

MÉTODOS GEOFÍSICOS EM GEOTECNIA E GEOLOGIA AMBIENTAL

LUIZ ANTONIO PEREIRA DE SOUZA*
OTÁVIO COARACY BRASIL GANDOLFO*

* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

RESUMO

Este trabalho faz uma abordagem dos principais métodos geofísicos sob o ponto de vista de sua aplicação em projetos de geotecnia e em estudos envolvendo questões ambientais. Discutem-se as limitações e as potencialidades de cada um dos métodos apresentados (sísmicos, elétricos, GPR, perfilagem de poços e potencial espontâneo) e as principais características dos equipamentos comumente empregados. São abordados também as técnicas e os procedimentos adotados

na aquisição e no processamento dos dados, bem como as variadas formas de apresentação dos resultados que garantam a plena compreensão dos produtos finais, em especial pelos profissionais não especialistas em geofísica. São apresentados estudos de casos que demonstram a importância da utilização de métodos geofísicos e da interpretação integrada com informações diretas (sondagens).

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a geofísica aplicada vem desempenhando um importante papel nos projetos de engenharia, prospecção de bens minerais e em estudos ambientais. Todavia, muito comumente, as empresas que gerenciam estes projetos desconhecem a diversidade de metodologias geofísicas disponíveis no mercado, bem como, o correto emprego e as limitações e potencialidades destas ferramentas de investigação.

Segundo Orellana (1972) geofísica é a “*ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização de materiais delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando, para esta finalidade, medidas tomadas na superfície da terra ou da água, no interior de furos de sondagens ou em levantamentos aéreos*”.

Por propriedades físicas dos materiais entende-se, velocidade de propagação de ondas elásticas, resistividade elétrica, densidade, potencial elétrico natural, cargabilidade, suscetibilidade magnética, entre outras. Ao detectarem os contrastes entre as propriedades físicas dos materiais que compõem a crosta terrestre, os métodos geofísicos possibilitam a avaliação qualitativa, e em muitos casos, quantitativa, da natureza dos

terrenos investigados. Dos parâmetros definidos, destacam-se: o grau de alteração, a presença de estruturas geológicas, a espessura dos estratos sedimentares, a identificação de contatos geológicos, dentre outros, características estas fundamentais para o desenvolvimento de qualquer projeto em geotecnia ou meio ambiente.

Entre alguns exemplos de projetos nos quais a geofísica pode efetivamente contribuir, podem ser citados: locação de poços para captação de água subterrânea, mapeamento de plumas de contaminação e do contato água doce-água salgada, identificação de zonas de fraturamento em maciços rochosos, determinação da profundidade do topo rochoso, mapeamento de utilidades (dutos, galerias, adutoras), identificação de vazamento em barragens, definição do volume de material para dragagem em regiões portuárias ou do volume do material assoreado em reservatórios ou em hidrovias.

São muitas as vantagens da utilização dos métodos geofísicos em projetos de geotecnia e meio ambiente, quando comparados aos clássicos métodos de investigação de subsuperfície. Uma das mais importantes é a própria natureza não-invasiva dos métodos geofísicos, característica

relevante nos dias atuais, já que questões relacionadas à preservação do meio ambiente investigado são prioritárias em qualquer projeto. Outra característica a ser destacada é a relativa rapidez com que são executados os ensaios de campo. Na investigação de áreas submersas este fator é ainda mais relevante, pois uma semana de execução de ensaios geofísicos significa a aquisição de dezenas de quilômetros de perfis, o que garante a cobertura de grandes áreas proporcionando uma excelente relação custo-benefício.

Outra vantagem dos métodos geofísicos é a amplitude da cobertura dos levantamentos, o que dá maior representatividade aos dados. Ao contrário dos métodos convencionais, como sondagens, trincheiras ou amostragens (que são pontuais), perfis ou linhas geofísicas cobrem grandes áreas e, portanto, geram informações que ampliam o conhecimento da área do projeto, tendo como consequência a minimização dos riscos inerentes e das ambiguidades dos modelos interpretativos gerados.

Todavia, ressalta-se que a utilização de métodos geofísicos não implica no abandono dos métodos convencionais de investigação. Dados diretos, oriundos de sondagens ou amostragens, serão sempre importantes para subsidiar o profissional na interpretação das informações geofísicas, com a finalidade de se estabelecer um modelo geológico para a área investigada. A utilização de métodos geofísicos num determinado projeto pode ainda orientar os procedimentos com relação às investigações diretas, minimizando a quantidade e otimizando a localização das mesmas.

Quanto às desvantagens da utilização dos métodos geofísicos, destacam-se os altos preços dos equipamentos, que são geralmente importados, implicando em investimentos iniciais de dezenas ou centenas de milhares de dólares. A necessidade de mão de obra especializada para aquisição de dados, bem como para a manutenção dos equipamentos, constituem-se fatores que também limitam a utilização ampla dos métodos geofísicos no Brasil. A crescente utilização de levantamentos em ambientes urbanos coloca os métodos geofísicos frente a novos desafios, tendo em vista a intensa presença de ruídos eletromagnéticos, tráfego intenso de veículos, presença de pavimentos e reduzido espaço para a aquisição dos dados.

Neste artigo optou-se por compartimentar a discussão sobre o desempenho dos métodos geofísicos aplicados em geotecnia e meio ambiente sob dois pontos de vista: investigação em áreas terrestres e em áreas submersas.

Na primeira abordagem, são tratados os métodos geofísicos aplicados na superfície terrestre (incluindo poços), que são os métodos sísmicos, a eletrorresistividade, o potencial espontâneo, o GPR, a perfilagem de poços e a magnetometria, com destaque para os dois primeiros. Os conceitos básicos relacionados à geofísica aplicada, bem como as principais aplicações, estão amplamente discutidos em Griffiths & King, 1983; Dobecki & Romig, 1985; Telford et al., 1990; Parasnis, 1997; Reynolds, 1997; Souza et al., 1998; Milson, 2003; Duarte, 2010; Kearey & Brooks, 2009.

A segunda abordagem deste artigo foca na investigação de ambientes submersos rasos (rios, reservatórios, lagos e plataforma continental interna) que são ambientes que tem despertado especial interesse da sociedade, no Brasil e no mundo, nestes últimos anos. Os principais métodos geofísicos utilizados na investigação destes ambientes são os métodos acústicos, que englobam a batimetria, a sonografia e a perfilagem sísmica contínua. Outros métodos geofísicos (elétricos e eletromagnéticos) podem também ser aplicados, porém com restrições.

2 INVESTIGAÇÃO DE AMBIENTES TERRESTRES

Um dos métodos mais clássicos utilizados na investigação do ambiente terrestre é a sísmica. Este método geofísico lida com a propagação das ondas elásticas nos materiais geológicos, característica que tem correlação direta com algumas propriedades físicas dos materiais, tais como, grau de consolidação/cimentação, alteração, compactação, saturação do maciço, entre outros. Desta forma, a sísmica produz informações que podem ser integradas com dados de sondagens mecânicas (percussão, rotativa, trado, ensaio CPT, etc.) contribuindo efetivamente para a caracterização geológica e geotécnica dos terrenos.

Dentre os métodos sísmicos, destaca-se a sísmica de refração (Lankston, 1990), que vem sendo amplamente empregada há alguns anos na geologia de engenharia e é indicada para a

determinação da profundidade do topo rochoso e da espessura da cobertura do capeamento (rocha alterada ou solo). Por se tratar de um método que determina, com relativa precisão, as velocidades de propagação das ondas sísmicas nos materiais, tem efetiva aplicação no estudo da escarificabilidade de maciços e na avaliação da qualidade de maciços rochosos (Sjogren et al., 1979). A sísmica de refração, portanto, tem ampla aplicação em estudos preliminares de implantação de grandes obras civis, como barragens e túneis.

Os métodos sísmicos comumente utilizam a onda P (compressional, longitudinal ou primária) que pode ser facilmente gerada e identificada em um sismograma. Entretanto, observa-se uma tendência crescente no emprego da onda S (cisalhante, transversal ou secundária) em geotecnia, particularmente para a engenharia de fundações, tendo em vista que a velocidade de propagação da onda S, ao contrário da onda P, não é influenciada pela presença de água no maciço. A onda cisalhante (onda S) se propaga apenas pela porção sólida do solo e pode, a priori, identificar mudanças litológicas de maneira mais eficaz do que a onda P. Daí a importância de sua utilização.

O conhecimento dos valores de velocidades da onda P (V_p) e da onda S (V_s), juntamente com a densidade dos materiais, permite a determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos dos maciços: módulo de Young, coeficiente de Poisson e módulo de rigidez ou cisalhamento (Dourado, 1984). O conhecimento destes parâmetros é importante para a previsão do comportamento tensão-deformação

de solos sob solitação dinâmica de baixas amplitudes, sobre os quais serão implantadas estruturas que causem algum tipo de vibração (instalação de máquinas ou motores vibratórios, aerogeradores de energia eólica, etc.). São diversos os ensaios sísmicos dos quais podem ser obtidas V_p e V_s .

Quando estão disponíveis furos de sondagens, as velocidades poderão ser obtidas por meio dos ensaios *crosshole*, *downhole* ou *uphole*, técnicas cuja principal desvantagem está justamente na necessidade de furos, atividade comumente dispendiosa. Embora sejam mais caros, estes ensaios fornecem os resultados mais precisos e com maior resolução na determinação de V_p e V_s em profundidade, se comparados com aos ensaios realizados na superfície (refração, reflexão).

