



Perfilagem sísmica em águas rasas: qual a melhor fonte acústica?

Luiz Antonio Pereira de Souza * Odilon Ferreira Miranda Filho **
Michel Michaelovitch de Mahiques ***

* Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT - Laps@ipt.br

** Georadar - Levantamentos Geofísicos S/A

*** Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo – IO-USP

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica
Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

A aplicação prioritária de métodos sísmicos na investigação rasa de ambientes submersos rasos constitui procedimento consolidado na literatura técnica nacional e internacional, a despeito das importantes informações advindas da aplicação de outros métodos geofísicos, como GPR, elétricos e eletromagnéticos e métodos potenciais, entre outros. Todavia ainda persistem procedimentos equivocados na comunidade técnica nacional, com relação à utilização de uma ou de outra fonte acústica, dentre as várias opções existentes. Assim, o objetivo deste artigo é contribuir para a discussão do potencial de algumas fontes acústicas na investigação de ambientes submersos rasos. Conclui-se que a resposta ideal será obtida quando do uso simultâneo de fontes acústicas multifrequenciais, garantindo-se desta forma, resolução e penetração, o que possibilita a geração de informações que em muito contribuem para projetos de engenharia (barragens, portos, dutos, pontes, túneis), de geologia básica, ou estudos de assoreamento de rios e reservatórios.

Introdução

A investigação de ambientes submersos rasos (rios, reservatórios, áreas costeiras e plataforma continental interna) tem despertado especial interesse neste momento em que o Brasil direciona grandes investimentos em obras de infra-estrutura. Expansão de dutovias (Souza et al., 2006), hidrovias, pontes, túneis e portos (Dias & Silva, 2003; Bianco et al., 2003; Bianco, 2004; Marrano et al., 2004; Souza 2006), exploração mineral (Dias et al., 1982; Dias, 2000; Ayres Neto, 2000), assoreamento de rios e reservatórios (Carvalho, 2008, Souza et al., 2004), mapeamento de áreas favoráveis à disposição de resíduos (Mansor, 1994) são alguns dos temas de extrema relevância atualmente (Souza, 2006, 2008).

Em qualquer desses projetos sempre se fará necessário o desenvolvimento de estudos geológicos e geotécnicos abrangentes para a melhor caracterização física e estrutural dos terrenos submersos. Sob este ponto de vista, é de amplo conhecimento que os métodos geofísicos têm muito a contribuir, principalmente por se

tratar de método de investigação não-invasivo ou não destrutivo (Jones, 1999; Souza, 1988, 2006, 2008; Souza et al., 1998).

Dentre os métodos geofísicos possíveis de serem utilizados na investigação de áreas submersas rasas, destacam-se, indubitavelmente, os sísmicos. Radar de penetração do solo (GPR), eletrorresistividade, magnetometria, entre outros, são métodos geofísicos também aplicáveis na investigação destes ambientes, todavia possuem restrições, principalmente sob o ponto de vista da obtenção de dados quantitativos.

Classificação dos métodos sísmicos

A investigação sísmica de áreas submersas rasas envolve equipamentos geofísicos e meios flutuantes de menor porte, pela própria natureza e dimensões das áreas investigadas, comumente com poucas dezenas de quilômetros quadrados e com espessura da coluna da ordem de poucas dezenas de metros.

As investigações destes ambientes têm como foco principal o fornecimento de suporte técnico a projetos de engenharia e/ou de geologia básica e podem ser subdivididas em dois grupos: investigação de superfície e de subsuperfície (Souza, 2006, 2008).

O primeiro diz respeito à caracterização geológica das superfícies submersas e envolve o mapeamento de afloramentos rochosos, feições sedimentares ou estruturais e até mesmo a localização de embarcações naufragadas, no caso de operações de busca e salvamento ou com finalidades arqueológicas.

