

Mapeamento estratigráfico utilizando sísmica de alta resolução no trecho da futura Ponte Salvador-Itaparica, Bahia, Brasil

Stratigraphic mapping using high-resolution seismic exploration at the site of the future Salvador-Itaparica Bridge, Bahia, Brazil

Isaac de Oliveira Santos¹ , José Maria Landim Dominguez¹ 

¹Universidade Federal da Bahia - UFBA, Instituto de Geociências, Campus Universitário de Ondina, Rua Barão de Jeremoabo, s/n., CEP 40170-115, Salvador, BA, BR (isaac.os@hotmail.com; landim.jmd@me.com)

Recebido em 22 de setembro de 2018; aceito em 30 de outubro de 2019

Resumo

As sequências sedimentares marinhas do Quaternário têm sido amplamente estudadas pela sísmica marinha de reflexão rasa, a qual se baseia na propagação das ondas sísmicas, com o intuito de realizar imagens das feições geológicas de subsuperfície. Dados sísmicos em associação com furos de sondagens *SPT* podem produzir informações sobre litologia, coesão, profundidade, espessura e continuidade lateral das camadas, tendo assim grande utilidade no planejamento e na execução de obras de engenharia em regiões submersas, como pontes. Este trabalho realizou o mapeamento estratigráfico para identificar o topo do substrato rochoso e a espessura da cobertura sedimentar recente na região da Baía de Todos os Santos (BTS), na qual será construída uma ponte que ligará a cidade de Salvador à ilha de Itaparica. As linhas sísmicas de alta resolução foram obtidas utilizando-se fontes *Boomer* e *Sparker*. As linhas foram processadas por meio de um fluxo de processamento normalmente utilizado na indústria do petróleo no aplicativo *Seismic Unix*. A interpretação das linhas foi feita no aplicativo *Meridata MDPS*. Dessa forma, o embasamento rochoso (bacia do Recôncavo) foi mapeado, e a espessura da cobertura sedimentar quaternária foi determinada. Quatro unidades estratigráficas foram identificadas, sendo que a mais basal são as rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo. Dentre as três unidades quaternárias identificadas, a mais inferior se acumulou sob condições subaéreas antes da inundação da baía. As duas unidades superiores se acumularam após a inundação da baía e estão separadas entre si por uma superfície de ravinamento por marés.

Palavras-chave: Baía de Todos os Santos; Sísmica rasa de Alta Resolução; Baías; Sondagens *SPT*.

Abstract

The Quaternary marine sedimentary sequences have been extensively studied using shallow-reflection marine seismic, which is based on the propagation of seismic waves in order to investigate subsurface geological features. Seismic data in association with *SPT* drill holes may produce information about the lithology, cohesion, depth, thickness, and lateral continuity of the layers. Thus, it has great use for planning and performing engineering works in submerged regions, such as bridges. This work carried out a stratigraphic mapping to identify the top of the rocky substrate and the thickness of the recent sedimentary cover in the region of *Todos os Santos* Bay (BTS), in which a bridge connecting the city of Salvador to the island of Itaparica will be built. High-resolution seismic lines were obtained using *Boomer* and *Sparker* sources. The lines were processed through a processing flow commonly used in the petroleum industry in the *Seismic Unix* app. The lines were interpreted in the *Meridata MDPS* application. Thus, the rocky basement (Recôncavo basin) was mapped, and the thickness of the Quaternary sedimentary cover was determined. Four stratigraphic units were identified, and the most basal was sedimentary rocks of the Recôncavo Basin. Of the three identified quaternary units, the lowest one was accumulated under sub-aerial conditions before the bay flooded. The two upper units were accumulated after the bay flood and are separated from each other by a tidal ravine surface.

Keywords: Todos os Santos Bay; Shallow high-resolution seismic; Bays; *SPT* drill holes.

INTRODUÇÃO

Mapas estruturais e estratigráficos são importantes não apenas para a exploração de petróleo e minerais, mas também para o desenvolvimento de projetos de engenharia, tais como construção de barragens, túneis, portos e pontes (Fang, 1991; Costa, 2012; DNIT, 2013, 2014). Na engenharia, este mapeamento é realizado para as regiões mais superficiais (de dezenas a poucas centenas de metros), utilizando, via de regra, métodos diretos convencionais (amostragem, sondagem e testemunhagem). Entretanto, os métodos diretos, além de amostrarem apenas uma pequena região do terreno investigado, podem impactar os ecossistemas presentes na região investigada.

Nesse contexto, a sísmica de reflexão rasa de alta resolução, também chamada “perfilagem sísmica contínua”, é um método que pode auxiliar o mapeamento geológico de regiões subaquosas (marinhas, fluviais e lacustres), com a vantagem de não ser invasivo e possibilitar amostragem contínua das propriedades sísmicas. Este método tem sido empregado não só para auxiliar a elaboração dos projetos de barragens, pontes e portos, como também para o monitoramento dessas estruturas (Shtivelman, 2003; McClymont et al., 2016). Além disso, permite determinar, com boa precisão, a espessura de depósitos sedimentares recentes não consolidados e a profundidade do topo do embasamento rochoso, sobre o qual os sedimentos não consolidados estão assentados. O baixo custo operacional possibilita a aquisição de quilômetros de linhas sísmicas em um único dia (Souza, 2006, 2014) e a visualização das feições geológicas do subsfundo marinho, sendo também ambientalmente não impactante.

A sísmica de reflexão rasa de alta resolução utiliza fontes de diferentes frequências. O *Chirp* opera em altas frequências (2 a 40 kHz) e é utilizado para a obtenção dos registros de alta resolução em sedimentos finos. As fontes *Boomer* e *Sparker* operam em frequências mais baixas, em 0,3 a 8 kHz e 0,1 a 5 kHz, respectivamente, possibilitando maior penetração do sinal, apesar de perda de resolução (Mosher e Simpkin, 1999; Souza, 2006, 2014).

Historicamente, a sísmica convencional tem acumulado sucesso na prospecção de hidrocarbonetos. Conseqüentemente, foram realizados investimentos elevados nas áreas de aquisição e processamento, resultando em importantes avanços técnicos. O mesmo, porém, não se aplica à sísmica rasa mono canal, em razão:

- (i) da penetração limitada a poucas centenas de metros abaixo da interface sedimento-água;
- (ii) da indisponibilidade de levantamentos 3D;
- (iii) do menor controle sobre as características do pulso emitido pelas fontes sísmicas, o que resulta em redução na qualidade do seu processamento.

Schneider (1971) chamou a atenção para os benefícios oferecidos por algumas técnicas de processamento, bem como

para o fato de não estarem sendo aplicadas nos levantamentos de sísmica rasa. Na maioria dos casos, o processamento é realizado com aplicativos proprietários, os quais incluem apenas rotinas básicas de processamento sem a aplicação de técnicas mais avançadas de processamento (Henriet et al., 1978; Berryhill et al., 1986; Lee et al., 2004). Por outro lado, trabalhos como os de Barclay (1993), Duchesne e Bellefleur (2007), Siyou et al. (2009), Gomes et al. (2011) e Marino et al. (2013) utilizaram as técnicas rotineiramente empregadas pela indústria do petróleo no processamento de linhas sísmicas de alta resolução.

Para a Baía de Todos os Santos (BTS), Bahia, está prevista a construção de uma ponte interligando a cidade de Salvador à ilha de Itaparica (INEMA, 2015), conforme Figura 1. A elaboração de um projeto para a construção da ponte oferece uma oportunidade para a utilização de métodos de sísmica rasa de alta resolução, a fim de mapear a geometria do substrato rochoso e a variação da espessura da cobertura sedimentar recente ao longo do traçado da futura ponte. Embora algumas centenas de quilômetros de linhas sísmicas tenham sido anteriormente coletadas para a BTS, as frequências utilizadas (2 a 16 kHz — fonte *CHIRP*) não permitiram penetração adequada no subsfundo, em função da predominância de sedimentos arenosos na porção da baía em que a futura ponte será construída (Campos e Dominguez, 2011).

Este trabalho teve como objetivo principal o mapeamento estratigráfico do subsfundo da BTS no trecho previsto para a construção da futura ponte e de suas vizinhanças imediatas. Para tal, foram utilizadas fontes sísmicas dos tipos *Boomer* e *Sparker*, ambas atuando na faixa de frequências entre 0,3 e 1,5 kHz, as quais permitem uma penetração maior no subsfundo quando comparada à fonte *CHIRP*. Além disso, um objetivo secundário do trabalho foi desenvolver um fluxograma de processamento sísmico para atenuar/remover artefatos indesejados, produzindo dados de melhor qualidade e, portanto, melhorando a confiabilidade das interpretações realizadas.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Contexto geológico

A área de estudo situada próxima à entrada da BTS foi esculpida nas rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo (Figura 1). O substrato do fundo da BTS é, portanto, constituído de rochas sedimentares de idade Juro-Cretácea (Milhomem et al., 2003; Magnavita et al., 2005) que afloram ao longo da linha de costa da ilha de Itaparica. A península de Salvador é constituída por rochas cristalinas pré-cambrianas. O limite entre estes dois litotipos ocorre pela falha de Salvador, com rejeito de 6 km (Milhomem et al., 2003).