Dentre os ensaios em furos, destaca-se o consagrado *crosshole* (Prado, 1994) que deve ser realizado segundo a norma técnica ASTM 4428/4428M (2007). A limitação deste ensaio está relacionada ao pequeno volume de maciço amostrado, devido à pequena distância requerida entre os furos para a sua realização (dois ou três furos espaçados de três metros para solo; e em torno de cinco metros para rocha). Neste tipo de ensaio, os furos devem ser especialmente preparados (revestidos com PVC, preferencialmente de parede grossa, espaço anelar preenchido e garantia da verticalidade dos furos). Os resultados deste ensaio podem ser diretamente correlacionados com as descrições das sondagens que originaram os furos, determinando de forma precisa a velocidade das ondas sísmicas (P e S) nos diversos estratos encontrados (Figura 1).

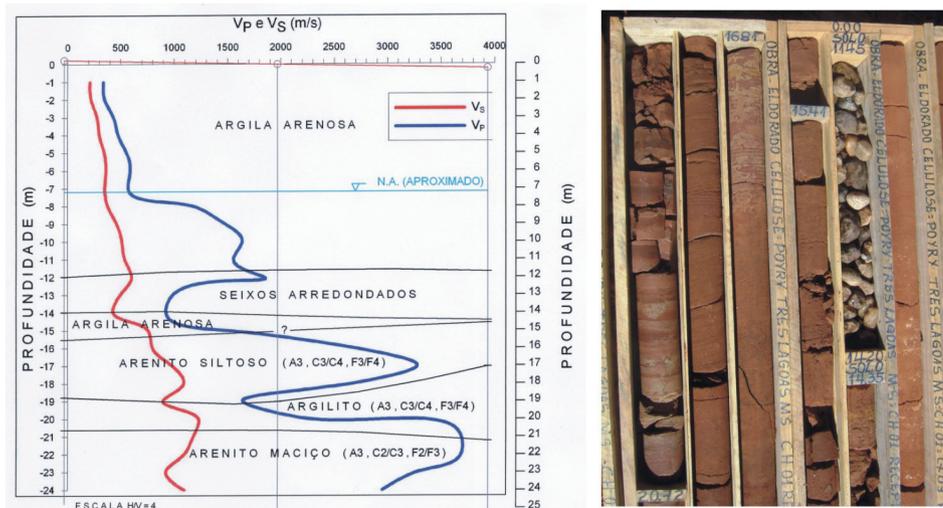


Figura 1 – Resultados de um ensaio *crosshole* correlacionado com informações de sondagem em uma área de arenitos (IPT, 2010).

Em locais onde há a disponibilidade de apenas um furo, podem ser realizados ensaios do tipo *downhole* (fonte na superfície e geofones no furo) ou *uphole* (fonte no furo e geofones na superfície). Em termos práticos, o *downhole* (ASTM-D7400, 2008) é o mais utilizado, pela maior facilidade da geração de energia sísmica na superfície do que no interior do furo. Podem ser realizados utilizando-se tanto a onda P como a onda S.

Na ausência de furos de sondagens, uma alternativa para a determinação de V_p e V_s é a realização de ensaios sísmicos em superfície (refração, ensaios com ondas superficiais). Por apresentarem custo operacional menor que os ensaios em furos, podem gerar produtos com uma relação custo-benefício compatível com as necessidades do projeto (Gandolfo, 2011). A refração sísmica, classicamente utilizada para determinação de V_p , pode também ser utilizada para determinação de V_s , tendo com limitação a dificuldade da geração da onda S em superfície (o que não ocorre com a onda P, de fácil geração e identificação nos clássicos registros sísmicos de refração). As fontes de onda S, em geral, possuem energia menor que as fontes de onda P, o que torna difícil a identificação do tempo de chegada da onda S a partir de grandes distâncias entre fonte e receptores (geofones).

Outros ensaios de superfície que permitem a obtenção de V_s são aqueles que utilizam as ondas superficiais. São largamente utilizados em investigações geotécnicas em outros países e, atualmente, vem ganhando mais espaço no Brasil, devido às facilidades operacionais na execução

dos ensaios e sua enorme potencialidade em diversas aplicações. Uma das técnicas precursoras denominava-se SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). Este método analisa a propagação das ondas superficiais (onda Rayleigh, particularmente) captadas por apenas dois geofones. O resultado deste ensaio é um perfil da variação de V_s com a profundidade, obtido por meio de procedimentos matemáticos.

Atualmente o SASW não é muito utilizado e foi substituído pelo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) que tem a vantagem de utilizar múltiplos geofones. A realização do ensaio MASW (Park et al, 1999; Xia et al., 1999) é muito similar ao ensaio de sísmica de refração. No processamento utilizam-se técnicas de inversão dos dados que resultam em informações pontuais da variação de V_s com a profundidade em um perfil 1D (a partir da análise das ondas Rayleigh). Diversos ensaios realizados ao longo de uma linha podem gerar uma seção com a distribuição espacial de V_s (2D), informação de grande importância para a área de geotecnia e engenharia de fundações (Figura 2).

Em complementação aos métodos que utilizam fontes sísmicas ativas (marreta, queda de peso etc.) existe também a possibilidade do emprego das ondas superficiais geradas pelo ruído ambiental (tráfego de veículos, por exemplo), o que torna o método bastante interessante, pois possibilita atingir maiores profundidades de investigação. São conhecidos como métodos passivos (Park et al., 2005).

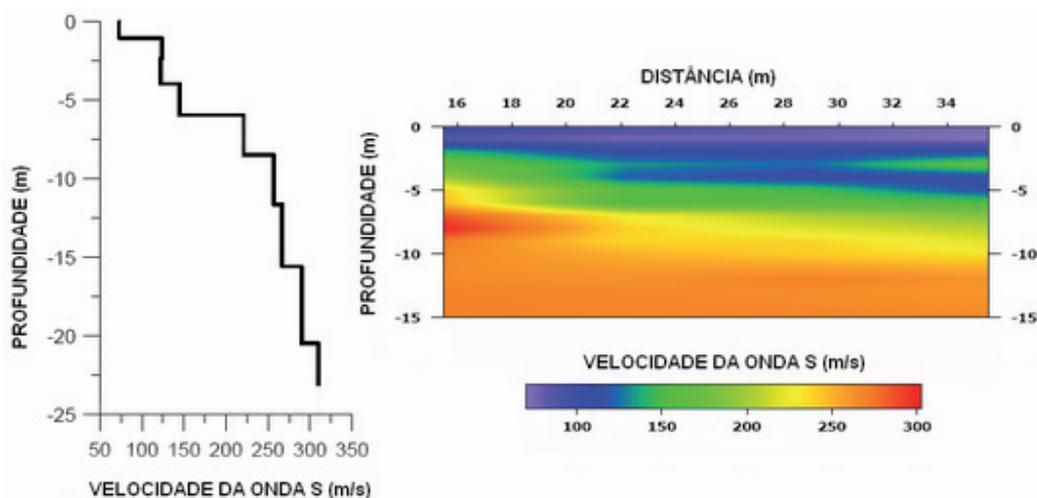


Figura 2 - Resultados de um ensaio MASW, mostrando a variação de V_s com a profundidade em um perfil 1D (esquerda) e seção 2D (direita). Modificado de <http://www.geotomographie.de>

Embora os métodos que utilizam ondas superficiais sejam de simples execução e possuam grande potencial de emprego na engenharia geotécnica, ainda demandam estudos mais aprofundados devido à ambiguidade presente na interpretação dos dados. Produtos mais confiáveis de um levantamento de MASW podem ser obtidos quando seus resultados são calibrados com ensaios em furo(s) de sondagem (*crosshole* ou *downhole*) que são aqueles que fornecem as informações mais precisas do perfil de velocidade com a profundidade, conforme já explicitado anteriormente.

Por fim, vale destacar o uso da sísmica de reflexão rasa (ou de alta resolução) que é uma técnica que evoluiu muito nos últimos anos (Steeple & Miller, 1990). A disponibilidade atual de sísmógrafos cada vez mais portáteis e com elevado número de canais possibilita a realização de ensaios de boa qualidade e a custos mais reduzidos, tornando este método uma excelente ferramenta de investigação em ambientes urbanos. A sísmica de reflexão alcança maiores profundidades de investigação do que a sísmica de refração. Atualmente, vêm sendo realizados estudos que, além da onda P, utilizam a onda S (Bokhonok, 2011). Profundidade do embasamento rochoso e a detecção da presença de matacões (Taioli et al., 1993) estão entre os principais produtos da aplicação deste método geofísico.