A delimitação do traçado de dutovias, de hidrovias e de áreas favoráveis para instalação de bota-foras, são exemplos de projetos nos quais a prioridade de investigação é a caracterização de superfícies submersas. Nestes projetos, comumente não existe a necessidade da investigação de subsuperfície.

Com estes objetivos, são utilizadas fontes acústicas que emitem preferencialmente sinais com espectros de altas frequências, geralmente superiores a 30kHz. Ecobatimetria (simples, dupla ou multifeixe) e a sonografia de varredura lateral constituem os principais métodos sísmicos empregados.

O segundo grupo reúne um conjunto de métodos que tem por objetivo a investigação de subsuperfície fornecendo suporte a projetos em que informações sobre a espessura da coluna sedimentar ou a profundidade do embasamento rochoso são dados fundamentais.

A determinação da espessura das camadas sedimentares visando cálculos de cubagem de material para dragagem e da profundidade do embasamento rochoso, em projetos de pontes, túneis, dutos, portos e barragens, são alguns exemplos de estudos que exigem informações desta natureza. Nestes casos, dados que permitem apenas a classificação geológica da superfície de fundo não atendem às necessidades do projeto. No contexto destes objetivos se destacam os métodos sísmicos que utilizam fontes acústicas do tipo *boomers*, *sparkers*, *3,5kHz* e *chirps*, entre outras, que emitem sinais acústicos com espectros de frequências inferiores a 30kHz.

Como escolher a fonte acústica adequada ao objetivo do projeto?

Mesmo considerando o tradicional, excelente e consagrado desempenho dos métodos sísmicos na investigação de ambientes submersos, a opção pela utilização de uma ou outra fonte acústica dentre as várias possibilidades existentes, não constitui um procedimento trivial. Diferentes métodos sísmicos utilizam diferentes fontes acústicas, que por sua vez possuem características específicas e oferecem produtos finais distintos. Não são raros na literatura técnica exemplos de utilização de fontes acústicas em determinados projetos priorizando-se a disponibilidade da fonte, ao invés da sua real aplicabilidade para os objetivos do projeto. Destes casos decorrem prejuízos financeiros e técnicos aos empreendimentos, além de um prejuízo maior que é o conceitual, ao expor, negativamente, um determinado método geofísico, ao empregá-lo com objetivos para os quais não foi configurado.

As fontes acústicas possuem propriedades, tais como espectro de frequências e energia (potência), que as credenciam para serem aplicadas a objetivos distintos.

O gráfico da Fig. 1 exemplifica limites de penetração de uma fonte acústica do tipo 3,5kHz. Neste exemplo observa-se a drástica diminuição do desempenho desta fonte com o aumento da granulometria dos sedimentos de fundo, o que, em princípio, descredencia esta fonte acústica para a investigação de depósitos aluvionares, quando há expectativa de ocorrência de depósitos de areias grossas e cascalhos com espessura superior a 5-6m.

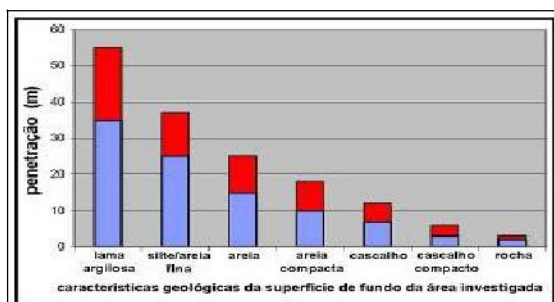


Fig. 1: Desempenho da fonte acústica modelo *GeoPulse Pinger* 3,5kHz, da *Geoacoustics*: penetração esperada (em azul) e a variabilidade possível (em vermelho) para a relação penetração do sinal acústico x tipo de fundo. Souza, 2006 - Modificado de: <http://www.geoacoustics.com>.

Por outro lado, fontes acústicas com estas características têm grande aplicação na investigação de ambientes submersos cobertos por sedimentos finos, tendo em vista o alto poder de resolução, o que permite inclusive a identificação da presença de interferências, tais como dutos enterrados e navios naufragados total ou parcialmente cobertos por sedimentos finos.