O trecho em que será implantada a ponte está situado sobre rochas Juro-Cretáceas. Na ilha de Itaparica afloram depósitos associados a fluxos gravitacionais subaquosos, constituídos de camadas arenosas lenticulares de arenito fino e médio com acamamento plano-paralelo, que integram o membro Caruaçu da formação Maracangalha (grupo Ilhas) de idade Eocretácea — 140 Ma (Medeiros e Ponte, 1981; Caixeta et al., 1994; Milhomem et al., 2003; Magnavita et al., 2005; Dominguez e Bittencourt, 2009). Tais litologias representam o substrato rochoso sobre o qual a ponte será assentada. Na borda Leste da área de estudo, na localidade de Monte Serrat, ocorrem rochas da formação Salvador,

constituídas de conglomerados e arenitos (Caixeta et al., 1994; Milhomem et al., 2003), depositados próximos à falha de borda da bacia (falha de Salvador). Sobre as rochas da Bacia do Recôncavo, a cobertura sedimentar quaternária (Dominguez e Bittencourt, 2009) foi depositada com depósitos de areias quartzosas, recobrando o fundo marinho na área de estudo.

Fisiografia

A baía possui um formato aproximadamente romboédrico e com profundidade média de 6 m (Cirano e Lessa, 2007). Na entrada da BTS, predominam sedimentos arenosos, enquanto na metade norte, sedimentos lamosos (Dominguez e Bittencourt, 2009). Alguns autores sugeriram que a fisiografia da BTS seja fortemente influenciada por movimentos tectônicos recentes (Martin et al., 1986). Entretanto, estudos mais recentes, como o de Dominguez e Bittencourt (2009), atribuem a sua formação às variações eustáticas do nível do mar, combinadas com a erosão diferencial entre as rochas do embasamento (mais resistentes) e as sedimentares. As variações eustáticas Cenozoicas estão diretamente relacionadas às mudanças climáticas que controlaram a dinâmica dos lençóis de gelo, em especial a expansão e a formação permanentes do lençol de gelo da Antártica (EAIS – *East Antarctic Ice Sheet*) (Zachos et al., 2001) e o desenvolvimento dos lençóis de gelo do Hemisfério Norte. Essas mudanças no nível eustático provocaram repetidos eventos de exposição e inundação na BTS, contribuindo para a sua fisiografia atual (Dominguez e Bittencourt, 2009).

Condições hidrodinâmicas

As correntes de maré têm papel fundamental na distribuição de sedimentos na BTS em períodos de nível de mar alto, pois são as variações de velocidades destas correntes aliadas à geometria do relevo que determinam os sítios de deposição. A fisiografia da BTS altera o comportamento da onda de maré, provocando sua amplificação e distorção à medida que ela adentra os trechos mais estreitos, sinuosos e/ou rasos (Lessa et al., 2009). Cirano e Lessa (2007) produziram mapas que mostram o campo de atuação (magnitude e direção) das correntes de maré na BTS (Lessa et al., 2009). O fluxo é unidirecional na coluna d'água, e as velocidades medidas variam entre 0,6 e 1,0 m/s a partir de Salvador até a porção Norte da baía. A ação dos ventos altera o fluxo nos metros iniciais da coluna de água. Os mapas produzidos por esses autores mostram que, na região do canal de Salvador, entrada da BTS, na maré vazante, ocorrem as maiores intensidades de correntes (1,0 m/s), as quais resultam na formação de dunas hidráulicas no fundo marinho do canal de Salvador (Dominguez e Bittencourt, 2009).

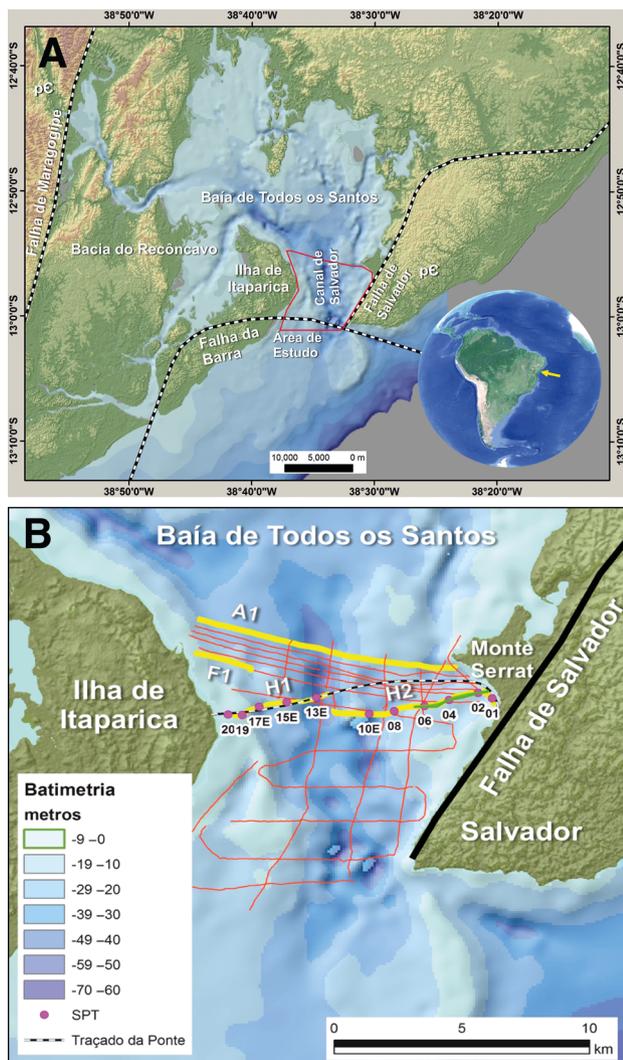


Figura 1. (A) Mapa de localização da área de estudo mostrando a batimetria do fundo marinho e principais falhas. (B) Localização das linhas sísmicas, traçado da futura ponte e sondagens SPT. As linhas em amarelo correspondem aos trechos de linhas sísmicas mostrados nas Figuras 4 a 8. A linha verde mostra o trecho da linha H2 que aparece na Figura 8.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados

180 quilômetros de linhas sísmicas foram utilizados neste trabalho (Figura 1), as quais foram adquiridas de dezembro de 2014 a fevereiro de 2015 e em março de 2016, utilizando fontes *Boomer* e *Sparker*, operando na mesma frequência (0,3 a 1,5 kHz). Os registros foram gravados no formato do *software* proprietário Meridata e exportados para o SEGY, utilizado nos principais programas de processamento sísmico.

Foram ainda empregados neste trabalho resultados de sondagens SPT (*Standard Penetration Test*), cedidos pelo Departamento de Estradas e Rodagens da Bahia (DERBA) e dados batimétricos produzidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (Figura 1).

Processamento sísmico

O processamento sísmico tem por objetivo aumentar a razão sinal/ruído (Claerbout, 1985; Yilmaz, 2001, 2015). O tratamento dos dados foi feito por meio do aplicativo *Seismic Unix* (SU) (Forel et al., 2005; Stockwell e Cohen, 2008). Os registros foram convertidos para o formato do *SU* e submetidos a fluxograma de processamento consagrado na indústria do petróleo (Yilmaz, 2015; Dondurur, 2018), conforme a Figura 2. Suas principais etapas serão descritas a seguir.

A primeira etapa foi a edição dos traços, para eliminação dos traços ruidosos, enquanto a segunda foi a aplicação de *Mute*, que zera as amplitudes de uma área específica do dado sísmico (Dondurur, 2018). Como as informações de interesse num dado sísmico de reflexão são as reflexões primárias, eventos como onda direta e amplitudes anormalmente negativas na coluna d'água foram silenciados nesta etapa. A terceira etapa foi a análise espectral para fornecer os parâmetros do filtro passa-banda. A quarta consistiu na aplicação do filtro passa-banda para atenuação dos ruídos de alta e baixa frequências associadas ao barulho do motor da embarcação e ruídos ambientais (ruídos aleatórios). A quinta etapa consistiu na aplicação de um filtro de mediana para eliminar as amplitudes anômalas presentes no dado. A sexta etapa foi a deconvolução *Spiking* para comprimir o pulso, que é um método estatístico para retirar o efeito da assinatura da fonte, aumentando a resolução temporal do dado (Kearey et al., 2009). No entanto, como não se conhecia a assinatura original do pulso, ela foi estimada a partir do próprio dado sísmico. O conhecimento dessa assinatura possibilitaria a reprodução da função refletividade com mais precisão. Apesar dessa limitação, a deconvolução do pulso se mostrou eficiente, produzindo resultados satisfatórios, pois o topo e a base de camadas delgadas puderam ser identificados. A sétima

etapa foi a deconvolução preditiva, também uma técnica estatística, que tem como objetivo a atenuação das reflexões múltiplas do fundo do mar (Robinson, 1957; Porsani e Ursin, 2007), ruído coerente mais indesejado na sísmica rasa. Quando o fundo marinho é composto por fácies arenosas e/ou a lâmina d'água é muito rasa, esses ruídos aparecem em número elevado e com altos valores de amplitude, com energia semelhante à reflexão primária, dificultando a visualização dos eventos de interesse.

