



Comparação entre Fontes Sísmicas de Alta Resolução

Diego Venturini Loureiro (UMI SAN/UFES), Alex Cardoso Bastos (UFES)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract (Font: Arial Bold, 9)

A comparison of seismic sources was performed using records obtained from sources like Boomer and Chirp in Vitoria Harbour and Espírito Santo Bay, adjacent to Vitoria city, ES, and in Guanabara Bay, located in the Rio de Janeiro, RJ. The data were processed and interpreted in order to find the maximum penetration depth or the acoustic basement of the seismic profiles. We observed clearly that Chirp sources are conditioned by sediment type and mud content, so the change in particle size of mud to sand decrease the penetration. It was further observed that these sources have low penetration, usually not exceeding more than 10 meters. In contrast, devices like Boomer have higher penetration, reaching almost 40 meters. In addition, the type of bottom and mud content does not constrain the penetration of this source.

Considering the boomer source, an analysis of the relation between resolution and source energy was also performed. It was observed that a significant increase of energy leads to a decrease of the main frequencies, reducing the resolution between the reflectors. Moreover, it was found that low energies are considered ideal when the objective is getting higher resolution with less penetration, while higher energy levels are ideal when the goal is a high penetration. Overall, it was found that the best source is the type of Boomer, by presenting an optimal penetration and resolution, regardless of the background and content of mud found on the bed. Chirp sources can provide higher resolution but are constrained by seabed sediment type.

Introdução

São vários os tipos de fontes acústicas desenvolvidos para atuar na água e, como tal, sendo classificadas de acordo com McGee (1995) em dois tipos: ressonantes e impulsivas.

McGee (1995) considera como fontes ressonantes aquelas em que se produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitiva, e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas, ou cristais, piezoelétricas. Este tipo de fonte produz um pulso cuja forma é semelhante a uma senóide (Figura 3.10), de modo que a frequência desta está diretamente ligada à

frequência de ressonância dos cristais piezoelétricos. Estas fontes do tipo ressonantes utilizam comumente estreitos espectros de frequências, de baixa energia, e com limitações em relação ao comprimento dos pulsos emitidos. Assim, constituem sistemas com baixo poder de penetração em sedimentos arenosos (Souza, 2006).

As fontes acústicas impulsivas são aquelas que liberam grande quantidade de energia, num intervalo de tempo que idealmente é próximo de zero. Mosher & Simpkin (1999) fazem descrição análoga para fontes desta natureza, subdividindo este tipo de fonte em aceleração de massa, implosivas e explosivas, dos quais apenas a primeira será abordada neste trabalho.

O princípio deste tipo de fonte está relacionado com o deslocamento da massa d'água, quando a energia elétrica armazenada em um capacitor é descarregada sobre uma mola plana conectada a uma placa vibradora (Souza, 2006). Esta energia imposta ao sistema promove um deslocamento brusco desta placa, gerando uma onda de pressão e formando o sinal acústico (Ayres Neto, 2000).

Ao contrário das fontes do tipo CHIRP, com forma de onda controlada, estas fontes podem absorver até 1000 J de energia e, portanto, tornarem viável a emissão de sinais de um amplo espectro de frequências com alta potência, possibilitando a obtenção de excelentes registros sísmicos com grande penetração no substrato (Souza, 2006).

A propagação das ondas formadas por estas fontes se comportam da seguinte forma: um pulso sísmico se propaga em um material homogêneo, de forma que a energia original E transmitida pela fonte se distribui esfericamente, com um raio de expansão (Kearey *et al*, 2002). Além disso, se a quantidade de absorção por comprimento de onda for constante, as ondas com maiores frequências serão atenuadas mais rapidamente do que menores frequências em função do tempo ou distância, mudando a forma do pulso.