Embora os produtos oriundos dos métodos sísmicos tenham alta relevância na investigação geológico-geotécnica dos terrenos emersos, cumpre destacar-se o papel, não menos importante, dos métodos elétricos. Destaca-se entre eles, a eletrorresistividade, em especial a técnica do caminhamento elétrico, que encontra grande aplicação, pois investiga um parâmetro (resistividade elétrica) que responde diretamente à presença de água nos maciços rochosos e terrosos (Ward, 1990). A eletrorresistividade pode alcançar grandes profundidades de investigação, dependendo do espaçamento utilizado entre os eletrodos e da potência do equipamento de medida. Enquanto a sísmica de refração limita-se à determinação da profundidade do topo rochoso, a eletrorresistividade é capaz de identificar anomalias relacionadas a zonas e/ou estruturas de maior ou menor permeabilidade no interior do maciço. A eletrorresistividade é um método que encontra aplicação no

estudo do traçado de túneis (Danielsen & Dahlin, 2009), na identificação de matacões (Taioli et al., 2009) e no mapeamento de zonas anômalas em terrenos cársticos (Kruse et al., 2006). Neste último caso, a interpretação dos dados deve ser feita de forma muito criteriosa, com amplo controle das condições hidrogeológicas e estruturais, uma vez que os alvos podem apresentar tanto anomalias condutivas como resistivas. Em estudos de escorregamentos, a eletrorresistividade pode ser aplicada juntamente com o método sísmico (Caris & Van Asch, 1991; Israil & Pachauri, 2003). O método também encontra grande aplicação em estudos ambientais (caracterização hidrogeológica, identificação e mapeamento de anomalias relacionadas à presença de plumas de contaminantes, etc.).

Com relação à identificação de cavidades, além dos métodos elétricos, podem também ser aplicados, preferencialmente de forma conjunta, o método da micro-gravimetria (Baradello et al., 2001; Debeglia et al., 2006), que permite a identificação das pequenas anomalias gravimétricas oriundas dos vazios e cavidades em subsuperfície. A aplicação deste método exige cuidados especiais no processo de aquisição e processamento dos dados, tendo em vista a reduzida amplitude das anomalias geradas pelos alvos.

Na eletrorresistividade, além da clássica técnica do caminhamento elétrico, existe também a sondagem elétrica vertical (SEV), que se constitui numa técnica que pode também ser aplicada em questões geotécnicas e ambientais, preferencialmente em terrenos com homogeneidade lateral, com camadas aproximadamente plano-paralelas. Estudos estratigráficos em bacias sedimentares são bons exemplos de ambientes nos quais esta técnica geofísica tem sido aplicada com sucesso.

Atualmente existem equipamentos denominados de multi-eletrodos que realizam aquisição de dados de maneira automatizada. Possuem a vantagem de realizar um enorme número de medidas em reduzido intervalo de tempo e com a capacidade de empregar diversos tipos de arranjos em uma mesma linha de investigação, produzindo uma grande amostragem espacial e de alta resolução. Entretanto, alguns cabos destes equipamentos não permitem a utilização de grande espaçamento entre eletrodos, o que acarreta menor profundidade de investigação, o que pode

não contemplar os objetivos de um determinado projeto (Gandolfo, 2007). A escolha do arranjo a ser utilizado depende do tipo de alvo, geometria e profundidade em que o mesmo se encontra.

Outro aspecto importante a ser destacado nos métodos elétricos é a atual disponibilidade de técnicas modernas de processamento dos dados, o que possibilita a construção de modelos geoeletricos correlacionáveis de forma mais confiável com o

modelo geológico-geotécnico do local investigado, em termos da geometria e profundidade dos alvos.

A análise integrada de dados de eletrorresistividade (caminhamento elétrico) e dados sísmicos (refração) conduzem comumente a uma interpretação mais confiável, encorajando o emprego conjunto destes dois métodos de investigação geofísica (Figura 3).

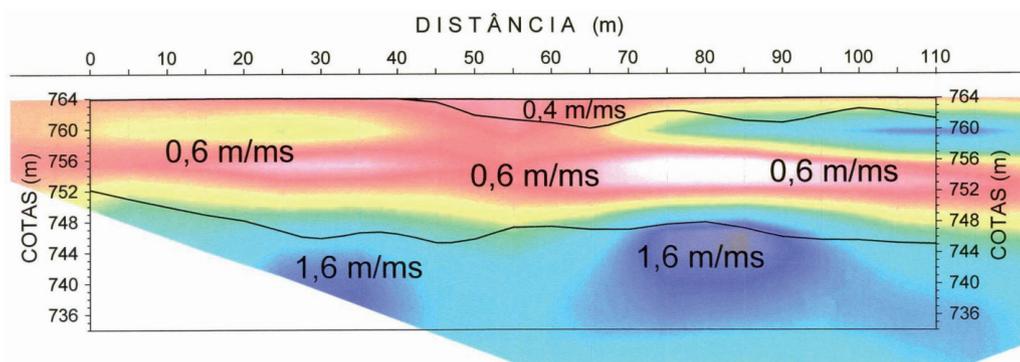


Figura 3 — Seção sísmica interpretada, sobreposta a uma seção geoeletrica, obtida em um aterro de inertes. O aterro, parte superior, apresenta altas resistividades elétricas (tonalidades amarelas e vermelhas) e velocidades sísmicas baixas; na base deste, encontra-se o solo natural, possivelmente saturado, com resistividades elétricas baixas (tonalidades azuladas) e velocidade sísmica igual a 1,6 m/ms). (IPT, 2011).

Uma alternativa ao método da eletroresistividade é o método eletromagnético (EM) que investiga o mesmo parâmetro físico (condutividade elétrica/resistividade elétrica). Encontra aplicações em estudos ambientais (mapeamento de plumas de contaminação) e de forma mais restrita, em geotecnia. Trata-se de um método indutivo, cuja interpretação dos dados não é trivial, além de ser mais suscetível a ruídos eletromagnéticos, comumente presentes em áreas urbanas. Desta forma, a eletrorresistividade, que utiliza contato galvânico (não indutivo) entre eletrodos e o solo, permite aquisição de dados com melhor razão sinal/ruído, constituindo-se, portanto, no método geofísico recomendado para investigação de ambientes urbanos.

Outro método elétrico que tem aplicação especial, principalmente em questões hidrogeológicas e ambientais, é o método do potencial espontâneo (SP, do inglês "Self Potential"). Trata-se de método geofísico de simples aplicação no que se refere aos equipamentos utilizados e aos procedimentos de aquisição de dados (Gallas, 2005). O SP utiliza apenas um multímetro com

alta impedância de entrada, fios de ligação e eletrodos especiais. O método SP mede as voltagens elétricas naturais existentes no terreno (da ordem de mV). O levantamento é realizado por meio de perfis distribuídos numa grade, de modo a compor uma malha de investigação sobre a área de interesse. Os mapas gerados permitem a interpretação de direções preferenciais de fluxos de fluidos subterrâneos.

O SP é um método onde a quantificação dos dados não é trivial. Entretanto, interpretações qualitativas, com base nos mapas confeccionados, podem fornecer excelentes resultados.

Por ser um método de fácil aplicação e de custo reduzido deve, sempre que possível, ser utilizado em conjunto com outros métodos geofísicos (por exemplo, a eletrorresistividade) desde que as condições locais assim permitam e seus resultados contribuam para os objetivos do projeto.

Encontra grande aplicação nos estudos de fluxos de água subterrânea, seja para uma caracterização hidrogeológica (determinação de direções de fluxos preferenciais e de divisores de água subterrânea) ou em estudos de fugas d'água em

barragens. Pode também ser utilizado para identificação de anomalias relacionadas à presença de contaminantes em subsuperfície.

O último método a ser destacado na investigação de superfícies terrestres é o GPR (Ground Penetrating Radar). Trata-se de um método geofísico de alta resolução, pois opera com altas frequências, na faixa de MHz (Davis & Annan, 1989). Esta característica, aliada à natureza elétrica geralmente condutiva dos terrenos, faz com que na maioria das vezes, não sejam alcançadas as profundidades de investigação almejadas pelo projeto. Tal fato torna limitada a aplicação do GPR quando da necessidade de determinação do topo do embasamento rochoso, principalmente se considerarmos

a frequente ocorrência de espesso capeamento intempérico em muitas regiões do país. Relembra-se que as ondas eletromagnéticas são fortemente atenuadas em locais eletricamente condutivos, como por exemplo, solos silto-argilosos úmidos/saturados. Por outro lado, em terrenos eletricamente resistivos (por exemplo, solos arenosos secos), maiores profundidades podem ser alcançadas. Desta forma, o conhecimento prévio das características elétricas da área de interesse pode ser um indicativo do sucesso ou não da aplicação do método GPR. A Figura 4 apresenta um exemplo de seção de excelente qualidade obtido por meio do GPR aplicado em ambiente favorável.