Por fim, um controle de ganho automático foi aplicado para realçar os refletores atenuados devido ao decaimento da amplitude do sinal (Duchesne e Bellefleur, 2007).

A aplicação do conjunto de processos citados permitiu visualizar os eventos de interesse (refletores) com maior nitidez, resultando em um detalhamento das feições geológicas



Figura 2. Fluxograma de processamento sísmico com as principais etapas executadas.

(topo rochoso e espessura da camada de sedimentos não-consolidados). Após tal processamento, as seções sísmicas foram interpretadas.

RESULTADOS

Processamento

A aplicação do fluxograma de processamento descrito resultou em aprimoramento da qualidade dos registros como apresentado na Figura 3, que mostra uma seção sísmica antes e depois do processamento. Nota-se que os

ruídos foram atenuados, e os eventos de interesse (refletores primários), realçados. Dessa forma, a interpretação estrutural e estratigráfica deles pode ser feita com maior precisão e confiabilidade.

Unidades sísmicas

Foram identificadas quatro unidades sísmicas, delimitadas por superfícies estratais indicativas de discontinuidades na sedimentação, principalmente discordâncias (Figuras 4 a 8). As unidades sísmicas individualizadas nas seções sísmicas foram correlacionadas aos dados das sondagens SPT, o que ajudou a melhor caracterizá-las.

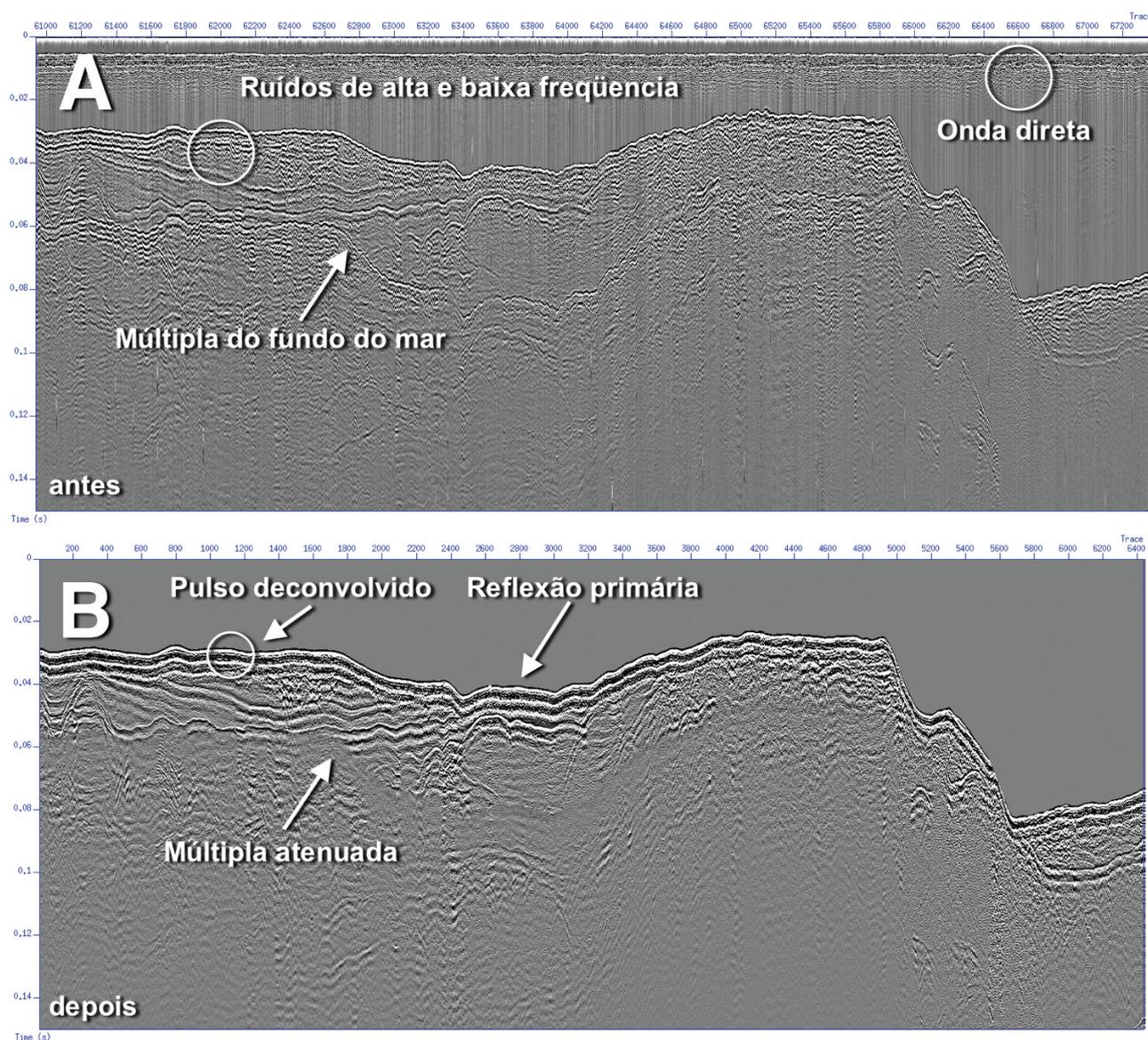


Figura 3. Seção sísmica antes (A) e após o processamento, (B) com aplicação do *mute* na coluna d'água, eliminação dos ruídos aleatórios e atenuação da múltipla do fundo do mar.

Unidade sísmica 1 (Us1), a mais basal, é representada pelas rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo (Figuras 4 a 8). Essa unidade aflora na linha de costa da ilha de Itaparica e na localidade de Monte Serrat. Os refletores internos apresentam-se paralelos a subparalelos e são caracterizados por amplitude e continuidade elevadas, principalmente nas proximidades da ilha de Itaparica. O topo desta unidade é bastante irregular e cortado por paleovales incisos, cujas larguras variam entre 20 e 550 m, estando os

seus talwegues situados em profundidades que variam de 50 a 70 m, abaixo do nível do mar atual. Na borda Oeste da área de estudo, o acamamento interno desta unidade mergulha para Leste, com ângulos em torno de 3° e 4°, aproximadamente. Na região Central, tais refletores são de difícil visualização. Na borda Leste, o acamamento paralelo volta a predominar, que, desta vez, mergulha para Oeste com ângulos em torno de 4° e 5°, aproximadamente. As sondagens SPT indicam que a unidade é constituída no topo por

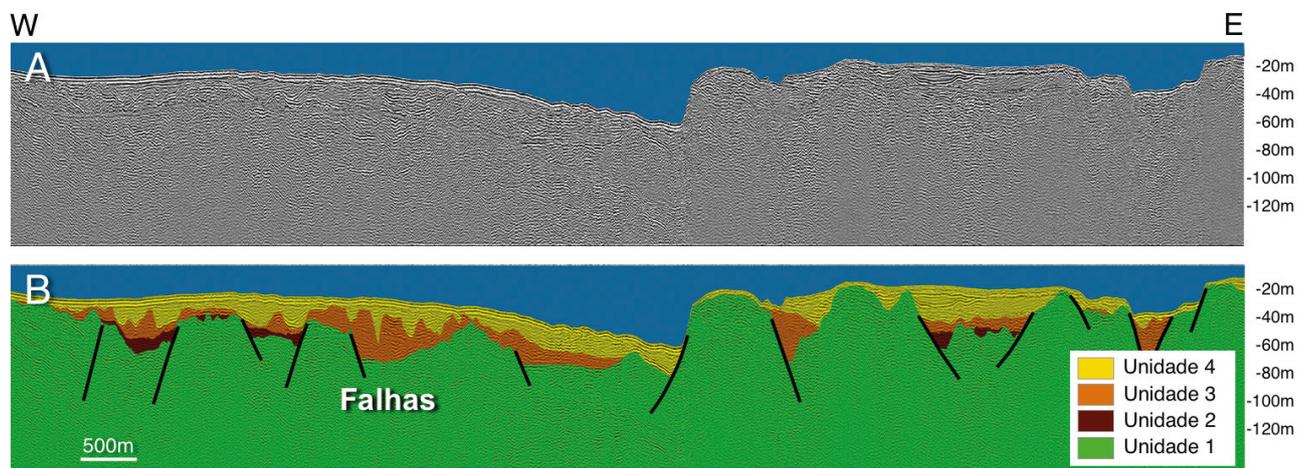


Figura 4. Seção sísmica A1, subparalela ao trajeto da ponte, mostrando a geometria do substrato rochoso e as diferentes unidades estratigráficas mapeadas. (A e B) Seções não interpretada e interpretada, respectivamente. Consultar Figura 1 para localização.