A Fig. 2 mostra registros obtidos com uso simultâneo de três fontes acústicas, onde se observa o melhor desempenho da fonte do tipo *chirp* (2-8kHz) no quesito resolução, já que no perfil obtido com esta fonte (B) identifica-se nitidamente dutos enterrados a pouca profundidade. O mesmo não ocorre com o perfil obtido com a fonte do tipo *boomer* (A), que mostra melhor desempenho na identificação da estratigrafia local (penetração), que na identificação dos dutos enterrados.

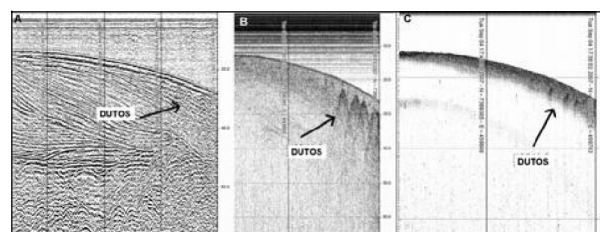


Fig. 2: Registros sísmicos obtidos no canal de São Sebastião (SP) com o uso simultâneo de três fontes distintas (A=*boomer* 0.5-2kHz, B=*chirp* 2-8kHz, C=*pinger* 24kHz). Fonte: Georadar.

A Fig. 3 ilustra um registro obtido com o emprego de fonte acústica do tipo *chirp*, mostrando a importância do uso desta fonte na identificação da espessura das camadas superficiais de sedimentos finos.

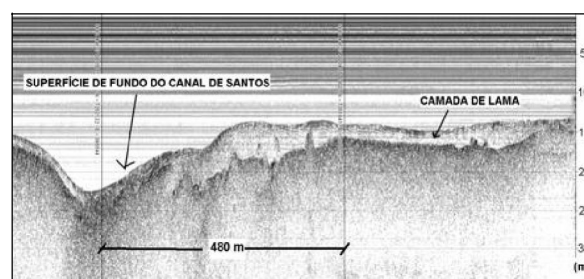


Fig. 3: Registro obtido no canal de Santos (SP) com emprego de perfilador sísmico de fonte acústica do tipo *chirp* (2-8kHz). Souza (2006, 2008).

De uma maneira geral pode-se afirmar que fontes acústicas de frequências superiores a 2kHz (*chirp* de baixa potência, 3,5, 7, 10, 15 e 24 kHz, entre outras) oferecem excelente resolução, entretanto, com prejuízo da penetração.

Ao contrário, fontes acústicas que emitem sinais de frequências inferiores a 2kHz oferecem melhor desempenho no item penetração e são, portanto, extremamente importantes para a investigação de depósitos sedimentares compostos de sedimentos arenosos (areias e cascalhos) comuns em aluviões de rios, não raramente com espessuras superiores a 8-10m. Fontes do tipo *boomers*, *sparkers* e *chirp* (de alta

potência) estão entre as mais indicadas para se atingir estes objetivos.

Um excelente exemplo de aplicação deste tipo de fonte acústica está ilustrado no registro sísmico na Fig. 4, que foi obtido no lago Guaraciaba, Santo André (SP), onde se observa uma camada de sedimentos com cerca de 25m de espessura depositada sobre a topografia irregular do embasamento local, assim configurada como resultado das atividades pretéritas de extração de areia.

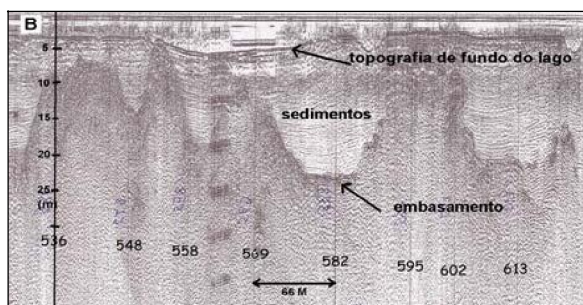


Fig. 4: Registro obtido por meio da perfilação sísmica contínua com fonte acústica do tipo *boomer* no Lago Guaraciaba, Santo André (SP). Modificado de Souza (2006) e IPT (2003).