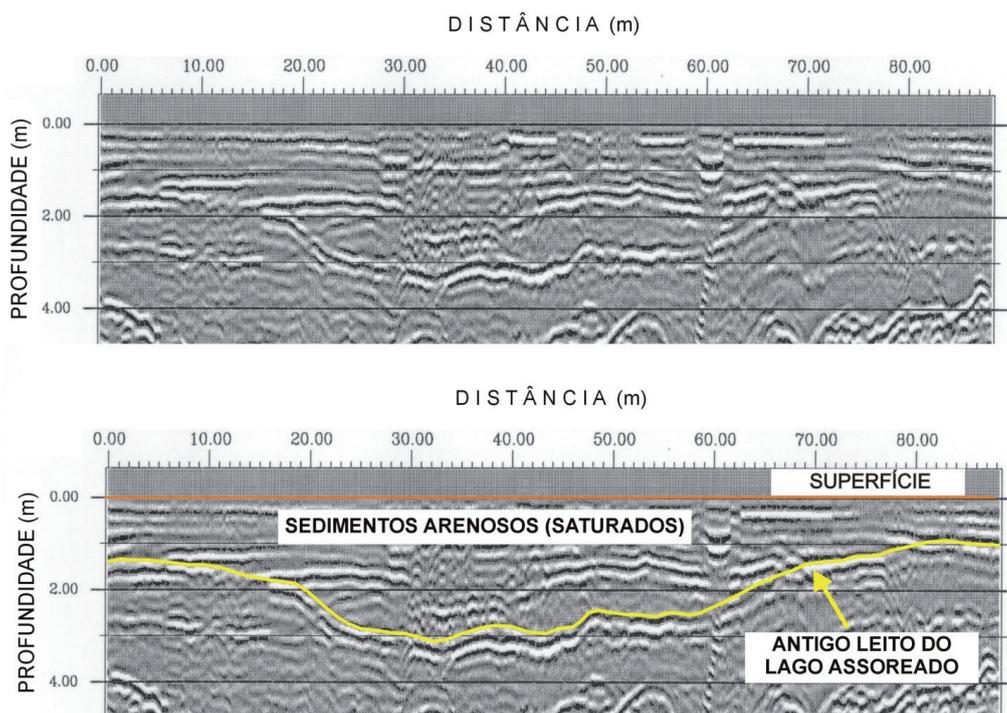


Figura 4 – Seção GPR obtida em um estudo de assoreamento (acima). Na seção interpretada (abaixo), o refletor assinalado em amarelo corresponde ao fundo da lagoa, preenchida por sedimentos arenosos (IPT, 2006).

O GPR apresenta bons resultados no mapeamento e identificação de dutos, galerias e interferências em geral, que comumente se encontram a pequenas profundidades. Neste tipo de aplicação, costuma-se utilizar antenas de frequências maiores ou iguais a 200 MHz, o que, na prática, permite profundidade de investigação raramente superior a 4 metros. Recomenda-se ainda, para estas aplicações a utilização complementar de outras técnicas como as do tipo “piper locators”.

Outra aplicação onde o GPR apresenta um bom desempenho é na inspeção de estruturas de concreto em obras civis e na investigação de pavimentos. Neste caso, são utilizadas antenas com frequências da ordem de GHz (1000 MHz).

Uma das vantagens da utilização do método GPR está na praticidade operacional, já que se trata de ferramenta geofísica leve e de rápida evolução nas operações de campo. Em algumas situações as antenas podem até mesmo estar acopladas

a veículos, o que possibilita a aquisição de grande quantidade de dados cobrindo-se uma grande área num curto intervalo de tempo.

Finalmente, cumpre destacar o importante papel desempenhado pela perfilagem geofísica de poços, que constitui um conjunto de distintas ferramentas que medem diferentes propriedades físicas do meio ao longo de um furo de sondagem. Nesta discussão destacam-se duas ferramentas de imageamento: *borehole televiewer* - BHTV (acústica) e *optical televiewer* - OPTV (ótica). Ambas as ferramentas fornecem uma imagem de alta resolução das paredes do furo e devem ser aplicadas quando se faz necessária a caracterização detalhada de fraturas, mergulhos estratigráficos e estruturais do maciço rochoso. Estas ferramentas permitem a obtenção de medidas precisas das orientações espaciais, das profundidades e das características das feições imageadas. Um sistema constituído por um acelerômetro e um magnetômetro triaxial, permite a correta orientação da imagem (Figura 5).

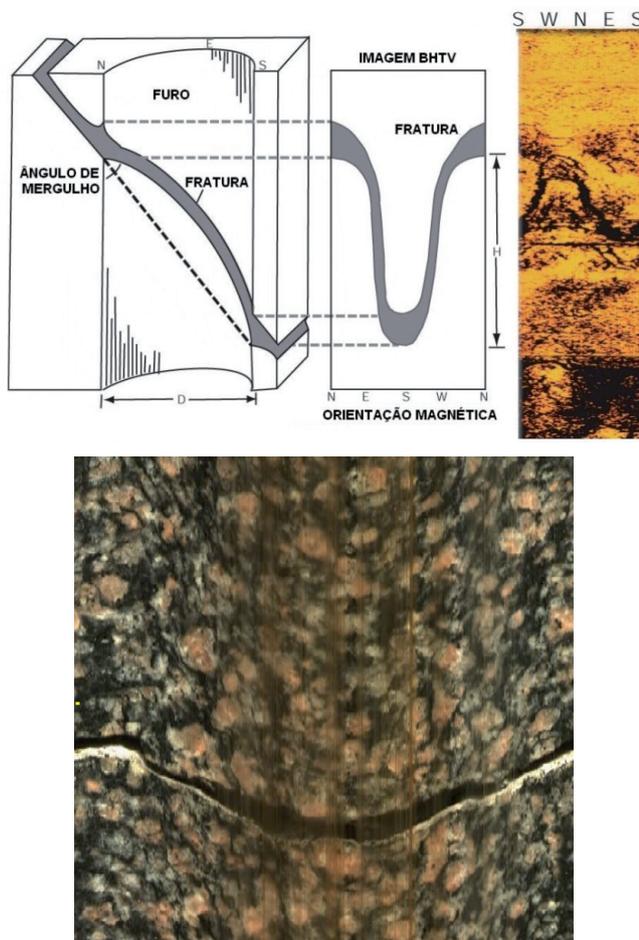


Figura 5 - Imagem da parede de um poço, obtidas por perfilagem BHTV (acima) e OPTV (abaixo).

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA DE AMBIENTES SUBMERSOS RASOS

A investigação de terrenos submersos visando a construção de portos, barragens, marinas, hidrovias, pesquisa mineral ou implantação de dutos, cabos e emissários submarinos, têm requerido mais informações de subsuperfície do que aquelas geradas pelos métodos convencionais de investigação (sondagens, testemunhagens ou amostragens).

As áreas costeiras, em especial, constituem ambientes altamente complexos, pois representam fisicamente uma interface tripla: atmosfera, continente e oceano. Geologicamente, o substrato que compõe este ambiente originou-se a partir das oscilações do nível do mar no Quaternário. A interação dos processos naturais atuantes nestas áreas com aqueles resultantes do expressivo incremento da ocupação humana leva a transformações na paisagem costeira, muitas vezes indesejáveis e que acabam por exigir, da sociedade, intervenções (muros, molhes, quebra-mares, guia-correntes, regeneração de praias erodidas etc.). Quando não executadas com bases sólidas de conhecimento geológico ou geotécnico, essas intervenções contribuem para o aumento dos riscos de degradação destes ambientes, além de causarem prejuízos incomensuráveis à sociedade. (Trainini, 1994; Mansor, 1994; Morais et al., 1996; Castilhos & Gré, 1996; Tessler & Mahiques, 1996; Pereira et al., 1996; López & Marcomini, 1996; Neumann et al., 1996; Lima et al., 2002; Maia et al., 2002 e Abreu et al., 2005).

No caso das áreas submersas interiores, como rios, lagos naturais ou artificiais, vários são os aspectos que despertam o interesse da sociedade nos dias atuais, a se destacar água e energia (Klessig, 2001). Ainda neste contexto, cumpre salientar o gargalo tecnológico existente na questão hidrovivária, que prejudica, por exemplo, o escoamento da safra agrícola oriunda do centro oeste brasileiro.

Os levantamentos geofísicos têm muito a contribuir na busca de soluções para as demandas descritas, em especial por se tratarem de métodos de investigação não-invasivos, já que as informações são obtidas a partir da superfície d'água, sem a necessidade da penetração física no meio investigado.

São vários os exemplos na literatura que ilustram as diversas vantagens de utilização de métodos geofísicos na investigação de áreas submersas.

Souza (1988) e Tóth et al. (1997) apresentam vários exemplos que ratificam a excelente relação custo-benefício quando da aplicação desses métodos.

Na investigação geofísica de ambientes submersos rasos destacam-se os métodos sísmicos ou acústicos, que englobam a batimetria, a sonografia e a perfilagem sísmica contínua (Souza, 2006). A magnetometria e os métodos geoeletricos também contribuem na investigação de ambientes submersos, porém, sob o ponto de vista mais qualitativo que quantitativo (Souza et al., 2007).

COMPARTIMENTAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO SÍSMICA DE ÁREAS SUBMERSAS

A investigação sísmica de áreas submersas pode ser compartimentada em dois grandes blocos: investigação rasa e investigação profunda. Esta compartimentação ocorre tendo em vista a tecnologia envolvida na investigação propriamente dita, em cada caso.

A primeira envolve o uso de equipamentos geofísicos de menor porte (fontes acústicas que raramente possuem potência superior a 1000 Joules) e meios flutuantes também de menor porte.

Na segunda, utilizam-se navios de grande porte e equipamentos geofísicos que lidam com fontes acústicas de alta potência (comumente milhares de Joules). Esta última não é foco da abordagem deste artigo, pois está relacionada à indústria do petróleo e à investigação geológica básica de bacias sedimentares.