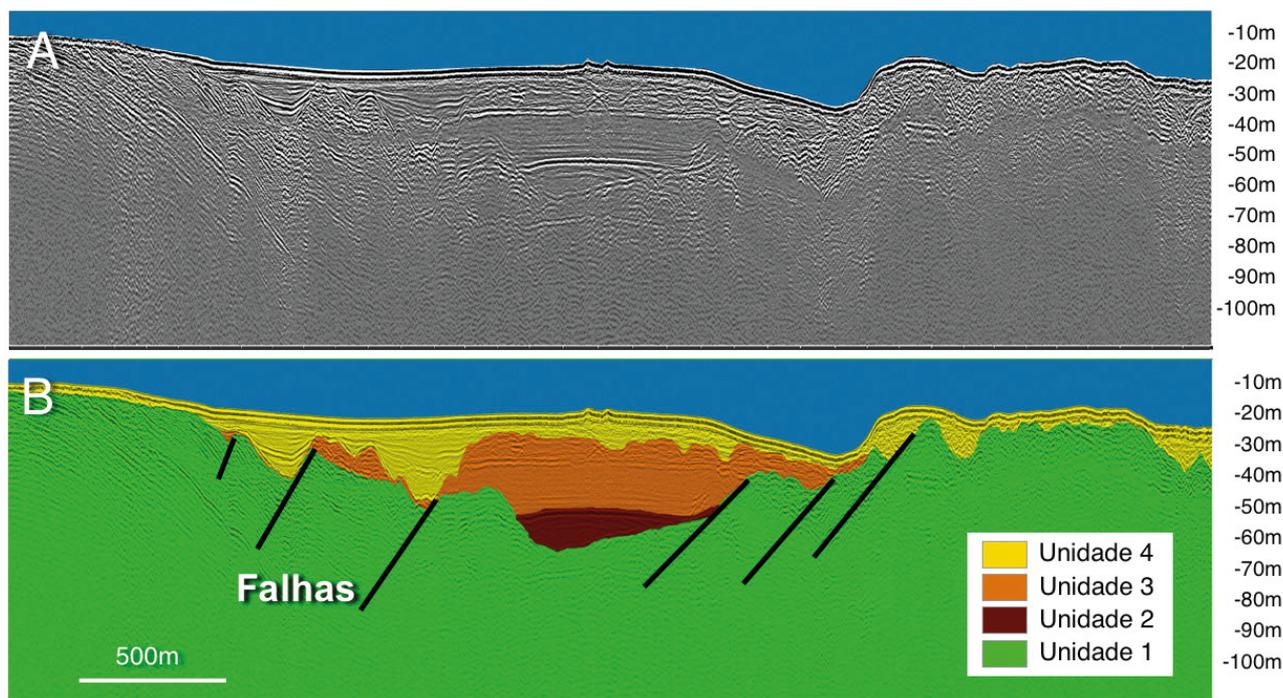


Figura 5. Seção sísmica F1, (A e B) Seções não interpretada e interpretada, respectivamente. Consultar Figura 1 para localização.

argilito (cor cinza claro), com variações de argilito, siltito e arenito fino (cinza escuro), apresentando índice de resistência à penetração dinâmica (NSPT) em torno de 46.

A unidade sísmica 2 (Us2) ocorre nas porções mais inferiores dos paleovales incisos, esculpido no topo da Us1, formando corpos isolados com baixa continuidade lateral e refletores de alta amplitude (Figuras 4 a 8). Esta é encontrada

em profundidades variáveis entre 33 e 66 m. Nas sondagens SPT, é constituída de uma areia vermelha bastante compactada (NSPT = 25). Parece existir um controle estrutural na distribuição desta unidade, visto que ela ocorre apenas na porção Norte da área de estudo (Figura 9A).

A unidade sísmica 3 (Us3) repousa diretamente sobre as Us1 e Us2, preenchendo irregularidades existentes no topo

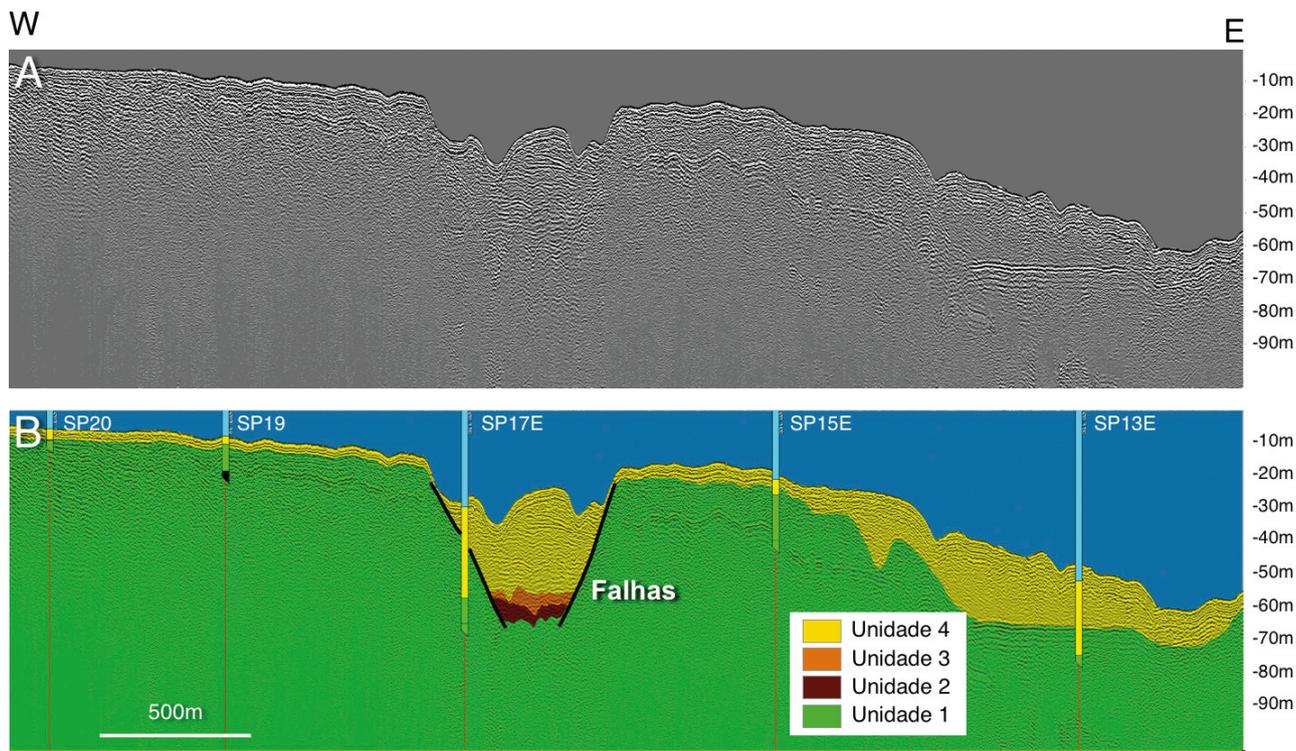


Figura 6. Seção sísmica H1 ao longo das sondagens SPT. (A e B) Seções não interpretada e interpretada, respectivamente. Na seção interpretada, encontram-se plotadas as sondagens SPT realizadas no trecho abrangido pela linha. Consultar Figura 1 para localização.

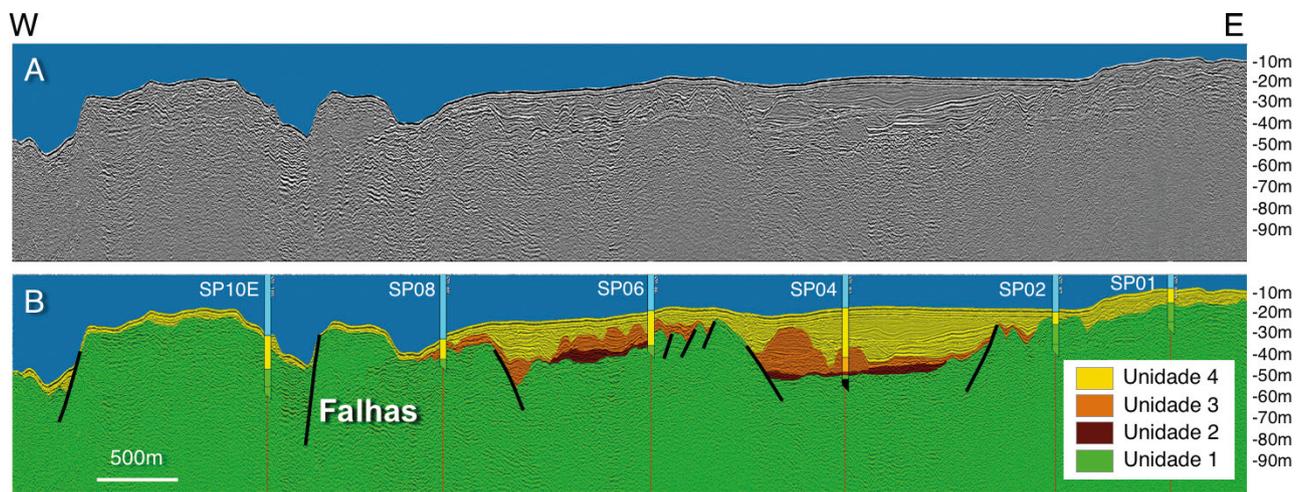


Figura 7. Seção sísmica H2 ao longo das sondagens SPT. (A e B) Seções não interpretada e interpretada, respectivamente. Em B, encontram-se plotadas as sondagens SPT realizadas no trecho abrangido pela linha. Consultar Figura 1 para localização.