Discussão e Conclusões

É comum em projetos de engenharia ou de geotecnia em áreas submersas rasas a necessidade de dados de toda ordem com referência aos materiais subjacentes. Nestes casos, a espessura da coluna sedimentar rasa (sedimentos finos), bem como a profundidade do embasamento rochoso e o imageamento das feições estruturais aflorantes na superfície de fundo constituem conjunto de dados fundamentais. Em projetos desta natureza, a solução ideal se obtém com a utilização de sistemas com capacidade de operar, simultaneamente, várias fontes sísmicas, inclusive o sonar de varredura lateral.

Embora não existam, por limitações físicas, fontes acústicas que emitam a partir de um único módulo, sinais acústicos de 500Hz a 30kHz, o que seria, teoricamente, o ideal, existem hoje no mercado internacional sistemas que permitem administrar a atuação simultânea de várias fontes acústicas, que ao fim, é a solução mais próxima da ideal, face às várias demandas envolvidas na investigação de áreas submersas rasas, de forma a garantir simultaneamente, resolução e penetração.

Um exemplo de utilização simultânea de três fontes acústicas está ilustrado na Fig. 5 que mostra nitidamente o produto diferenciado, sob ponto de vista da resolução e da penetração de cada uma das três fontes acústicas utilizadas (*pinger* 24kHz, *chirp* 2-8kHz e *boomer* 0,5-2kHz).

A Fig. 6 ilustra outro exemplo de excelente qualidade, de utilização simultânea de três fontes acústicas em levantamento geofísico no canal de São Sebastião, SP. Os dois exemplos ilustram claramente o desempenho diferenciado de cada uma das três fontes acústicas e a importância desta diferenciação no estudo de ambientes submersos rasos.

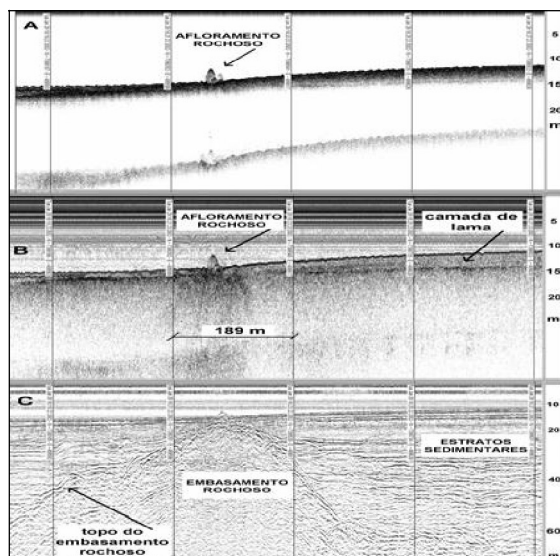


Fig. 5: Perfil sísmico executado com emprego simultâneo de três fontes acústicas (A) *pinger* (24kHz); (B) *chirp* (2-8kHz) e (C) *boomer* (0,5-2kHz). Nos perfis A e B evidencia-se, na superfície de fundo, uma anomalia topográfica que somente no perfil C, pode ser correlacionada à existência de um corpo rochoso em subsuperfície e de grande extensão, permitindo seu dimensionamento (Souza, 2006).