A proporção de energia transmitida e refletida é determinada pela impedância acústica (Z) na interface, a qual é definida pelo produto entre a velocidade do som (V) e a densidade (ρ) do meio de propagação das ondas (Kearey *et al*, 2002).

$$Z = \rho \cdot V$$

Ayres Neto (2000) afirma que a densidade do sedimento é função da mineralogia, porosidade e teor de água, e quanto maior a diferença, maior será a intensidade da energia refletida. Dessa forma, uma onda sonora incidente sobre um pacote sedimentar com maior

compactação, ou afloramentos rochosos, apresentará uma maior quantidade de energia refletida, enquanto que em sedimentos porosos e com água intersticial serão pouco refletivos.

A resolução consiste na capacidade de um método geofísico detectar dois refletores distintos na superfície (resolução horizontal), ou em subsuperfície, (resolução vertical) e está diretamente relacionada com o espectro de freqüências emitido pela fonte acústica: freqüências altas oferecem boa resolução; freqüências baixas, boa penetração, mas pobre resolução (Souza, 2006).

A resolução vertical é uma medida da capacidade de reconhecer refletores individuais, estreitamente espaçados em uma superfície, e é determinada pela duração do pulso na seção sísmica registrada.

A resolução vertical (de profundidade) de ondas sísmicas é dependente do comprimento de onda (λ) em diferentes meios, de modo que a resolução vertical aproximada pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\lambda = v \cdot f$$

Onde v é a velocidade de propagação da onda [ms^{-1}] dentro do material, e f é a freqüência [Hz] usada. A resolução vertical teórica é cerca de um quarto do comprimento de onda independente do meio de propagação (Sheriff e Geldart, 1995). Dessa forma, este parâmetro decresce com o aumento do comprimento de onda e, portanto, aumenta o tempo de reflexão, devido à maior absorção de energia de alta freqüência na Terra.

A resolução espacial, ou horizontal, refere-se à energia refletida que chega de uma zona circular denominada de zona de Fresnel sobre o refletor, de modo que o raio corresponde a um valor aproximado da resolução horizontal (Jones, 1999). Este raio r da primeira zona de Fresnel pode ser aproximado pela equação:

$$r = \left[\frac{v}{2} \left[\frac{t}{f} \right] \right]^{0.5}$$

Onde v é a velocidade de propagação da onda [ms^{-1}] ao longo do trajeto, t é o tempo TWT (s) para a forma da onda refletida de uma dada profundidade, e f é a freqüência [Hz] da onda. Da equação, pode-se observar que a resolução espacial diminui em função da profundidade (i.e. aumenta no tempo), mas é modificado pelas diferentes velocidades da onda nos diferentes meios (Schwamborn *et al*, 2002).

Com o aumento da profundidade, as freqüências mais baixas tendem a serem dominantes, devido aos efeitos da absorção. Essas freqüências menores são acompanhadas de um aumento da velocidade de intervalo, e ambos contribuem para um aumento no comprimento de onda. Por essas razões, a resolução horizontal, como a resolução vertical, reduz com o aumento da profundidade dos refletores (Kearey *et al*, 2002).

Metodologia

O levantamento sísmico foi realizado entre os dias 01 e 05 de março de 2010, sendo coletadas diversas linhas ao longo da Baía de Vitória e da Baía do Espírito Santo, ambas localizadas no município de Vitória - ES (Figura 1).



Figura 1: Localização das linhas de sondagem (cor vermelha) ao longo da Baía de Vitória e do Espírito Santo-ES. Fonte: Adaptado de Verenez Junior *et al*, 2009).

Para aquisição dos dados foram utilizadas duas fontes sísmicas diferentes: 1 Boomer (modelo AA301, da marca Applied Acoustics) e um Chirp (Modelo Stratabox, da marca Syqwest – 3,5 KHz). Para aquisição dos dados, foram utilizados dois softwares: Stratabox (Coleta de dados das fontes do tipo Chirp) e CODA (Coleta de dados das fontes do tipo Boomer).

Na interpretação, cada linha sísmica foi analisada, visando identificar o embasamento acústico ou a máxima penetração do sinal. Os pontos amostrados foram identificados quanto à posição geográfica e espessura do pacote sedimentar. Em seguida, as coordenadas identificadas foram lançadas em mapas faciológicos, de tipo de fundo e teor de lama, com o objetivo de encontrar alguma relação entre a penetração e as características geológicas do leito marinho. Essa relação foi plotada em gráficos de dispersão, visando verificar alguma tendência quanto ao tipo de sedimento e o teor de lama.