da Us1. Internamente, seus refletores são plano-paralelos, com alta amplitude. Sua continuidade lateral é reduzida. Além disso, o seu topo é irregular, com numerosos vales estreitos e pouco profundos (profundidades dos talvegues variando entre 30 e 55 m e largura em torno de 20 m), conforme Figuras 4 a 8 e 9B. A profundidade máxima em que essa unidade foi depositada é de 75 m abaixo do nível do mar atual. Nas sondagens SPT, esta unidade é constituída por sedimentos arenosos de colorações amarela, branca e cinza claro, variando de pouco a medianamente compacta (NSPT entre 8 e 17).

A unidade sísmica 04 (Us4) é a mais superior da área de estudo e preenche os paleovales existentes tanto no topo da Us1, quanto no topo da Us3. Ocorre desde a profundidade de 87 m abaixo do nível atual até o fundo marinho atual. É a unidade mais complexa, em termos da variedade de geometrias dos refletores internos, sendo também a mais espessa. Os refletores internos desta unidade apresentam amplitude e continuidade elevadas. Na sua porção inferior, esta unidade preenche os pequenos vales presentes no topo da unidade Us3. Na porção superior, os refletores internos são caracterizados por alta amplitude e continuidade, exibindo localmente geometria em cliniforma e padrões de terminação em *onlap* sobre as unidades mais antigas (Figuras 4 a 8 e 9C). A geometria progracional dos refletores sugere que parte destes sedimentos pode ter se originado a partir da erosão do topo dos interflúvios adjacentes aos vales em que estão depositados. Além de geometrias progracionais, ocorrem também geometrias em “*drape*” e de preenchimento de canais, como pode ser observado na Figura 5.

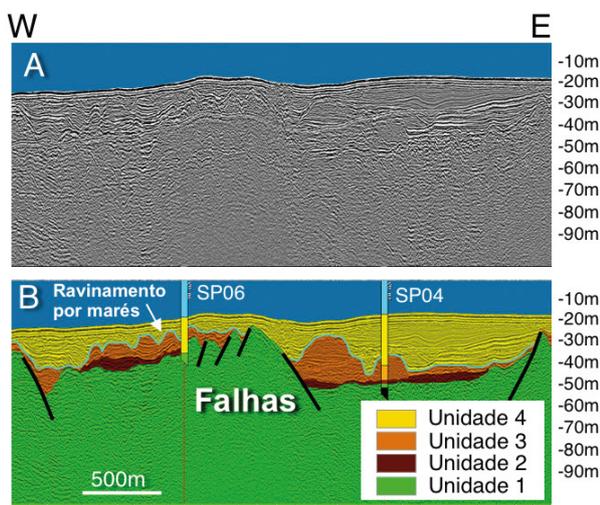


Figura 8. Trecho da seção sísmica H2 mostrando a única sondagem SPT (SP04) que conseguiu atravessar todas as unidades sísmicas mapeadas. Consultar Figura 1 para localização.

A unidade Us4 apresenta uma grande continuidade lateral, soterrando o paleorrelevo existente nas regiões laterais ao canal de Salvador quase que completamente (Figuras 4 a 8). Nas sondagens SPT, esta é constituída de areia siltosa de cor clara/escuro, mais abundante no topo da unidade, além de areia siltosa com matéria orgânica e areia argilosa de coloração cinza claro, tendo consistência que varia de fofa a pouco compacta (NSPT entre 4 e 8).

Correlação entre as seções sísmicas e as sondagens SPT

Nas Figuras 6 e 7, são apresentadas as correlações entre as seções sísmicas e as sondagens. A maioria das profundidades do fundo marinho e do topo do embasamento sedimentar é correlacionável. Porém, a correlação foi realizada somente após a interpretação das seções sísmicas. Apenas a sondagem SP-04 amostrou todas as unidades sedimentares, conforme observa-se na Figura 7 e com maior detalhamento na Figura 8. Algumas sondagens não apresentaram boa correlação com a sísmica, como a SP-10E (Figura 7), a SP-13E e a SP-17E (Figura 6), provavelmente devido às limitações inerentes ao seu processo de execução (problemas com desmoronamento e lavagem das amostras acarretam em baixa precisão do método em maiores profundidades) e às linhas sísmicas terem sido adquiridas a uma certa distância (centenas de metros) do local da sondagem.

Distribuição espacial das unidades mapeadas

Foram confeccionados mapas de isópacas, assim como um mapa do topo do embasamento rochoso, para todas as unidades (Figura 9). O mapa de topo do embasamento rochoso mostra a presença de um paleocanal orientado Norte-Sul (situado na posição do atual canal de Salvador), que parece meandrar no sentido da entrada da BTS e, depois, se direciona ao Sudeste (Figura 9D). A profundidade máxima deste paleocanal é de 75 m abaixo do nível do mar atual, sendo que, dessa forma, a profundidade do topo do embasamento varia desde a base do paleocanal às porções mais elevadas situadas em aproximadamente 10 m. O mapa de isópacas da espessura total dos sedimentos quaternários está representado na Figura 9E, e aqueles de cada uma das unidades sísmicas mapeadas estão apresentados nas Figuras 9A, 9B e 9C.

DISCUSSÃO

O processamento sísmico produziu resultados satisfatórios e permitiu que as seções sísmicas fossem interpretadas com maior confiabilidade.

Os resultados obtidos mostram que o topo do embasamento rochoso apresenta uma geometria extremamente irregular,

com desníveis entre 10 e 75 m, além de declividades entre 2° e 65°, e as maiores declividades podem estar associadas a antigos sistemas de falhas (Figuras 4 a 8). A área de estudo exibe grande complexidade em relação ao substrato rochoso e às unidades sedimentares. Foi possível identificar pelo menos três unidades sedimentares associadas a diferentes episódios de preenchimento da baía, que, devido à sua história evolutiva, poderiam apresentar propriedades geotécnicas variáveis.

Reconstrução sismoestratigráfica

O mapeamento realizado utilizando as seções sísmicas permitiu reconstruir a geometria do substrato rochoso ao longo do trajeto da futura ponte e de suas vizinhanças (Figuras 4 a 8).

Este paleorrelevo apresenta desníveis entre 10 e 75 m abaixo do nível do mar atual, com encostas exibindo declividades acentuadas. O paleorrelevo desenvolveu-se como consequência da prolongada exposição subaérea (superfície de discordância da Figura 9D) devido ao abaixamento do nível do mar eustático durante o Cenozoico (Zachos et al., 2001; Milhomem et al., 2003; Dominguez e Bittencourt, 2009).

A unidade sísmica 2 depositou-se, provavelmente, em um período de mar baixo (Figura 10), considerando que ocorre apenas no fundo dos vales incisos e apresenta coloração avermelhada nas sondagens SPT, a qual indica exposição subaérea e deposição associada a cursos fluviais que corriam no fundo desses vales.

Uma primeira inundação da BTS resultou na deposição da unidade sísmica 3, a qual também ocorre preenchendo depressões e paleocanais no embasamento rochoso e, portanto, apresenta baixa continuidade lateral. Após sua deposição, a Us3 teve seu topo parcialmente erodido (Figuras 4 a 8). Duas hipóteses podem explicar esta erosão. Se tivesse caráter subaéreo, a Us3 teria sido depositada antes do último máximo glacial. A cor amarelada desses sedimentos indicaria exposição subaérea desta unidade, que pode ter provocado a sua compactação por causa da perda de fluidos. A segunda hipótese é que esta superfície erosiva seria uma superfície de ravamento por maré, que se desenvolveu no período anterior ao Pulso de Degelo 1C (MWP1C) (Figuras 8 e 10) (Miner et al., 2007). Dessa forma, a Us3 poderia ter sido depositada durante a última subida do nível do mar eustático (Figuras 8 e 10).