A primeira, que é o foco desta discussão, refere-se à investigação rasa em projetos de engenharia e de geologia básica (mapeamento) e pode ser subdividida em dois subgrupos: investigação

de superfície e de subsuperfície. 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 temas relacionados à arqueologia subaquática ou a operações de busca e salvamento, na localização de embarcações naufragadas, por exemplo. A delimitação do traçado de dutovias (Souza et al., 2006), o monitoramento de emissários submarinos (Souza et al. 2011), a delimitação de áreas de descarte (Mansor 1994; Souza et al., 2010a), o estudo de hidrovias (Souza, 2008), 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. Assim, com estes objetivos, os métodos sísmicos utilizados são aqueles que empregam fontes acústicas que emitem preferencialmente espectros de altas frequências, comumente superiores a 30kHz. Destacam neste contexto a ecobatimetria (simples, dupla frequência ou multifeixes) e sonografia de varredura lateral (Figura 6 e Figura 7). A Figura 8 mostra imagens da superfície de fundo do rio Araguaia, obtida em projeto de estudos hidroviários. A Figura 9 mostra imagem do sonar de varredura lateral ilustrando o potencial desta ferramenta no mapeamento de emissários submarinos (Souza, 2011).

Os sistemas digitais existentes atualmente permitem que estas imagens sejam automaticamente justapostas lateralmente, compondo um mosaico que possibilita o desenvolvimento de uma análise global de várias características geológicas da área investigada tais como, lineamentos, falhas, contatos litológicos (Figura 10). Os sistemas atuais permitem ainda a utilização de fontes multifrequenciais, o que garante resolução e alcance lateral, simultaneamente.



Figura 6 – Sonar de Varredura Lateral Klein em operação na Praia Grande, litoral de São Paulo, Brasil; a) foto a esquerda, a fonte acústica de dupla frequência (100/500 kHz) denominada de “peixe”; b) foto a direita, equipe do IPT em operação de lançamento do peixe.

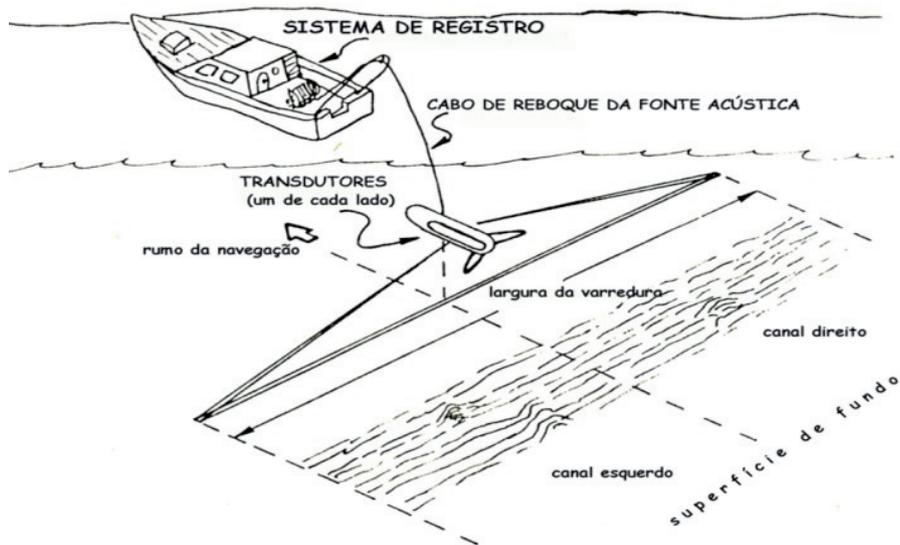


Figura 7 – Ilustração mostrando como é construída a imagem do sonar de varredura lateral à medida que a embarcação se locomove ao longo da seção. Modificado de Mazel (1985).

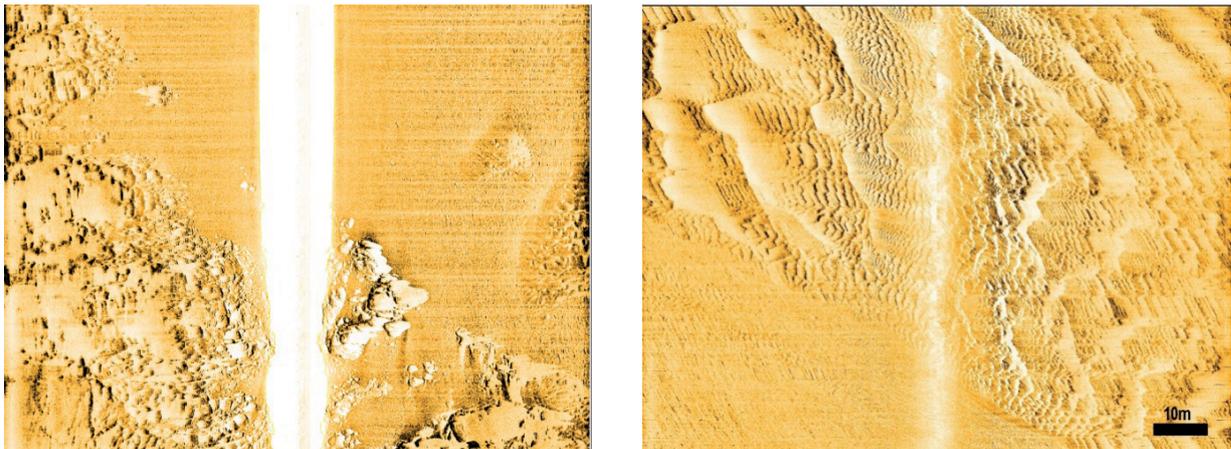


Figura 8 – Exemplos de imagens do sonar de varredura lateral mostrando: a esquerda, contato entre afloramento rochoso e sedimentos; a direita, contato entre cascalhos (área sem estruturas sedimentares) e sedimentos arenosos. Registros obtidos no rio Araguaia. Souza et al. 2010b.

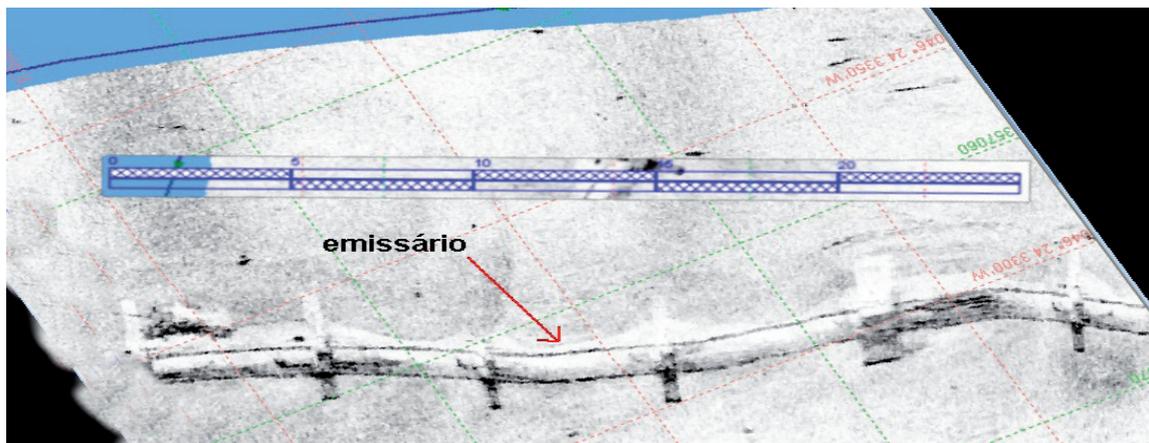


Figura 9 – Imagem do sonar de varredura lateral de alta resolução obtido com um Sonar Klein 3000 de dupla frequência pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Nesta imagem observa-se ainda, e com detalhes, a estrutura de suporte do emissário. Souza et al., 2011.

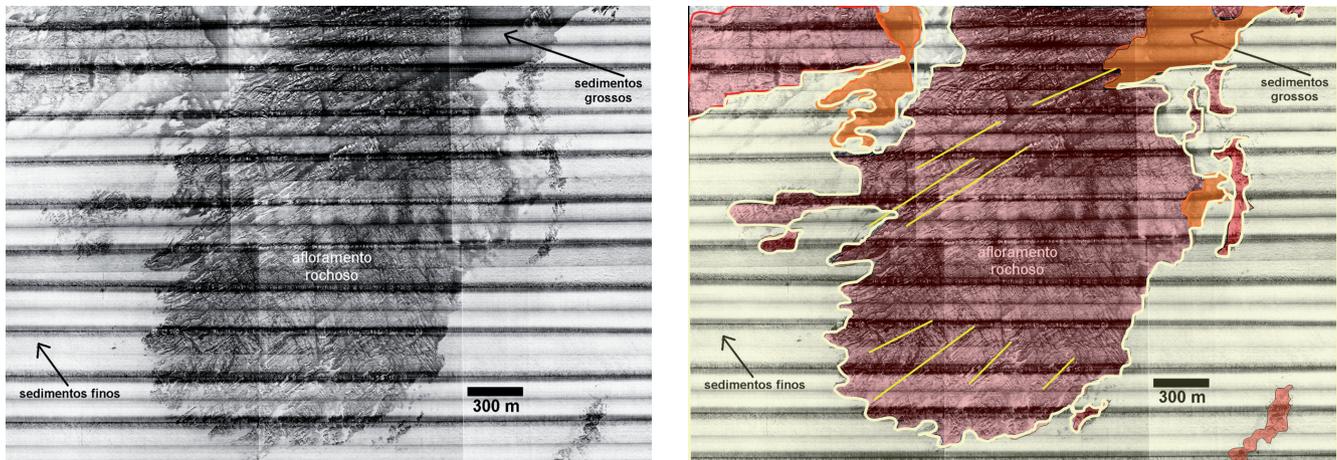


Figura 10 – Exemplo de mosaico construído a partir de imagens do sonar de varredura lateral. A imagem superior representa os dados de campo justapostos formando mosaico e a imagem inferior, representa o mosaico interpretado com base nas diferentes texturas observadas na imagem. Imagens cedidas pelo Serviço geológico do Japão.