Para avaliar a influência das diferentes freqüências encontradas nas diferentes fontes sísmicas, foi realizada uma simulação utilizando o software Coda GeoSurvey, da CODA/OCTOPUS. Neste software, é possível processar um registro sísmico, alterando as freqüências desejadas para visualização. Dessa forma, uma linha coletada na Baía de Guanabara foi utilizada como base para o processamento, sendo realizados três ajustes de freqüência: 750 Hz à 2 KHz, 2 KHz à 4 KHz e 3KHz à 5 KHz. Em seguida, verificou-se sobre uma mesma seção qual foi a resolução obtida entre dois refletores.

Quanto aos efeitos da energia na resolução de um perfil sísmico, a cada linha adquirida na Baía de Guanabara, a energia de disparo era modificada, sendo utilizadas as

seguintes energias: 50J, 100J, 150J, 200J e 300J. Posteriormente, os perfis coletados foram analisados, a fim de detectar os refletores encontrados com maior resolução e buscar alguma relação com o aumento da energia.

Resultados

Os resultados apresentados com as fontes do tipo Chirp apresentam-se visualmente concordantes com o gráfico apresentado por Trabant (1984), no qual fontes deste tipo atingem menores profundidades (Figura 2). Entretanto, os valores obtidos pelo Chirp foram muito menores do que os apresentados no gráfico, fato possivelmente relacionado a diferentes marcas de Chirp aplicadas para realização dos experimentos. Os resultados apresentados pelas fontes do tipo Boomer também apresentaram uma correlação com os gráficos apresentados por Trabant (1984), apresentando uma escala de trabalho muito maior que fontes do tipo Chirp, tendo a capacidade de atingir grandes profundidades.

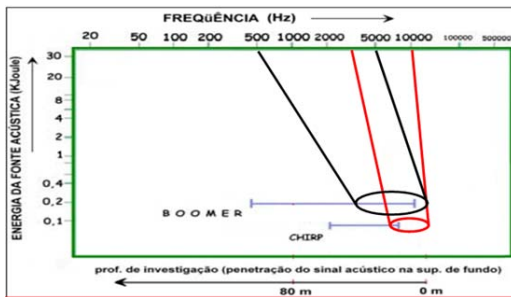


Figura 2: Ilustração relacionando o tipo de fontes sísmicas, espectro de frequências emitido, energia da fonte acústica e a profundidade de investigação. Modificado de Trabant (1984).

A penetração observada na Baía do Espírito Santo e na Baía de Vitória relacionada com o tipo de fundo apresentou uma tendência de aumento à medida que o sedimento se tornava lamoso. O fato de algumas áreas concentrarem sedimentos lamosos podem revelar uma tendência de deposição de sedimentos finos e lamosos, contribuindo para menores densidades, menor compactação e, conseqüentemente, maiores penetrações.

Quando à penetração foi relacionada com o teor de lama, as penetrações observadas na Baía do Espírito Santo não apresentaram uma correlação muito expressiva, mas houve uma leve tendência de aumento de acordo com o aumento do teor de lama. Entretanto, o padrão de penetração na Baía de Vitória foi inverso ao encontrado na baía do Espírito Santo, de forma que os maiores valores foram encontrados em menores teores de lama, apresentando um padrão decrescente de penetração conforme o aumento deste teor.

Estes resultados permitem afirmar que a penetração deste tipo de fonte está mais condicionada com as características faciológicas ao longo do perfil vertical em profundidade, do que a faciologia do leito desses

ambientes. Como a penetração é maior, menor a influência do sedimento superficial na penetração.