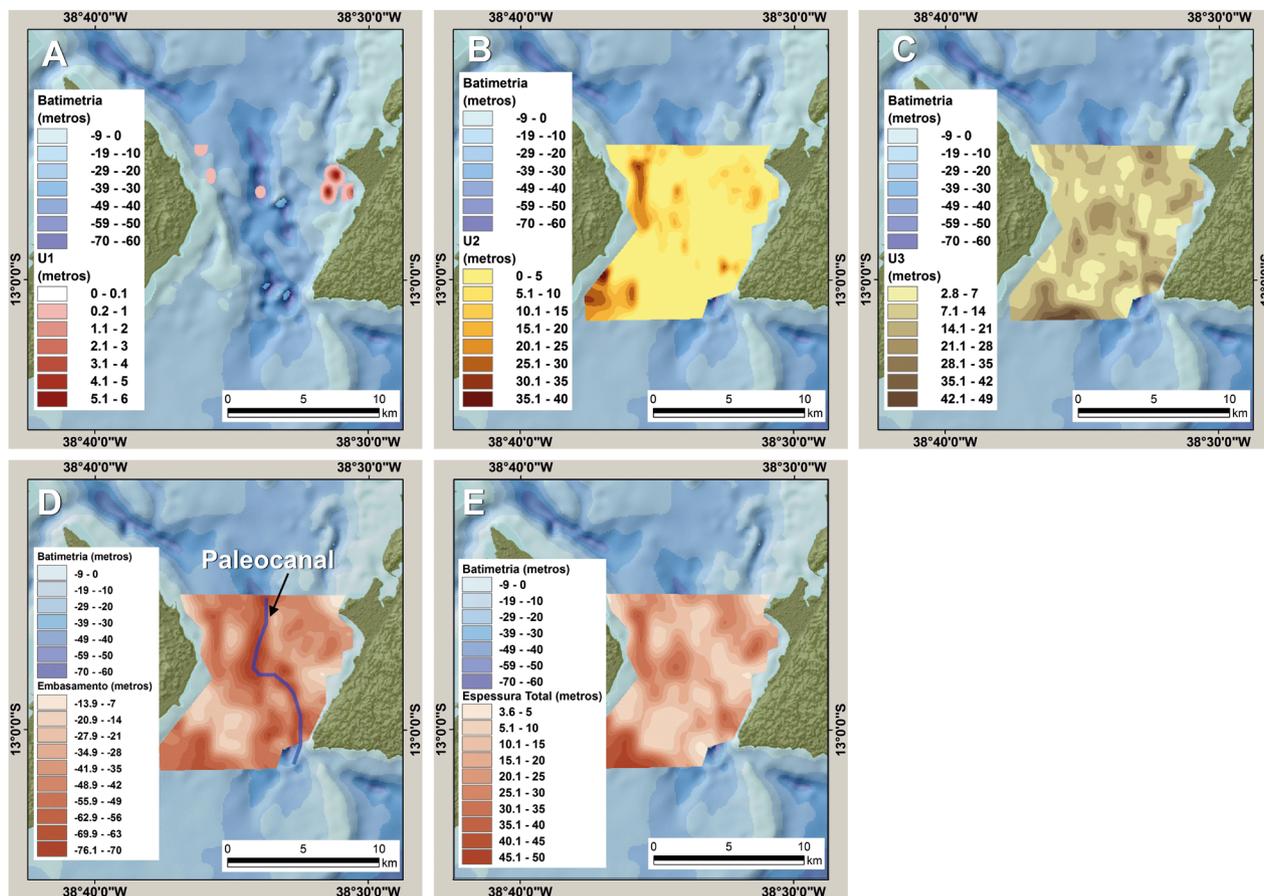


Figura 9. (A, B e C) Mapas de isópacas das unidades U1, U2, U3, respectivamente. (D) Mapa da profundidade do topo do embasamento rochoso. (E) Mapa de isópacas da cobertura sedimentar total dos sedimentos quaternários.

A Us4 recobre grande parte dos vales, soterrando o paleorrelevo da BTS, pelo menos nas áreas marginais aos canais principais. Esta deposição ocorreu possivelmente somente após a completa inundação da BTS. Durante a acumulação dessa unidade, as fontes de sedimento foram as margens da BTS, como evidenciado pelas geometrias clinoformais da mesma.

De uma forma geral, a sedimentação predominou nas regiões marginais e nos interflúvios em comparação aos canais principais, visto que, com a invasão do mar, as correntes de marés mais intensas no interior destes canais (Lessa et al., 2009) dificultaram a acumulação de sedimentos. Nas regiões marginais (borda da BTS), a presença de áreas emersas, como a Ilha de Itaparica e a Península de Salvador, favoreceu um maior suprimento de sedimentos, o que explica o padrão progradacional observado na Figura 6 a Oeste e Leste; nas Figuras 4 e 5, a Oeste; e nas Figuras 7 e 8, a Leste, em associação com menor intensidade das correntes.

Controle temporal para a deposição das unidades quaternárias

Em razão da inexistência de datações radiométricas, houve uma tentativa de atribuir limites cronológicos às unidades identificadas, utilizando como parâmetro a posição que as

mesmas ocupam em relação ao nível do mar atual, bem como relacionando-as com o que se conhece do comportamento do nível do mar eustático desde o último máximo glacial (Figura 10).

A Us2, que é a mais antiga dentre as unidades quaternárias, poderia ter sido depositada durante ou logo após o Último Máximo Glacial (MIS2), enquanto a BTS não havia sido inundada, pelo menos nos locais em que essa unidade está presente. Os sedimentos dessa unidade amostrados nas sondagens SPT apresentam-se oxidados, sugerindo deposição sob condições subaéreas.

A Us3, considerando-se seus limites inferior e superior e pressupondo um caráter marinho, poderia ter sido depositada após o Pulso de Degelo 1B (MWP1B), quando as regiões mais rasas, laterais aos canais principais existentes na BTS, começaram a ser inundadas. Essa deposição teria prosseguido até 8,7 ka. A erosão que afeta o topo dessa unidade é aqui atribuída ao desenvolvimento de uma superfície de ravinamento por marés (Miner et al., 2007), favorecida por desaceleração nas taxas de subida do nível do mar verificadas após o Pulso de Degelo 1B. Essa superfície de ravinamento por marés foi então afogada pela rápida subida do nível do mar associada ao Pulso de Degelo 1C (MWP1C), quando então ocorreu a criação do espaço de acomodação para a acumulação da Us4.

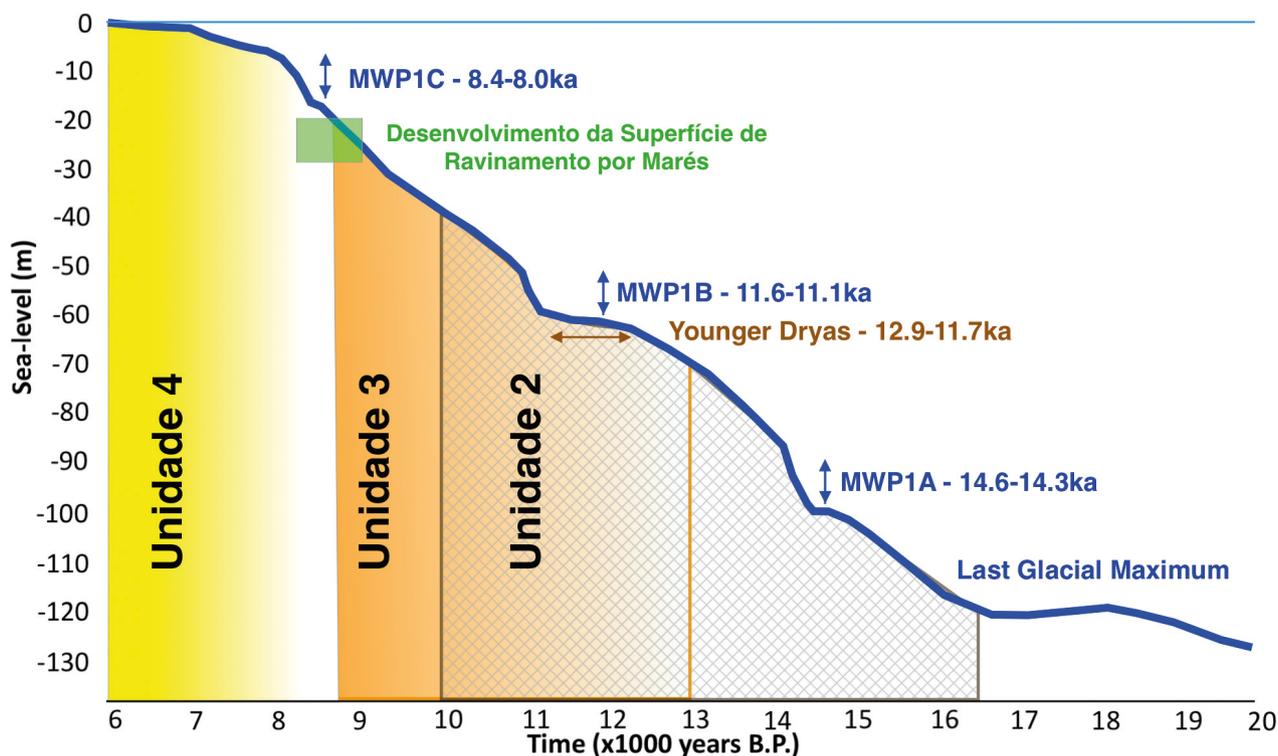


Figura 10. Limites superior e inferior das unidades sísmicas 2, 3 e 4 plotados na curva eustática de Harrison et al. (2019). Um gradiente de cor foi usado para cada unidade para sugerir que a deposição provavelmente se deu ao final de cada intervalo de tempo.