O segundo subgrupo refere-se à investigação de subsuperfície, e neste caso, o objetivo é dar suporte a projetos em que são fundamentais informações sobre a espessura da coluna sedimentar ou a profundidade do embasamento rochoso. 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, portos e barragens, são exemplos de estudos que exigem informações de subsuperfície. Com esta

finalidade se destacam os métodos sísmicos que utilizam fontes acústicas do tipo *boomers*, *sparkers* e *chirps* que emitem sinais acústicos com espectros de frequências inferiores a 20kHz e que são denominados, de forma genérica, de métodos de perfilação sísmica contínua (Figura 11).

A Figura 12 ilustra uma tentativa de comparar a investigação sísmica de ambientes submersos rasos tomando como referência as diferentes fontes acústicas existentes e suas principais características e aplicações (Souza, 2006).



Figura 11 – Exemplo de fonte acústica de baixa frequência e alta energia: a esquerda, um boomer; a direita, um sparkler.



Figura 12 — Compartimentação da investigação sísmica de áreas submersas rasas. INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE: batimetria - utiliza fontes acústicas que emitem frequências a partir de 30kHz; imageamento - utiliza fontes acústicas que emitem sinais de frequências geralmente superiores a 100kHz. INVESTIGAÇÃO DE SUBSUPERFÍCIE: perfilagem sísmica - utiliza fontes acústicas que emitem frequências geralmente inferiores a 20kHz. Pode ser subdividida em dois grupos: métodos que priorizam a resolução (>2kHz) e os que priorizam a penetração (<2kHz) (Souza, 2006).

O MÉTODO GEOFÍSICO ADEQUADO PARA INVESTIGAÇÃO DE AMBIENTES SUBMERSOS

Os métodos sísmicos se destacam quando se trata da investigação de áreas submersas. Outros métodos geofísicos (elétricos, eletromagnéticos e magnetométricos) têm sido aplicados em estudos destes ambientes, todavia têm aplicação restrita e apresentam resultados mais qualitativos que quantitativos, e assim, oferecem produtos que não necessariamente satisfazem as solicitações de projetos de engenharia. Todavia, mesmo considerando o excelente e consagrado desempenho dos métodos sísmicos em investigações desta natureza, a decisão pela utilização de um ou outro método sísmico, dentre as várias possibilidades existentes, depende de algumas variáveis e, esta decisão não constitui um procedimento trivial. Diferentes métodos sísmicos utilizam diferentes fontes acústicas, que por sua vez possuem características específicas e oferecem produtos distintos. São vários os exemplos na literatura nacional

de tomada de decisões equivocadas com relação ao método geofísico a ser empregado numa determinada investigação geológica ou geotécnica. Destes casos decorrem enormes prejuízos financeiros e técnicos aos empreendimentos, além de um prejuízo maior que é o conceitual, de expor, negativamente, o método geofísico que foi empregado com objetivo para qual não foi configurado.

As fontes acústicas possuem propriedades que as caracterizam, tais como espectro de frequências e energia (potência), que as credenciam para serem aplicadas a objetivos distintos. De forma geral pode-se afirmar que fontes acústicas de frequências superiores a 2kHz oferecem melhor resolução, mas com prejuízo da penetração. Ao contrário, fontes acústicas com frequências inferiores a 2kHz favorecem o melhor desempenho no item penetração. O gráfico da Figura 13 mostra um exemplo das limitações de penetração de uma fonte acústica do tipo 3,5kHz, que diminui drasticamente com o aumento da granulometria dos sedimentos.

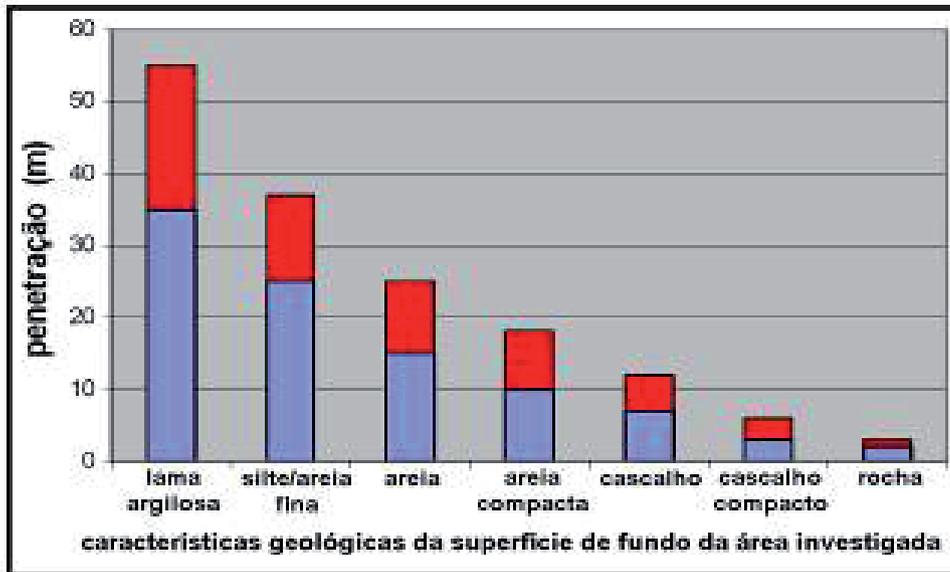


Figura 13 – Desempenho da fonte acústica modelo GeoPulse Pinger 3,5kHz, da Geoacoustics: penetração esperada (em azul) e a variabilidade possível (em vermelho) para a relação penetração do sinal acústico x tipo de fundo. Modificado de: <<http://www.geoacoustics.com>> (Souza, 2006).

Assim, para a investigação de depósitos sedimentares compostos basicamente de sedimentos arenosos (areias e cascalhos) comuns em aluviões de rios, com espessuras superiores a 8-10m, se faz necessário o emprego de fontes acústicas de maior energia e que emitam espectros com frequências inferiores a 2kHz. Fontes do tipo boomer e chirp (preferencialmente os de alta potência) estão entre as mais indicadas para se atingir estes objetivos. Os exemplos ilustrados na Figura 14 mostram excelentes perfis de subsuperfície obtidos com uma fonte acústica do tipo boomer. O primeiro, obtido no canal de Santos, permite observar a extensão do afloramento rochoso em profundidade, assim como a camada sedimentar sobreposta com espessura superior a 15m. O segundo, obtido no lago Guaraciaba, Santo André (SP) mostra 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.

A Figura 15 ilustra um registro obtido com o emprego de fonte acústica do tipo chirp mostrando, por outro lado, a importância do uso desta fonte acústica de alta resolução na identificação da espessura das camadas subsuperficiais de sedimentos.

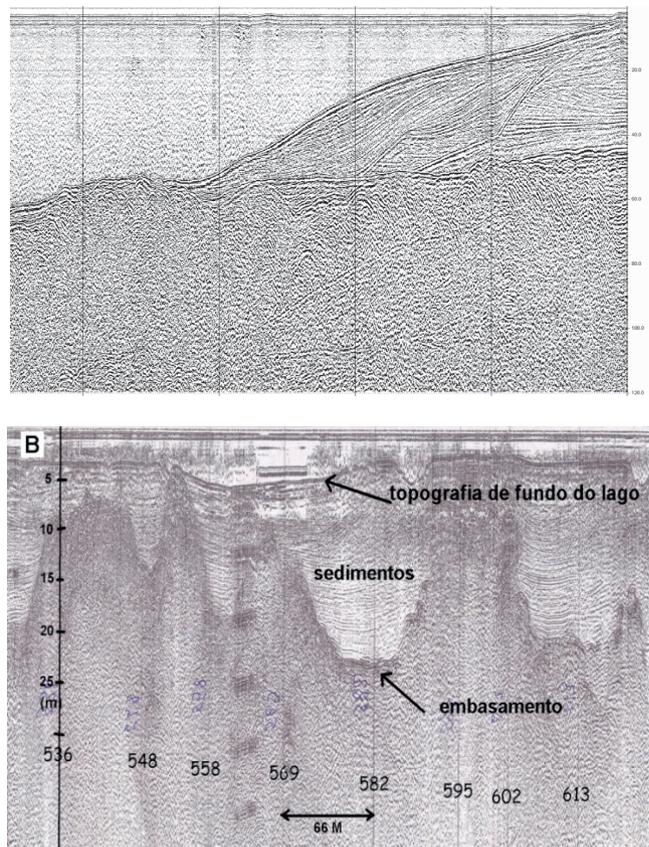


Figura 14 – Registros obtidos por meio do emprego da perfilação sísmica contínua com fonte acústica do tipo boomer. a) à esquerda, registro obtido no canal de São Sebastião, SP (Souza et al., 2006); b) à direita, registro obtido no Lago Guaraciaba, Santo André (SP). Souza (2006) e IPT (2003).