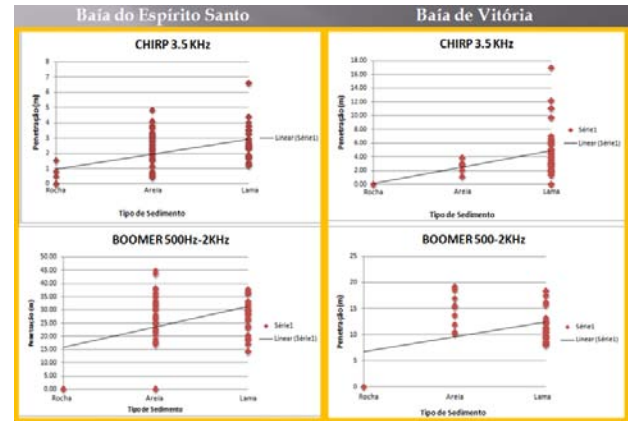


Figura 3: Gráficos relacionando a penetração com o tipo de sedimento na Baía do Espírito Santo e na Baía de Vitória-ES.

Os mapas contendo os teores de lama apresentados por Carmo (2010) e Veronez Junior (2010) também confirmam o fato das maiores penetrações estarem localizadas nos locais com maiores teores de lama. Tanto na Baía de Vitória quanto na Baía do Espírito Santo, os maiores valores foram encontrados nos locais com maiores teores de lama, atingindo 18 metros no primeiro local e 12 metros no segundo.

Quanto à profundidade de penetração, observou-se que os valores encontrados na Baía do Espírito Santo, em torno de 40 metros, foram muito superiores aos encontrados na Baía de Vitória, próximo de 20 metros. O fato da Baía da Vitória apresentar o embasamento cristalino mais raso reduziu a penetração do sinal em grandes profundidades, ao contrário da Baía do Espírito Santo que apresenta o embasamento mais profundo. Dessa forma, podemos afirmar que um fator limitante à penetração do sinal é a profundidade do embasamento.

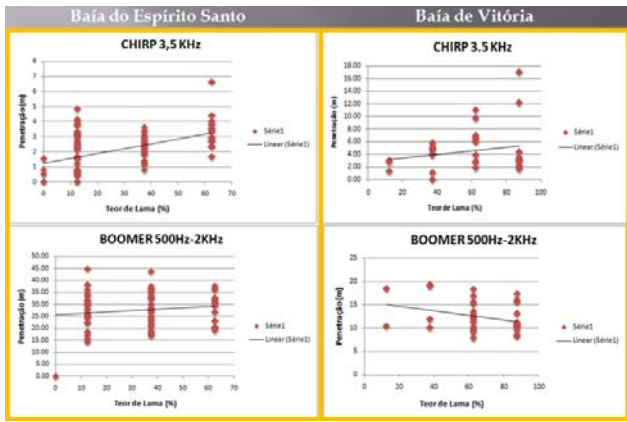


Figura 4: Gráficos relacionando a penetração com o teor de lama na Baía do Espírito Santo e na Baía de Vitória-ES.

A resposta quanto à frequência utilizada demonstrou uma diminuição da resolução na medida em que os espectros de frequência eram reduzidos. A análise das resoluções obtidas com espectros de frequência diferentes comprova a diminuição da resolução com a diminuição das frequências (Figuras 5).

Este resultado confirma a afirmação de Sheriff e Geldart, 1995, na qual a resolução teórica é cerca de um quarto do comprimento de onda independente do meio de propagação. Conseqüentemente, a resolução decresce com o aumento do comprimento de onda e, portanto, aumenta o tempo de reflexão, devido a maior absorção de energia de alta frequência na terra.

Outra observação realizada com a diminuição da frequência deve-se aos refletores próximos à superfície praticamente terem desaparecido, ao contrário dos refletores mais profundos, que podem ser observados em profundidades ainda maiores e com maior clareza. Os refletores que passaram a ser observados com maior nitidez em maiores profundidades podem ser explicados pela afirmação de Kearey *et al* (2002).

De acordo com Kearey *et al* (2002), o aumento da profundidade contribui para que as frequências mais baixas sejam dominantes, devido aos efeitos da absorção das maiores frequências próximo da superfície. Dessa forma, essas frequências principais mais baixas geram ondas com maior comprimento de onda e, conseqüentemente, uma menor resolução entre refletores. Além disso, como as frequências eram baixas, houve maior penetração, em detrimento da resolução superficial.