A Us4, em função de seus limites inferior e superior e ausência de feições erosivas observáveis, pode ter tido sua deposição iniciada a qualquer instante, a partir da estabilização do nível eustático a cerca de 8 ka.

Aplicações na engenharia

De modo geral, observa-se boa correlação entre as sondagens SPT e as unidades sísmicas encontradas, porém, devido às limitações do método, já apontadas, as sondagens SPT não conseguem traduzir de maneira precisa a variação da

paleotopografia do embasamento rochoso. Do mesmo modo, em função do grande espaçamento entre esses furos, as variações de espessura da cobertura sedimentar não estão bem documentadas. As Figuras 11A a 11D mostram os mapas das profundidades do embasamento e das espessuras de sedimentos, produzidos a partir dos dados das sondagens SPT e das sessões sísmicas. As Figuras 11E e 11F mostram a variação espacial das diferenças de valores obtidos para esses parâmetros.

Nota-se que os mapas gerados a partir das linhas sísmicas representam as superfícies estratigráficas e os depósitos

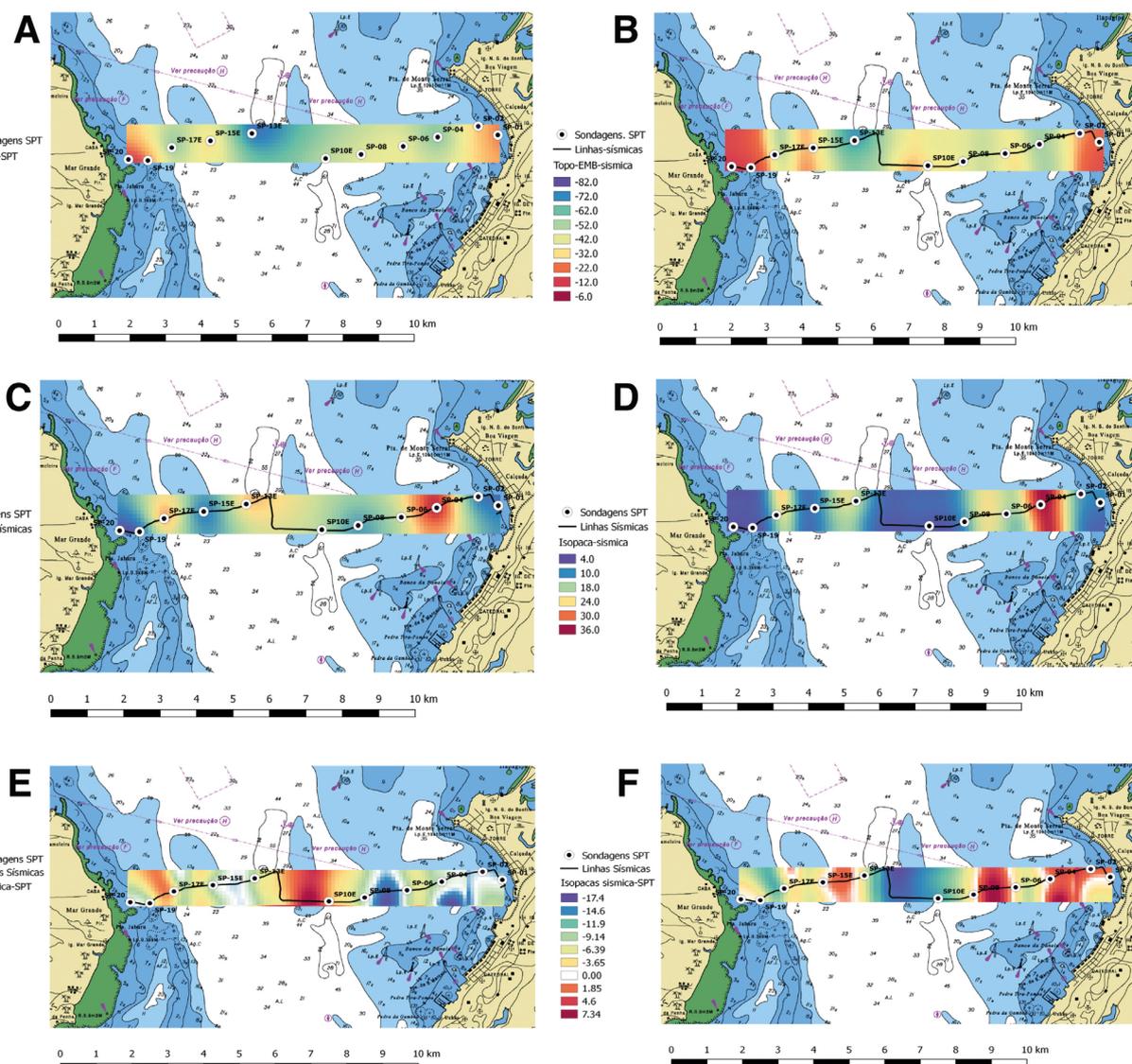


Figura 11. (A) Mapa do topo do embasamento, gerado a partir da interpolação das sondagens SPT. (B) Mapa do topo do embasamento, gerado a partir dos resultados das interpretações sísmicas. (C) Mapa de isópacas da cobertura sedimentar não consolidada, gerado a partir da interpolação das sondagens SPT. (D) Mapa de isópacas da cobertura sedimentar não consolidada, gerado a partir dos resultados das interpretações sísmicas. (E) Diferença na profundidade do topo do embasamento determinada pelas sondagens SPT e linhas sísmicas. (F) Diferenças na espessura da cobertura quaternária determinada pelas sondagens SPT e linhas sísmicas.

sedimentares de modo mais detalhado, quando comparados aos gerados pelas sondagens SPT.

Os mapas criados utilizando o método sísmico podem contribuir de maneira significativa para a locação dos furos de sondagens em projetos futuros, pois fornecem informações confiáveis das profundidades do topo do embasamento sedimentar e das espessuras dos sedimentos.

Os resultados das subtrações dos mapas (profundidade do topo e espessura) mostram que os trechos, em que os valores obtidos pelos dois métodos são coincidentes (cores brancas — valores iguais a 0), correspondem essencialmente aos locais e às vizinhanças imediatas dos furos. Tons de azul (valores negativos) indicam as regiões em que os dados de sondagem produziram valores subestimados, enquanto tons quentes (valores positivos) mostram as regiões em que os valores obtidos pelas sondagens foram superestimados.

Apesar destas diferenças, os dados das sondagens foram muito importantes para a interpretação da natureza litológica das unidades sedimentares e suas propriedades geotécnicas, havendo, portanto, uma boa complementariedade dos dois métodos.

O conhecimento da sequência de eventos deposicionais deduzido da interpretação sísmica pode também ser utilizado como preditor de suas características geotécnicas. Por exemplo, pelo fato de a Us2 ter sido exposta subaeramente por um longo período (cor avermelhada), com consequente perda de fluidos, além de sobrecarga das unidades sobrepostas, espera-se que ela tenha alto grau de compactação, o que pode ser confirmado nas sondagens (NSPT = 25, compacta). A Us3, cujo topo apresenta feições erosivas que podem estar associadas a uma superfície de ravamento por marés, pode igualmente ter experimentado perda de fluidos, resultando em um nível de compactação moderado, conforme observado nas sondagens (NSPT variando entre 11 e 17, medianamente compacta).

Por fim, a Us4, por ter sido depositada mais recentemente, apresenta menor compactação quando comparada às outras unidades. Sua resistência à penetração (NSPT) varia entre 4 (no topo) e 12 (na base). De forma geral, o limite entre as unidades ocorre de maneira gradual. Isso fica bem evidenciado nas variações dos índices de resistência das unidades sedimentares, não se observando uma quebra brusca no limite entre as litologias.

CONCLUSÕES

Este estudo realizou o mapeamento do topo do embasamento rochoso e da espessura da cobertura sedimentar quaternária utilizando interpretações de seções sísmicas de alta resolução, bem como a sua caracterização a partir da integração com dados de sondagens SPT. Foi possível observar que a geometria do substrato rochoso é bastante irregular, pois é cortado por diversos paleovales incisos. Alguns destes

vales, ainda não preenchidos, coincidem com os principais canais na entrada da BTS. Os resultados mostram que, de modo geral, a sedimentação ocorreu principalmente nas regiões marginais a estes vales, a partir de fontes sedimentares oriundas da Ilha de Itaparica e da Península de Salvador. Essa deposição pode também ter sido favorecida pela menor intensidade das correntes de maré nestas áreas. Quatro unidades sísmicas foram identificadas, a mais inferior correspondendo ao embasamento rochoso constituído pelas rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo. Das três unidades quaternárias identificadas, uma (Su2) pode ter sido depositada antes do último máximo glacial, em períodos de nível de mar inferiores ao atual. A Us4, mais superior, é a única que pode ter sido depositada após a inundação completa da BTS, principalmente a partir de 8 ka.

A comparação entre os mapas do topo do embasamento rochoso e da espessura total de sedimentos gerados, a partir dos dados de sondagem e da sísmica rasa, mostrou que o método sísmico fornece informações mais detalhadas do ponto de vista regional, enquanto as sondagens foram importantes para as interpretações sísmicas. Os dois métodos apresentaram localmente excelente concordância e complementariedade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ambientes Marinhos Tropicais (inctAmbTropic), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), processos 565054/2010-4, 8936/2011 e 465634/2014-1. Suporte financeiro foi também fornecido pelo projeto FAPESB no 014/2014 (PET0036/2014). Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o auxílio financeiro na forma de bolsa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Barclay, W. (1993). *Processing of multichannel seismic data from shallow-water areas of Solomon islands and Vanatu: Phase 1*. SOPAC Preliminary Report, 58p.
- Berryhill, H. L., Suter, J. R., Hardin, N. S. (1986). Late Quaternary Facies Sand Structure, Northern Gulf of Mexico. American Association of Petroleum Geologists, 289 p. (Studies in Geology, 23).
- Caixeta, J. B., Bueno, G. V., Magnavita, L. F., Feijó, F. J. (1994). Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1), 163-172.

- Campos, R. H. S., Dominguez, J. M. (2011). Shallow gas accumulations in the sediments of Todos os Santos Bay (Bahia, Brazil): origin and distribution. *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro.
- Cirano, M., Lessa, G. C. (2007). Oceanographic characteristics of Todos os Santos Bay, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(4), 363-387. <http://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000400002>
- Claerbout, J. F. (1985). *Fundamentals of geophysical data processing*. Tulsa: Pennwell Books. 279 p.
- Costa, W. D. (2012). *Geologia de Barragens*. São Paulo: Oficina de Textos. 352 p.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT). (2013). *Projeto executivo de engenharia para a construção de uma segunda ponte sobre o Rio Guaíba e acessos*. Relatório Interno Porto Alegre: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte. 131 p.
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT). (2014). *Projeto executivo de engenharia para recuperação, reforço e reabilitação da ponte rodoviária "Felipe Guerra" sobre o Rio Assu/RN*. Relatório Interno. Natal: Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte. 319 p.
- Dominguez, J. M., Bittencourt, A. C. (2009). Geologia. In: V. Hatje, J. B. Andrade. *Baía de Todos os Santos – Aspectos oceanográficos*, p. 25-66. Salvador: EDUFBA.
- Dondurur, D. (2018). *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Amsterdã: Elsevier. 606 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01591-7>
- Duchesne, M. J., Bellefleur, G. (2007). *Processing of single-channel high-resolution seismic 2D Seismic data collected in the St. Lawrence Estuary*. Canadá: Geological Survey of Canada - Current Research-D1, 11 p.
- Fang, H.-Y. (1991). *Foundation Engineering Handbook*. 2. ed. Nova York: Springer Science & Business Media. 923 p.
- Forel, D., Benz, T., Pennington, W. D. (2005). *Seismic Data Processing with Seismic Un*x: A 2D Seismic Data Processing Primer*. Society of Exploration Geophysicists, 12, 291p. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801948>
- Gomes, M. P., Vital, H., Macedo, J. W. P. (2011). Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental. Exemplo: Macau-RN. *Revista Brasileira Geofísica*, 29(1), 173-186. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000100012>
- Harrison, S., Smith, D. E., Glasser, N. F. (2019). Late Quaternary meltwater pulse and sea level change. *Journal of Quaternary Science*, 34(1), 1-15 <https://doi.org/10.1002/jqs.3070>
- Henriet, J. P., Bastin, A., Rouck, J. (1978). Integration of continuous seismic profiling in geotechnical investigations off the Belgian coast. *7th International Harbour Congress*. *Anais...* 1.18/1-1.18/13
- Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – INEMA (2015). *Estudo de Impacto Ambiental – EIA – e Relatório de Impacto Ambiental – RIMA – para a implantação do Sistema de Travessia Salvador / Itaparica sobre a Baía de Todos os Santos, do Tipo Ponte Rodoviária e Duplicação da Rodovia BA 001, Trecho Itaparica a Ponte do Funil, e demais estruturas*.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2009). *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de Textos. 438 p.
- Lee, H. Y., Park, K. P., Koo, N. H., Yoo, D. G., Kang, D. H., Kim, Y. G., Hwang, K. D., Kim, J. C. (2004). High-resolution shallow marine seismic surveys off Busan and Pohang, Korea, using a small-scale multichannel system. *Journal of Applied. Geophysics*, 56(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.03.003>
- Lessa, G. C., Cirano, M., Genz, F., Tanajura, C. A., Silva, R. R. (2009). Oceanografia Física. In: Hatje, V., Andrade, J. B. (eds.), *Baía de Todos os Santos – Aspectos oceanográficos*, p. 67-119. Salvador: EDUFBA.
- Magnavita, L. P., Silva, R., Sanches, C. (2005). Guia de Campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13(2), 301-334.
- Marino, I. K., Cetale Santos, M. A., Silva, C. G. (2013). Processing of high-resolution, shallow seismic profiles, Guanabara Bay - Rio de Janeiro state, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 31(4), 579-594. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v31i4.339>
- Martin, L., Flexor, J. M., Bittencourt, A. C., Dominguez, J. M. (1986). Neotectonic movements on a passive continental margin: Salvador region, Brazil. *Neotectonics*, 87-103.

- McClymont, A., Bauman, P., Johnson, E., Pankratow, L. (2016). Geophysical Applications to Construction Engineering Projects. *Recorder*, 41(4), 16-22.
- Medeiros, R. A., Ponte, F. C. (1981). *Roteiro Geológico da Bacia do Recôncavo (Bahia)*. Salvador: Petrobras/Senai-BA. 63p.
- Milhomem, P., Maman, E., Oliveira, F., Carvalho, M., Souza-Lima, W. (2003). *Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia do Recôncavo*. Fundação Paleontológica Phoenix. n. 11.
- Miner, M. D., Kulp, M. A., FitzGerald, D. M. (2007). Tidal Versus Shoreface Ravinement and Tidal Inlet Fill Preservation Potential for Transgressive Tidal Inlets, Mississippi River Delta Plain, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, SI 50, 805-809.
- Mosher, D. C., Simpkin, P. G. (1999). Environmental Marine Geoscience 1: Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: data acquisition. *Geoscience Canada*, 26(4), 174-188.
- Porsani, M. J., Ursin, B. (2007). Direct multichannel predictive deconvolution. *Geophysics*, 72(2), 11-27. <http://doi.org/10.1190/1.2432260>
- Robinson, E. A. (1957). Predictive decomposition of seismic traces. *Geophysics*, 22(4), 767-778. <https://doi.org/10.1190/1.1438415>
- Schneider, W. A. (1971). Developments in seismic data processing and analysis (1968-1970). *Geophysics*, 36(6), 1043-1073. <https://doi.org/10.1190/1.1440232>
- Shtivelman, V. (2003). Application of shallow seismic methods to engineering, environmental and groundwater investigations. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 44(3), 209-222.
- Siyou, T., Lei, G., Huaishan, L., Yanxin, Y., Jin, Z., Shuhua, W. (2009). Interpretation of marine high-resolution shallow seismic profile. *International Forum on Computer Science-Technology and Applications*, 3, 195-198. *Anais...* <https://doi.org/10.1109/IFCSTA.2009.287>
- Souza, L. A. P. (2006). *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto Oceanográfico – USP. 311 p. <https://doi.org/10.11606/T.21.2006.tde-30102006-171206>
- Souza, L. A. P. (2014). Sísmica multifrequencial: A melhor solução para a investigação de ambientes submersos rasos. *Comunicações Geológicas*, 101, 701-705. *Anais...*
- Stockwell, J. W., Cohen, J. K. (2008). *The New SU User's Manual*. Colorado School of Mines. Golden: Society of Exploration Geophysicists. 141 p.
- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. v. 10, 2027 p. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>
- Yilmaz, O. (2015). *Engineering Seismology: With Applications to Geotechnical Engineering*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. 964 p.
- Zachos, J., Pagani, H., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686-693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>