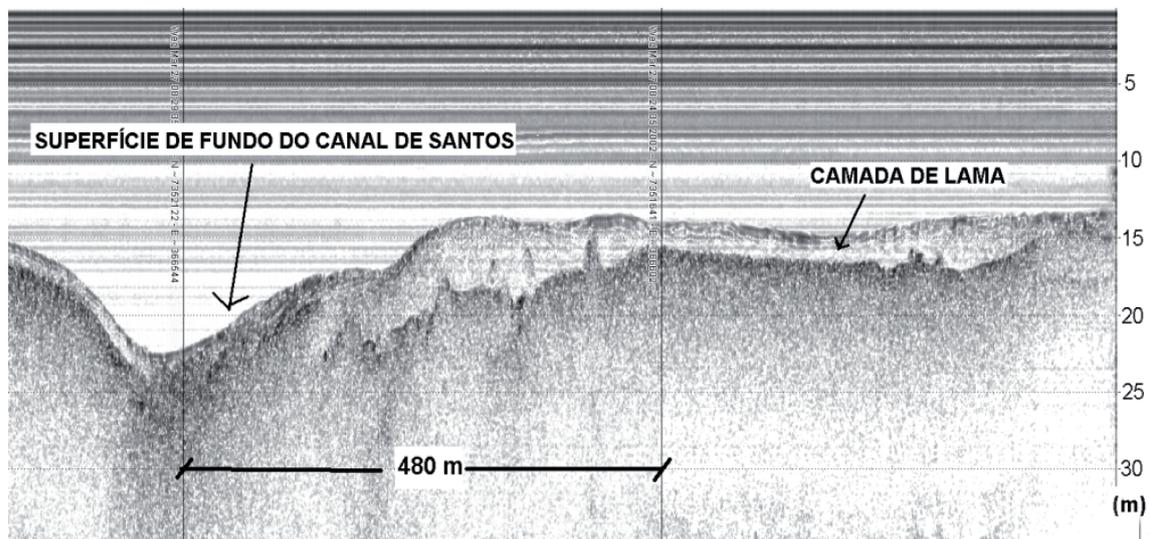


Figura 15 – Registro obtido com emprego de perfilador sísmico de fonte acústica do tipo chirp (2-8kHz). Registro cedido pelo Prof. Dr. M. M. de Mahiques do IO/USP.

O exemplo ilustrado na Figura 14 mostra a potencialidade do método de perfilagem sísmica com o uso de fonte tipo *boomer*, em projeto de dragagem de aprofundamento e de derrocagem submarina, na área do canal de São Sebastião, SP. Este método tem a potencialidade de indicar com grande precisão, o contorno do topo do embasamento rochoso sotoposto por sequências sedimentares com dezenas de metros de espessura.

Não raramente, projetos de engenharia em áreas submersas rasas devem ser elaborados com base de dados em todos os níveis discutidos anteriormente, a saber: espessura da coluna sedimentar rasa, profundidade do embasamento rochoso e imageamento das feições estruturais aflorantes na superfície de fundo. Em projetos desta natureza se faz necessário o emprego de sistemas de aquisição de dados mais complexos com capacidade de administrar, simultaneamente, várias fontes sísmicas, inclusive o sonar de varredura lateral. Exemplos de produtos obtidos de sistemas com capacidade de aquisição multifrequencial estão ilustrados nas Figura 16 e 17, onde se observa nitidamente a natureza diferenciada, sob ponto de vista da resolução e da penetração, dos produtos de cada uma das três fontes acústicas utilizadas simultaneamente (*pinger* 24kHz, *chirp* 10-18 kHz, *chirp* 2-8kHz e *boomer* 0,5-2kHz).

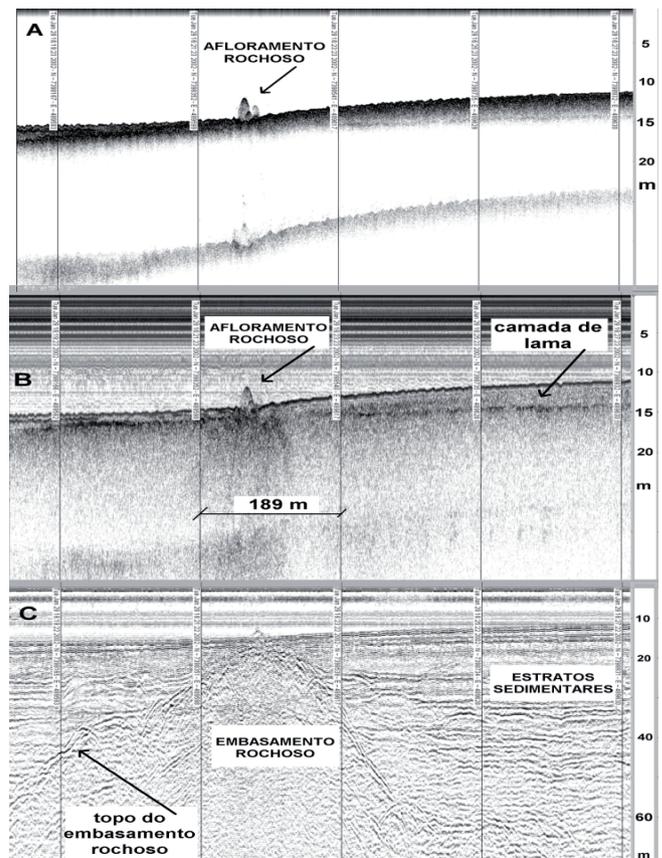


Figura 16 – Perfil sísmico executado com emprego simultâneo de três fontes acústicas (A) *pinger* (24kHz); (B) *chirp* (2-8kHz) e (C) *boomer* (0,5-2kHz). Observa-se nitidamente o desempenho diferenciado das fontes, com relação à penetração do sinal nos estratos sedimentares subjacentes. No perfil A e no perfil B se evidencia na superfície de fundo uma anomalia topográfica que somente no perfil C, pode ser correlacionada com a existência de um corpo rochoso em subsuperfície, permitindo inclusive seu dimensionamento (Souza, 2006).

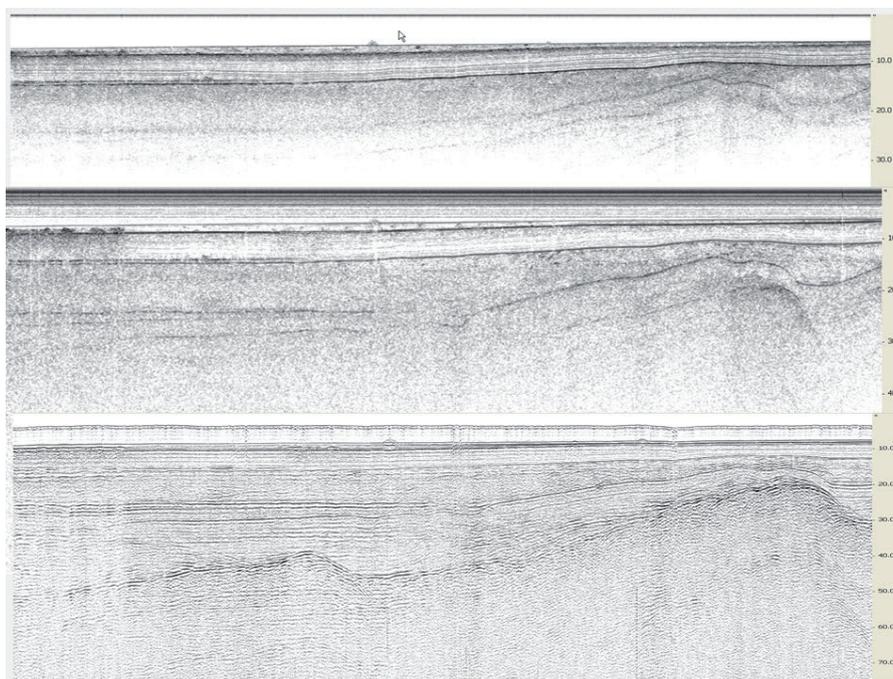


Figura 17 – Exemplo de produto obtido do emprego simultâneo de três fontes acústicas (A) *chirp* (10-18kHz); (B) *chirp* (2-8kHz) e (C) *boomer* (0,5-2kHz). Observa-se nitidamente o desempenho diferenciado das fontes, com relação à penetração do sinal nos estratos sedimentares subjacentes. De cima para baixo observa-se o aumento do poder de penetração da fonte acústica empregada. Dados obtidos pelo autor no golfo da Finlândia. Registros cedido pela Meridata.

CONCLUSÕES

A discussão desenvolvida neste artigo permite concluir sobre a importante contribuição dos métodos geofísicos na investigação de terrenos emersos e submersos, em projetos de engenharia e em estudos ambientais.

Em ambientes terrestres, destacam-se os métodos sísmicos e os métodos elétricos. Na sísmica, além dos consagrados ensaios de sísmica de refração e reflexão, os ensaios que utilizam ondas superficiais vêm, a cada dia, ganhando mais relevância no meio técnico.

Por outro lado, ressalta-se que os ensaios sísmicos do tipo *crosshole* e *downhole*, realizados em furos de sondagens, constituem-se em ferramentas indispensáveis e devem ser conduzidos em caráter prioritário quando da necessidade de maior precisão nas medidas de velocidades (V_p e V_s) em profundidade.

A eletrorresistividade, por outro lado, além das aplicações em geotecnia (mapeamento do embasamento rochoso, estruturas, zonas de faturamento, contatos litológicos, nível d'água, entre

outras), tem um excelente desempenho em investigações ambientais, tendo em vista que as propriedades elétricas dos terrenos sofrem grande influência quando da ocorrência de eventos que alterem as condições naturais dos terrenos (vazamentos, percolação de contaminantes, etc.).

Conclui-se ainda que a utilização do método SP (potencial espontâneo) poderia ser mais explorada pelo meio técnico devido às facilidades operacionais na coleta de dados e pela natureza dos dados adquiridos, permitindo interpretações, mesmo que qualitativas, sobre a direção do fluxo de fluidos em subsuperfície, informação extremamente relevante na exploração de temas ambientais, como monitoramento de plumas de contaminação e vazamento em barragens.

O GPR, embora seja o método de alta resolução, tem aplicações restritas devido ao baixo poder de penetração do sinal eletromagnético de alta frequência. Tem como aplicação principal a identificação de utilidades em subsuperfícies (cabos, dutos, estruturas etc.).

A magnetometria e micro gravimetria encontram aplicações mais restritas em geotecnia, porém

podem ser utilizadas em problemas específicos, tais como no mapeamento de diques básicos e detecção de cavidades, respectivamente.

Por fim, a perfilagem geofísica de poços, que constitui um conjunto de ferramentas geofísicas, das quais se destacam as referentes ao imageamento (BHTV e OPTV), oferecem produtos de alta resolução que muito contribuem em projetos que necessitam informações geológico-estruturais de detalhe (mapeamento estrutural de aquíferos, planejamento de lavras).

Na investigação de ambientes submersos, a análise desenvolvida neste artigo permite concluir que para um adequado desenvolvimento de estudos geológicos e/ou geotécnicos é fundamental proceder primeiramente uma análise criteriosa com relação aos objetivos do projeto. A melhor solução para o problema geológico-geotécnico será encontrada se três questões básicas forem devidamente avaliadas: 1) Qual é o objetivo do empreendimento? 2) Quais são as profundidades a serem investigadas? 3) Qual é o natureza do 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 todas essas informações são importantes. Com estes dados, o empreendedor poderá emitir solicitações de levantamentos geofísicos que basicamente irão prever, para o caso (1), levantamentos ecobatimétricos e/ou sonográficos que envolverão a utilização de ecobatímetros de uma ou duas frequências, sistemas multifeixes e/ou sonar de varredura lateral. Neste caso o objetivo do projeto será caracterizar a morfologia da superfície de fundo, através da identificação de feições como afloramentos rochosos, contatos litológicos, estruturas sedimentares, falhas e lineamentos ou, até mesmo, a localização de embarcações naufragadas, dando suporte a operações de busca ou salvamento.

Para o caso (2), os levantamentos geofísicos solicitados deverão ser aqueles relacionados à perfilagem sísmica contínua. Neste contexto, se a prioridade for a resolução (3), o projeto necessitará de dados referentes à espessura camadas subsuperficiais (métricas a submétricas) de sedimentos finos inconsolidados (lamas ou areias

finas). Desta forma, os levantamentos deverão ser executados por meio dos métodos sísmicos que utilizam fontes acústicas que emitem sinais com frequências entre 2 e 30kHz. SBP 3,5kHz, 7kHz, 10kHz, 15kHz, *chirp* de baixa potência 2-10kHz ou *pinger* 24kHz são exemplos de fontes acústicas com essas características que fornecem informações comumente úteis em projetos de dragagem de manutenção em áreas portuárias, hidrovias, de lagoas de decantação e a estudos de assoreamento de reservatórios.

Se a prioridade do projeto é a penetração nos estratos sedimentares arenosos, ou seja, dados sobre a espessura da coluna sedimentar ou da profundidade do embasamento rochoso constituem informações fundamentais, os levantamentos geofísicos a serem solicitados envolvem também ensaios de perfilagem sísmica contínua. Neste caso, todavia, 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 para estes objetivos. As Figuras 15, 16 e 17 ilustram produtos da utilização de fontes acústicas desta natureza. Em alguns casos onde resolução e penetração são requeridas, o emprego simultâneo de várias fontes acústicas é recomendável, para obtenção de resultados semelhantes aos ilustrados nas Figura 16 e 17.

Ressalta-se finalmente que a investigação geofísica em terra e em água, não prescinde de informações geológicas oriundas de sondagens ou amostragens. Observa-se ainda que o emprego de duas ou mais técnicas de investigação geofísica, sempre conduzirão à minimização das inerentes ambiguidades dos métodos geofísicos, tendo como consequência a obtenção de um modelo geológico-geotécnico final da área investigada mais consistente.

BIBLIOGRAFIA

Abreu J.G.N, Klein A.H.F, Diehl F.L, Menezes J.T, Santos M.I.F. 2005. A experiência da alimentação artificial de praias no litoral centro-norte do estado de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Oceanografia, 2. Vitória-ES. **Anais**. CD-ROM.

ASTM-D4428/D4428M. 2007. **Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing**, 11 p.

- ASTM-D7400. 2008. **Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing**, 11 p.
- Baradello, L. Bratus, A., Nieto, Y.D., Paganini, P., Palmieri, F. An interdisciplinary geophysical approach to detect cavities in a karst region. 2001. In: SBGF, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 7, **Expanded Abstracts**. CD-ROM.
- Bokhonok, O. 2011. Sísmica de Reflexão Rasa Multicomponente: Aquisição e Inversão de Tempos de Trânsito e Amplitudes. **Tese de Doutorado**. IAG-USP. 162p.
- Caris, J.P.T.; Van Asch, T.H.W.J. 1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. **Engineering Geology**, 31: 249-276,
- Castilhos J.A & Gré J.C.R. 1996. Erosão costeira nas praias da ilha de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais**, 4: 417-420.
- Danielsen, B.E; Torleif Dahlin, T. 2009. Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallandsås Tunnel, Sweden. **Engineering Geology**, 107: 118-129.
- Davis, J. L., Annan, A. P. 1989. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, 37, n.5: 531-551.
- Debeglia, N.; Bitri, A.; Thierry, P. 2006. Karst investigations using microgravity and MASW; Application to Orléans, France. **Near Surface Geophysics**, 215-225.
- Dobecki, T.L., Romig, P.R. 1985. Geotechnical and groundwater geophysics. **Geophysics**, v.50, n.12:2621-2636.
- Dourado, J.C. 1984. **A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos "in situ"**. Publicações de artigos técnicos da ABGE, n.8. São Paulo, 12 p.
- Duarte, O.O. 2010. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia**. 4ªed. SBGf, Rio de Janeiro, 388p.
- Gallas, J. D. F. 2005. O método do potencial espontâneo - uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Brazilian Journal of Geophysics**, 23, n.2: 133-144.
- Gandolfo, O.C.B. 2007. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. **Tese de Doutorado**. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 215 p.
- Gandolfo, O. C. B. 2011. Ensaio sísmicos (refração utilizando ondas P e S e ensaio com ondas superficiais) na caracterização geotécnica de um aterro. In:12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, **Expanded Abstracts**. SBGf, Rio de Janeiro, CD-ROM.
- Griffiths, D.H. & King, R.F. 1983. **Applied geophysics for geologists & engineers**. 3ed. Pergamon Press, 230 pp.
- 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.
- IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2006. Avaliação dos processos erosivos na bacia hidrográfica do córrego da Lagoa Seca, município de Brotas, SP. **Parecer IPT** 10.724-301.
- IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2010. Ensaio *crosshole* em área da Eldorado Celulose e Papel, município de Três Lagoas, MS. **Relatório Técnico** 117.483-205.
- IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2011 Levantamentos geofísicos no entorno das células de armazenamento na área da rua Cápua, município de Santo André-SP. **Relatório Técnico** 120.311-205.
- Israil M.; Pachauri, A.K. 2003. Geophysical characterization of a landslide site in the Himalayan foothill region. **Journal of Asian Earth Sciences**. v.22, n.3: 253-263.

- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2009. **Geofísica de exploração**. Oficina de Textos, 438 pp.
- Kruse, S.E.; Grasmueck, M.; Weiss, M., Viggiano, D. 2006. Sinkhole structure imaging in covered Karst terrain, **Geophysical Research Letters**, 33.16.
- Klessig L.L. 2001. Lakes and society: The contribution of lakes to sustainable societies. **Lakes Reserv. Res. Manage.**, 6: 95-101.
- Lankston, R.W. 1990. High-Resolution Refraction Seismic Data Acquisition and Interpretation. In: **Geotechnical and Environmental Geophysics**, Serie Investigations in Geophysics. Ed. Stanley H. Ward - Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, v.I: Review and Tutorial, p.45-73.
- Lima R.C.A, Coutinho P.N, Maia L.P. 2002. Estudo da erosão marinha na praia do Pontal da Barra - Maceió, AL. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41. João Pessoa-PB. **Anais**, 1: 101.
- López R.A & Marcomini S.C. 1996. Impacto ambiental generado por asentamientos urbanos en zonas costeras. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais**, 4: 484-488.
- Maia L.P, Carvalho A.M, Monteiro L.H.U. 2002. Projeto de recuperação da praia de Iracema-CE. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41. João Pessoa-PB. **Anais**, 1:102.
- 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.
- Mazel, C. 1985. **Side Scan Sonar training manual**. New York, Klein Associates. Inc. Undersea Search and Survey. 144p.
- Milson, J. 2003. **Field Geophysics**. 3ed. Wiley. 227 pp.
- Morais J.O, Magalhães S.H.O & Rodrigues A.C.B. 1996. Processos de erosão e assoreamento no litoral a oeste de Fortaleza-CE. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais**, 4: 413-416.
- Neumann V.H, Leitão S.N, