira foram executados quatro perfis sísmicos orientados transversalmente ao comprimento do recife (Fig. 2), utilizando o equipamento Abem-Trio modelo 5352 de 24 canais.

Os pontos de tiro foram escavados no coral e geralmente não ultrapassaram 1 m de profundidade. Como fonte de energia foram usadas explosões de dinamite com cargas variando de 250 a 500 g de gelatina com 40% de potência. Todos os tiros foram dados abaixo do nível de água no recife. O nível elevado da água e o efeito de confinamento da lama carbonática colocada nos buracos forneceram uma excelente transmissão de energia.

A Fig. 3 ilustra o padrão típico dos registros sísmicos obtidos na área. Embora estejam presentes efeitos de ruídos provocados pela quebra das ondas oceânicas nos contornos do recife, as primeiras chegadas das ondas de energia produzidas pela explosão são bem distintas, não havendo dificuldade em identificá-las. De modo geral, a qualidade nas quebras indicadoras das primeiras chegadas permitiu determinar os tempos de percurso com precisão de até 0,5 ms (milissegundo).

Na interpretação dos perfis foi utilizado o método do ponto médio (MacPhail, 1967). Neste método, supõe-se que o problema seja bidimensional e que as curvas tempo-distância sejam revertidas e consistem de segmentos retilíneos. Supõe-se, também, que a velocidade nas camadas abaixo

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

* Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA

Figura 2 – Mapa com os contornos do recife da Coroa Vermelha, mostrando a localização dos quatro perfis sísmicos (R-1, R-2, R-3 e R-4) e do poço perfurado. A linha interrompida do contorno externo representa, a leste e ao sul, a linha batimétrica de 10 m e a oeste e ao norte a linha batimétrica de 5 m

da camada superficial seja dada pela média aritmética das velocidades aparentes no sentido e contra o sentido do mergulho.

Para o caso de duas camadas, o erro na determinação da profundidade, devido à aproximação da velocidade pelo valor médio, é dado por:

$$E = \left(X \frac{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1} - h \frac{3V_2^2 - 2V_1^2}{V_2^2 - V_1^2} \right) \alpha^2 / 2$$

em que X é a distância ao ponto de tiro; h , a profundidade média do refrator; V_1 , a velocidade no material superficial; V_2 , a velocidade média do refrator; e α , o ângulo de mergulho do refrator.

No caso do recife da Coroa Vermelha, onde o maior mergulho encontrado foi de 0,01 rd, $V_1 = 1,56$ km/s e $V_2 = 2,10$ km/s, obtém-se:

$$E = (6,35X - 21,1h) \times 10^{-5} \text{ m}$$

Para $X = 100$ m e $h_1 = 15$ m, como valores típicos, resulta $E = 0,03$ m. Assim, para pequenos ângulos de mergulho, o erro devido à aproximação introduzida é desprezível comparado a outros erros inerentes ao método. Por exemplo, um erro de 0,5 ms na determinação dos tempos de percurso

Figura 3 – Registro sísmico típico obtido na Coroa Vermelha. Separação de geofones = 11 m

pode introduzir a um erro na profundidade da ordem de 0,78 m, que é 25 ordens de grandeza superior.

A Fig. 4 ilustra as curvas tempo-distância para o perfil R_2 (Fig. 2) localizado próximo ao local do poço testemunhado. Nessa mesma figura aparecem a atitude topográfica e da interface refratora mapeada. A primeira camada de velocidade constante de 1,56 km/s representa o recife de coral saturado com água do mar (V_1). A interface refratora de velocidade média 2,10 km/s é interpretada como o substrato do recife (V_2). Sua profundidade situa-se entre 11,4 e 10,5 m. A parte central do perfil situa-se próxima ao local do poço onde a base do recife foi localizada a uma profundidade de 12,5 m. Considerando a diferença de nível de 2 m entre o poço e o ponto de tiro central em R_2 , teríamos indicada a profundidade da base do recife, sob o ponto de tiro em torno de 13 m, o que implica um erro inferior a 5%. Além disso, verifica-se que na parte central do recife o substrato adquire uma posição aproximadamente horizontal.

Figura 4 – Gráfico tempo-distância e seção geológica interpretada ao longo da linha R-2

A Fig. 5 associa os perfis R_1 , R_3 e R_4 (Fig. 2) no sentido de se observar uma seção transversal ao longo do recife. Novamente o recife é registrado com velocidade de 1,56 km/s. Seu substrato possui velocidade de 2,10 km/s. Sua profundidade situa-se entre 19,8 m em R_4 , 14,9 m em R_3 e 13,6 m em R_1 . Esses resultados, conforme a seção esboçada nesta figura, indicam que o recife se torna mais espesso na direção das margens a nordeste.

Figura 5 – Gráfico tempo-distância e seções geológicas interpretadas ao longo das linhas R-1, R-3 e R-4

DADOS DOS TESTEMUNHOS Uma perfuração com testemunho foi realizada na ilha da Coroa Vermelha usando uma sonda rotativa a diamante marca Winkie. A recuperação dos testemunhos foi variável e dependente da natureza do material perfurado. A profundidade final do furo foi de 15 m. O estudo desses testemunhos permitiu caracterizar localmente a natureza do corpo recifal e de seu substrato.

A seqüência holocênica do recife é formada por unidades contínuas de corais e miléporas alternadas com zonas de fragmentos de diversos tipos de corais (*Mussismilia* sp, *Porites* sp, *Siderastrea* sp) com incrustações de algas corallinas (Fig. 6). A datação por carbono 14 de uma amostra

Figura 6 – Perfil diagramático ilustrando as diferentes unidades faunais das seqüências holocênica e pleistocênica do recife da Coroa Vermelha. A linha indicando o refrator sísmico V_2 mostra a superfície topográfica da seqüência pleistocênica

Figura 7 – Fotografias ilustrando duas seções de seqüência pleistocênica do recife da Coroa Vermelha: A) o topo da seqüência onde C é a crosta formada por briozoários e alga coralina, CR é um carbonato recifal e P é um fragmento do coral *Porites* sp; B) uma seção mais profunda da seqüência onde CR é carbonato recifal, S é fragmento do coral *Siderastrea* sp e P é fragmento do coral *Porites* sp. Escala gráfica em A e B = 1,5 cm

localizada na base dessa sequência forneceu uma idade de 6600 anos B.P. (Leão, 1982).

A parte mais superior da sequência pré-holocênica tem coloração bastante escura e é formada por um aglomerado de fragmentos de corais e miléporas em uma matriz composta em sua maior parte por fragmentos esqueléticos de moluscos, halimeda e carapaças de foraminíferos. Esses clastos estão envolvidos por uma crosta formada por camadas de algas coralinas e briozoários (Fig. 7A). O resto da sequência tem composição semelhante à da sequência holocênica (Fig. 7B). O estudo de lâminas delgadas do material dessa sequência inferior (Leão, 1982) demonstrou que a mesma corresponde a um carbonato recifal cimentado, com indicações de alteração por percolação de águas meteóricas, tais como: a) dissolução do material aragonítico original de fragmentos de moluscos e corais (Figs. 8A e B); b) seções pobremente cimentadas com preenchimento irregular restando porosidades primária e secundária (Figs. 8B e C); c) cimento com características dos tipos menisco e pêndulo (Fig. 8A); e d) substituição da estrutura original por calcita neomórfica de baixo teor de magnésio, exibindo vestígios dos grãos originais (Fig. 8D). Essas evidências são concordantes com as observações feitas por Longman (1980), Friedman *et al.* (1979), Dunham (1971) e Schroeder (1973) para a diagênese de carbonatos que sofreram exposição subaérea. Devido ao alto grau de dissolução e cimentação

pós-deposicionais não foi possível obterem-se datações radiométricas nas amostras da sequência pré-holocênica.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS Dois tipos de evidências estabelecem o limite entre o corpo recifal holocênico e o substrato pré-holocênico do recife da Coroa Vermelha: 1) a descontinuidade de velocidade observada nos perfis sísmicos, e 2) as características diagenéticas das rochas pré-holocênicas, observadas nos testemunhos de sondagem.

O perfil de integração mostrado na Fig. 6 indica a morfologia do topo do substrato pré-holocênico do recife da Coroa Vermelha. A morfologia do recife atual acompanha a topografia da superfície pré-holocênica. Este substrato tem um declive maior a NE, correspondendo ao lado a sotavento do recife atual, onde a profundidade das águas circundantes são bem maiores que no lado a barlavento. A profundidade da superfície desse substrato pré-holocênico varia entre 10,5 e 19,8 m. Esses valores concordam com os limites encontrados por outros autores, onde as profundidades dos substratos pleistocênicos variam comumente entre 7 e 15 m. Valores abaixo dos indicados foram encontrados em pequenas formações recifais do sul da Flórida, com 5,5 m (Shinn *et al.*, 1977), e o valor máximo, de 33,5 m, foi encontrado no recife de Alacrán, México (MacIntyre *et al.*, 1977).

A camada superior do recife da Coroa Vermelha tem uma velocidade $V_1 = 1,56$ km/s, da ordem da velocidade de propagação do som na água. Esta camada é formada por material altamente poroso e possui velocidade sísmica compatível com as encontradas em sequências holocênicas de outras áreas (Harvey, 1977). A idade de 6660 anos B.P. para a base desta camada (Leão, 1982) comprova sua idade holocênica.

A camada inferior apresenta uma velocidade $V_2 = 2,10$ km/s, que está entre os limites de velocidade de rochas recifais de idade pleistocênica (Harvey, 1977). A composição e as características diagenéticas desta camada inferior são evidências da presença de recifes pré-holocênicos em Abrolhos, que estiveram expostos subaeramente durante a última regressão pleistocênica. Embora não tenha sido possível obter datações radiométricas da sequência pré-holocênica, três argumentos são suficientes para admitir-se que esta sequência é uma amostra de um recife pleistocênico que serviu de base para o recife atual da Coroa Vermelha:

- 1) Sua composição faunal é uma réplica da fauna da camada holocênica, com ausência total de qualquer elemento que possa sugerir uma idade anterior ao Período Pleistoceno.
- 2) As evidências de exposição subaérea são consistentes com os níveis baixos do mar durante a última regressão pleistocênica.
- 3) Algumas das espécies de corais que ocorrem nesta sequência foram encontradas em afloramento costeiro a cerca de 400 km ao norte da área de Abrolhos. Esses corais apresentam idades entre 116 e 142000 anos B.P. (Martin *et al.*, 1982), o que prova que recifes pleistocênicos existiram ao longo da costa do Brasil.

Uma outra evidência da exposição subaérea no Banco de Abrolhos é a existência de uma paleolaguna na isóbata atual de 60 m, a 11000 anos B.P. (Vicalvi *et al.*, 1978). Com base em dados geofísicos e datações radiométricas do material de um testemunho coletado no fundo da denominada Depressão de Abrolhos, os citados autores concluíram que as condições mixo-halinas nesta área persistiram até cerca de 8000 anos B.P. quando a sedimentação terrígena foi substituída por uma deposição de carbonatos marinhos.

Figura 8 — Fotografias de lâminas delgadas, à luz polarizada, ilustrando as características da diagênese por águas meteóricas da camada de velocidade sísmica V_2 : A) solução do esqueleto aragonítico do coral *Porites* sp. onde o cimento calcítico apresenta os tipos menisco (M) e pêndulo (P). Escala gráfica = 1 mm; B e C) cimento calcítico preenchendo moldes de conchas de molusco e testas de foraminíferos. Escala gráfica = 200 µ; D) calcita neomórfica de baixo teor de magnésio substituindo o esqueleto aragonítico original do coral *Siderastrea* sp. Escala gráfica = 200 µ

CONCLUSÕES Com base na comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os observados nos recifes da Grande Barreira Recifal da Austrália (Harvey, 1977) e nas características da desconformidade diagnética reveladas no material testemunhado no recife, verifica-se que a camada de velocidade V_2 do recife da Coroa Vermelha representa um material cimentado por exposição subaérea durante níveis baixos do mar, no fim do Pleistoceno.

As alterações sofridas durante essa exposição resultaram na criação de uma superfície de descontinuidade de velocidade com suficiente contraste para fazer da refração o método geofísico mais eficiente no estabelecimento da configuração geométrica do substrato dos recifes da área de Abrolhos.

A topografia da camada de velocidade V_2 acompanha a morfologia do recife atual, sendo mais profunda na parte correspondente à zona da frente recifal, sugerindo a possível presença de um recife antigo com morfologia semelhante ao recife atual. A profundidade da superfície deste substrato tem valores compatíveis com as profundidades dos substratos pleistocênicos dos recifes de outras áreas.

A composição faunal da camada de velocidade V_2 , a presença nela de espécies de corais correlacionadas a espécies datadas do Pleistoceno em afloramento não muito distante

da área em estudo e as evidências de exposição subaérea deste substrato recifal, no fim do Pleistoceno, conduzem à sugestão de que o recife atual da Coroa Vermelha se acumulou sobre recifes preexistentes de uma provável idade pleistocênica.

Os recifes de Abrolhos crescem como colunas, isoladas ou coalescentes, em forma de cogumelos com dimensões que variam de 2 a 25 m de altura e de 3 a 50 m de diâmetro no topo. Esta forma particular de crescimento de recifes não tem análogo na literatura dos modelos descritos (Leão, 1982). A determinação da espessura desses corpos recifais holocênicos e a delimitação de seu substrato poderão fornecer os subsídios básicos para prever a presença de recifes, com semelhante morfologia, em depósitos antigos.

Agradecimentos Os autores agradecem aos professores Abílio C.S.P. Bittencourt e Umberto R. Costa por valiosas sugestões, ao Professor Irton V. Leão pela ajuda prestada durante os trabalhos de campo, à UNESCO e ao CNPq pelas bolsas de estudo concedidas a Zelinda M.A.N. Leão durante a realização de seu doutoramento. Este trabalho foi financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e realizado dentro do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia.

BIBLIOGRAFIA

- ADEY, W.H. — 1975 — The algal ridges and coral reefs of St. Croix: their structure and Holocene development. *Atoll Res. Bull.* 187:67.
- ADEY, W.H. — 1976 — Holocene bioherms (algal ridges and bank-barrier reefs) of the Eastern Caribbean. *Bull. Geol. Soc. Amer.* 87:95-109.
- ADEY, W.H., MacINTYRE, I.G., STUCKENRATH, R. e DILL, R.F. — 1977 — Relict reef system of St. Croix: its implication with respect to late Cenozoic coral reef development in the Western Atlantic. *Proceed. Third Intern. Symp. Coral Reefs*, Miami, Florida, 2:15-21.
- DAVIES, P.J. — 1974 — Subsurface solution unconformities at Heron Island, Great Barrier Reef. *Proceed. Second Inter. Symp. Coral Reefs*, Brisbane, Great Barrier Reef Committee, 2:573-578.
- DUNHAN, R.R. — 1971 — Meniscus cement. In: O.P. Bricker (ed.), Carbonate Cements. Johns Hopkins Univ., *Studies in Geol.* 19:297-300.
- FRIEDMAN, G.M. e GÖTER, E.R. — 1979 — Pleistocene meteoric-vadose diagenesis of Enewetak Atoll. *Reef Newsletter* 6:12.
- HALEY, R.B., SHINN, E.A., HUDSON, J.H. e LIDZ, B. — 1977 — Recent and Relict topography at Boo Bee Patch Reef, Belize. *Proceed. Third Intern. Symp. Coral Reefs*, Miami, 2:29-35.
- HARVEY, N. — 1977 — The identification of subsurface solution discontinuities on the Great Barrier Reef, Australia, between 14°S and 17°S, using shallow seismic refraction techniques. *Proceed. Third Intern. Symp. Coral Reefs*, Miami, 2:46-51.
- LEÃO, Z.M.A.N. — 1982 — Morphology, geology and developmental history of the southernmost coral reefs of Western Atlantic, Abrolhos Bank, Brazil. Ph.D. Dissertation, Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science, Univ. of Miami, Florida, 218 pp.
- LONGMAN, M.W. — 1980 — Carbonate diagenetic textures from near-surface diagenetic environments. *Bull. Amer. Assoc. Petroleum Geol.* 64(4):461-487.
- MacINTYRE, J.G., BURKE, R.B. e STUCKENRATH, R. — 1977 — Tickest recorded Holocene reef section, Isla Pérez core hole, Alacrán Reef, Mexico. *Geology* 5:749-754.
- MacPHAIL, M.R. — 1967 — The Midpoint Method of interpreting a refraction survey. In: Seismic Refraction Prospecting. A.W. Musgrave (ed.), *Soc. Exp. Geophysicists*. Tulsa, Oklahoma: 260-266.
- MARTIN, L., BITTENCOURT, A.C.S.P. e VILAS BOAS, G.S. — 1982 — Primeira ocorrência de corais pleistocênicos da costa brasileira — datação do máximo da penúltima transgressão. *Rev. Ciências da Terra*, SBG, 3:16-17.
- PURDY, E.G. — 1974 — Reef configurations: cause and effects. In: L.F. Laporte (ed.), *Reefs in Time and Space. Spec. Pub. Soc. Econ. Paleont. Mineral.* 18:9-76.
- SCHROEDER, J.H. — 1973 — Submarine and vadose cements in Pleistocene Bermuda reef rock. *Sedim. Geol.* 10:179-204.
- SHINN, E.A., HUDSON, J.H., HALLEY, R.B. e LIDZ, B. — 1977 — Topographic control and accumulation rate of some Holocene Coral Reefs: South Florida and Dry Tortugas. *Proceed. Third Intern. Symp. Coral Reefs*, Miami, 2:1-7.
- VICALVI, M.A., COSTA, M.P.A. e KOWSMAN, R.O. — 1978 — Depressão de Abrolhos: Uma paleolaguna holocênica na plataforma continental leste brasileira. *Bol. Tec. Petrobras*, 21(4):279-286.

Recebido em 19 de julho de 1982