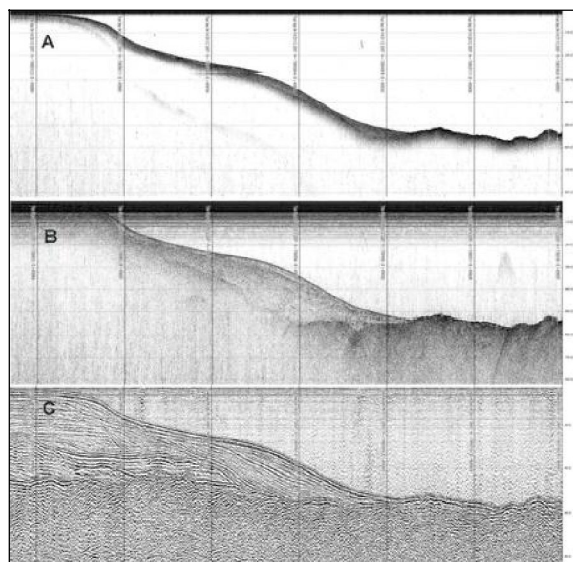


Fig. 6: Perfil sísmico executado com emprego simultâneo de três fontes acústicas (A) *pinger* (24kHz); (B) *chirp* (2-8kHz) e (C) *boomer* (0,5-2kHz). Observa-se nitidamente o desempenho diferenciado das fontes, com relação à penetração do sinal nos estratos sedimentares subjacentes, já que apenas no perfil obtido com o boomer, é possível delinear, com continuidade e extensão, o contorno do embasamento rochoso na área investigada. Fonte: Georadar.

A análise dos registros obtidos pelas três fontes acústicas nos exemplos ilustrados nas figuras 5 e 6 permite concluir sobre importância da utilização de fontes de alta energia do tipo *boomers*, para se garantir a identificação do topo do embasamento rochoso, que nestes exemplos,

não foi identificado pelas fontes acústicas que emitem frequências superiores a 2 kHz (*pinger* 24kHz e *chirp* 2-8kHz), nos trechos de maior espessura da coluna sedimentar.

Denota-se também, a partir das análises destes registros, a importância da utilização simultânea de diversas fontes acústicas, já que cada uma oferece soluções específicas para distintas questões.

A análise abordada neste artigo permite concluir que para um adequado desenvolvimento de estudos geológicos e/ou geotécnicos em áreas submersas rasas é fundamental proceder primeiramente a uma análise criteriosa dos objetivos do projeto. A melhor solução para o problema geológico-geotécnico será encontrada se estiver claramente estabelecido o objetivo do empreendimento, as profundidades a serem investigadas e qual o tipo de material a ser atravessado pelos sinais acústicos.

As respostas a estas questões vão indicar se a prioridade do projeto é a investigação da superfície (1) ou da subsuperfície (2), e neste segundo caso, se a prioridade é resolução (3) ou a penetração (4) ou até mesmo se ambas as informações são importantes.

Com esta abordagem o empreendedor poderá emitir uma licitação para serviços de levantamentos geofísicos que basicamente irão prever, para o caso (1), levantamentos ecobatimétricos e/ou sonográficos que envolvem a utilização de ecobatímetros de uma ou duas frequências, sistemas multifreixes e/ou sonar de varredura lateral. Neste caso o objetivo do projeto será caracterizar a morfologia da superfície de fundo, por meio da identificação de feições como afloramentos rochosos, estruturas sedimentares, feições estruturais, como falhas e lineamentos ou, até mesmo, a localização de embarcações naufragadas, dando suporte a operações de busca ou salvamento ou arqueologia subaquática.

Para o caso (2), os levantamentos geofísicos a serem solicitados serão aqueles relacionados à perfilagem sísmica contínua. Neste contexto, se a prioridade for resolução (3), o projeto necessitará de dados referentes à espessura de finas camadas (métricas a decimétricas) de sedimentos finos inconsolidados (lamas ou no máximo areias finas) e os levantamentos deverão ser executados com métodos sísmicos que utilizam fontes acústicas com sinais de frequências entre 2 e 30kHz (*SBP* 3,5kHz, 7kHz, 10kHz, 15kHz, *chirp* 2-8/2-10/4-12/4-16/9-21kHz, entre outros ou *pinger* 24kHz). Informações desta natureza estão comumente relacionadas a projetos de dragagem de manutenção em áreas portuárias, de hidrovias, de lagoas de decantação e a estudos de assoreamento de reservatórios, entre outros.

Se a prioridade é a penetração (4) dos estratos sedimentares arenosos, ou seja, se dados sobre a espessura da coluna sedimentar ou da profundidade do embasamento rochoso constituir informações fundamentais ao projeto, os levantamentos geofísicos a serem solicitados serão aqueles também relacionados à perfilagem sísmica contínua. Todavia, nestes casos, deverão ser empregadas fontes acústicas de alta potência e que emitem sinais com frequências abaixo de

2kHz. *Sparkers*, *boomers* e *chirps* de alta potência, estão entre as principais fontes acústicas utilizadas com estes objetivos, e que apresentam produto final análogos aos exemplos ilustrados nas Figs. 4, 5 e 6.

Finalmente, considerando-se que cada fonte acústica cumpre papel específico na investigação de áreas submersas, idealmente, melhores resultados sempre serão alcançados quando da utilização simultânea de um conjunto de fontes acústicas que completem o espectro de frequências desejável para estes objetivos, qual seja, entre 500Hz e 30kHz.

Um *pinger* de 15 ou 24kHz, um *chirp* (2-10kHz) e um *boomer* (500Hz-2kHz) ou um *sparker* (300Hz-1kHz), associados a um sonar de varredura lateral com frequência principal em torno de 100kHz, por exemplo, constituem excelente conjunto de fontes acústicas que certamente responderão de forma satisfatória as principais questões geológicas/geotécnicas envolvidas no contexto desta discussão.

É importante ratificar o conceito básico discutido neste artigo que é uso simultâneo de distintas fontes acústicas. O uso de uma ou de outra fonte acústica isoladamente, pode, em algumas situações, não oferecer o resultado desejado. A Fig. 7 ilustra um excelente exemplo da importância do uso simultâneo das três fontes acústicas. Neste exemplo observa-se que a pequena coluna sedimentar depositada sobre o embasamento rochoso é mais bem identificada no perfil obtido pelo *chirp*, ao contrário dos exemplos ilustrados nas figuras 5 e 6, que mostram melhor desempenho, sob esse ponto de vista, da fonte acústica *boomer*. Tal fato decorre justamente da natural perda de resolução da fonte acústica *boomer* quando da ocorrência de embasamento acústico muito próximo da superfície de fundo.

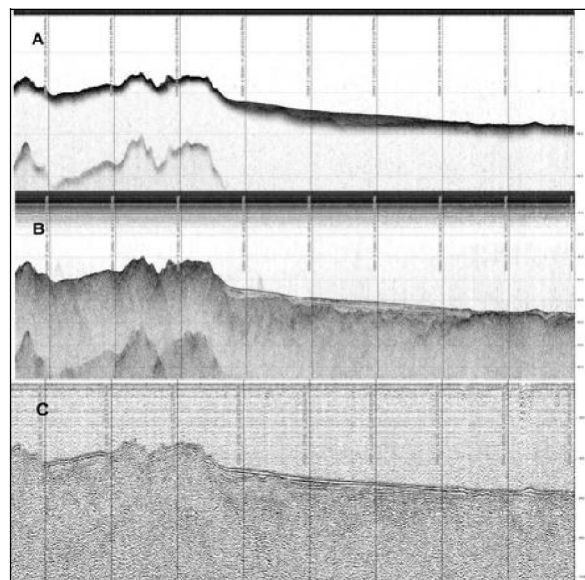


Fig. 7: Perfil sísmico executado com emprego simultâneo de três fontes acústicas (A) *pinger* (24kHz); (B) *chirp* (2-8kHz) e (C) *boomer* (0,5-2kHz). Fonte: Georadar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Georadar – Levantamentos Geofísicos S/A por ceder registros do canal de São Sebastião (SP) que ilustram resultados do emprego simultâneo de três fontes acústicas. Agradecem também a Otávio Coaracy Brasil Gandolfo e Ligia Ferrari Torella di Romagnano pela cuidadosa revisão no texto.

Referências

Ayres Neto, A. 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Rev. Bras. Geof.*, 18:241-255.

Bianco, R. 2004. Apoio à decisão em obras de implantação e ampliação da infraestrutura aquaviária. In: I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SP. Resumos Expandidos. CD-ROM

Bianco, R; Souza LAP & Cunha AGN. 2003. Sísmica rasa e sonar de varredura lateral aplicados a projetos de dragagem e derrocagem submarina. 8º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ. CD-ROM.

Carvalho, N. O. 2008. Hidrossedimentologia Prática.- 2a Edição – Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro, Interciência. 599p.

Dias, G.T.M. & Silva, C.G. 2003. Levantamentos geofísicos na rota submarina planejada para o Metrô Rio Niterói. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 8. Rio de Janeiro, RJ, 14 a 18 de setembro. Anais. CD-ROM.

Dias, G.T.M. 2000. Marine bioclats: calcareous algae. *Rev. Bras. Geof.*, 18(3):307-318.

Dias, G.T.M.; Gorini, M.A.; Gallea, C.G.; Espindola, C.R.S.; Mello, S.M.; Dellapiazza, H. & Castro, J.R.J.C. 1982. Bancos de arenito de praia (*beachrocks*) submersos na plataforma continental SE brasileira. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Salvador, BA, setembro de 1982. Anais, 4:1540-1546.

IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2003. Levantamento batimétrico no lago do parque Guaraciaba e caracterização geológico-geotécnica das encostas marginais – município de Santo André, SP. Relatório Técnico 66.080. 71p.

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

Mansor L.M. 1994. Disposição final de resíduos sólidos em áreas costeiras: avaliação geoambiental preliminar da planície costeira do RS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38. Balneário de Camboriú-SC. Boletim de Resumos Expandidos. p.27.

Marrano, A.; Souza, L.A.P. & Magalhães, F.S. 2004. Sonar de varredura lateral aplicado à implantação de rotas de navegação. In: I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SP. Resumos Expandidos. CD-ROM

Souza L.A.P.; Bianco, R; Tessler, MG & Gandolfo, O.C.B. 2007. Investigações geofísicas em áreas submersas rasas: qual o melhor método? In: 10º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ. Resumos Expandidos. CD-ROM.

Souza L.A.P.; Gandolfo O.C.B.; Cordeiro RP & Tessler MG. 2006. A investigação geofísica em projetos de dutovias. In: II

Simpósio Brasileiro de Geofísica, Natal-RN. Resumos Expandidos. CD-ROM.

Souza L.A.P. 1988. As técnicas geofísicas de Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e Sonografia aplicada ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém-PA. Anais, 4: 1551-1564. I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SP. Resumos Expandidos. CD-ROM

Souza LAP. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 311p.

Souza, L.A.P. 1988. As técnicas geofísicas de Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e Sonografia aplicada ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, PA, 6 a 13 de novembro de 1988. Anais, 4: 1551-1564.

Souza, L.A.P. 1998. Exemplos de utilização de métodos geofísicos na investigação de áreas submersas. In: Encontro Regional de Geotecnia e Meio Ambiente/Workshop de Geofísica Aplicada, 2. Rio Claro, SP, 19 a 20 de novembro de 1998. CD-ROM.

Souza, L.A.P. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 311p.

Souza, L.A.P. 2008. A investigação sísmica de áreas submersas rasas: Parte 1 – Fundamentos e Demandas. Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2. p.11-19.

Souza, L.A.P.; Marrano, A. & Iyomasa, W.S. 2004. Geofísica aplicada a estudos de lagos em áreas urbanas. I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SP. Resumos Expandidos. CD-ROM

Souza, L.A.P.; R.F. Silva & W.S. Iyomasa. 1998. Métodos de Investigação. In: Oliveira, A.M.S. & Brito S.M.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE. Cap. 11. Publicação IPT 2551.