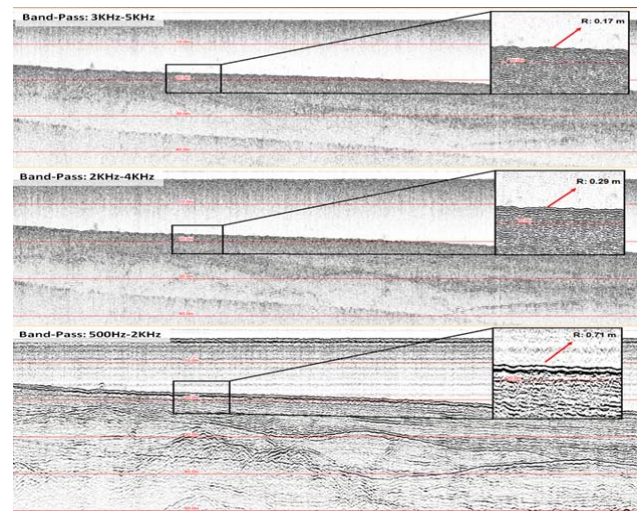


Figura 5: Combinação de perfis sísmicos idênticos, porém com bandas de frequências diferentes.

Os registros sísmicos adquiridos com diferentes energias de disparo apresentaram diferentes valores, de modo que o aumento da energia contribuiu para uma maior resolução (Tabela 1). Algumas faixas de energia, como 100 J e 200 J, evidenciaram valores de resolução inferiores à energia de 50 J e 150 J, respectivamente, mas pode-se afirmar que houve um padrão geral de aumento.

Tabela 1: Comparação entre a energia aplicada à fonte sonora e a resolução obtida.

ENERGIA (J)	FREQUÊNCIA (Hz)	RESOLUÇÃO (cm)
50	750 à 2000	29
100	750 à 2000	17
150	750 à 2000	35
200	750 à 2000	33
300	750 à 2000	41

A comparação entre a energia aplicada à fonte sonora e a resolução obtida apresentou diferentes valores, de modo que o aumento da energia contribuiu para uma menor resolução. Segundo Applied acoustics (2009), quanto maior a energia imposta, menor a amplitude do espectro de frequência e menores as frequências principais. Dessa forma, tem-se a explicação para o fato das menores resoluções terem sido encontradas utilizando 300 Joules, enquanto maiores resoluções foram encontradas aplicando 50 Joules à fonte sonora.

Isto também explica o fato de refletores terem sido encontrados em maiores profundidades utilizando menores frequências.

Os registros sísmicos revelaram um aumento na espessura dos refletores à medida que a energia aplicada ao sistema aumentava. Uma maior energia aplicada à fonte permite que uma maior energia atinja o fundo marinho e, conseqüentemente, uma maior reflexão entre os pacotes sedimentares. Desta forma, a amplitude do traço sísmico se torna maior, devido a esta maior reflexão.

Conclusões

A penetração de fontes do tipo Chirp está restrita a pequenas profundidades sendo, desta forma, condicionada ao tipo de sedimento e o teor de lama encontrado nas camadas superficiais do fundo. Dessa forma, observou-se que quanto menor a granulometria e maiores os teores de lama do fundo, maiores serão as profundidades de penetração no sedimento.

A penetração de fontes do tipo Boomer, atinge grandes profundidades, podendo ser condicionada pelo tipo de sedimento e teor de lama do fundo. Entretanto, a grande penetração contribui para que esta fonte seja também condicionada às características geológicas e geotécnicas do subfundo, como tipo de sedimento, profundidade do embasamento, grau de compactação, entre outros fatores.

A resolução está realmente ligada ao espectro de frequência utilizado, de modo que altas frequências contribuirão para maiores resoluções. Em contrapartida, baixas frequências fornecerão menores resoluções.

A resolução também pode ser afetada de acordo com o grau de energia imposto ao sistema. Quanto maior a energia, menores serão as frequências principais, contribuindo para menores resoluções.

Em investigações de ambientes lamosos ou com sedimentos mais finos, no qual pequenas penetrações atingem o objetivo do trabalho, a fonte mais adequada é a do tipo Chirp, por atingir uma profundidade suficiente para o trabalho e com alta resolução.

Investigações em ambientes arenosos e/ou cascalhosos requerem fontes do tipo Boomer, sendo mais adequadas por apresentarem grandes energias de disparo e baixas frequências de operação, podendo atingir valores próximos de 500 HZ, considerados muito baixos. Desta forma, o pulso sísmico consegue penetrar no sedimento, atingindo maiores profundidades do que fonte do tipo Chirp.

Uma investigação que necessite atingir grandes profundidades, independente do tipo de fundo (lamoso, arenoso, cascalhoso), deve utilizar como fonte do tipo Boomer, considerada mais adequada.

Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes instituições:

À empresa de Hidrografia UMI SAN – Serviços de Apoio à Navegação e Engenharia LTDA, pelo financiamento e concessão dos equipamentos, embarcações e funcionários para execução deste projeto.

Ao professor da UERJ, Tadeu dos Reis e ao professor do LAGEMAR, Cleverson Guizan Silva, pelas linhas sísmicas fornecidas da Baía de Guanabara e pelas dúvidas solucionadas.

À Universidade Federal do Espírito Santo e a ANP, pelo auxílio na execução deste projeto.

Referências

Anystey, N.A. 1977. Seismic Interpretation: The Physical Aspects. Springer, Boston. 625p.

Applied Acoustic Engineering Limited. 2009. Fundamentals of high resolution seismic surveying. Great Yarmouth, Norfolk, UK. Disponível em: <<http://www.applied-acoustics.com>>. Acesso: 07/jun/2010.

Ayres Neto, A. 2000. Uso da Sísmica de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina. Brazilian Journal of Geophysics. v. 18, n. 3, p. 241-256.

Do Carmo, D. A. 2009. Mapeamento Faciológico do Fundo Marinho como Ferramenta do Entendimento da Dinâmica Sedimentar da Baía do Espírito Santo, Vitória - ES. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha da UFF, Niterói, RJ, 134p.

Jones, E.J.W. 1999. Marine geophysics. Baffins Lane, Chichester, John Wiley & Sons Ltd. Inc. 466p.

Keary, P., Brooks, M., Hill, I. 2002. An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd ed. Blackwell Publications, Oxford. 262 pp.

McGee, T.M. 1995. High-resolution Marine Reflection Profiling for Engineering and Environmental Purposes. Part A: Acquiring analogue seismic signals. J. Appl. Geophys., 33(4): 271-285.

Mosher, D.C., Simpkin, P. 1999. Status and Trends of Marine High-resolution Seismic Reflection Profiling: data acquisition. Geosci. Can., 26:174-188.

Souza, L.A.P. 2006. Revisão Crítica da Aplicabilidade Dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo - SP, 311 pp.

Trabant, P.K. 1984. Applied High-resolution geophysical Methods. International Human

UMI SAN. 2008. Levantamento Sísmico no Porto de Tubarão – ES. Relatório Técnico nº 52 -2008. 28 p.

Veronez Junior, P., Bastos, A.C., Pizzin, B.F., Gava, R.D., Quaresma, V.S., Silva, C.G. 2009. Sonar de Varredura Lateral e Sísmica de Alta Resolução Aplicados no Estudo de Ecofácies na Baía de Vitória – ES. Revista Brasileira de Geofísica (Impresso), v. 27, p. 1-15.

Sheriff, R.E., Geldart, L.P. 1995. Exploration Seismology. Cambridge University Press, 592 p.

Schwamborn, G.J., Dix, J.K., Bull, J. M., Rachold, V. 2002. High-Resolution Seismic and Ground Penetrating Radar-Geophysical Profiling of a thermokarst Lake in the Western Lena Delta, Northern Siberia. Process 13: 259-269.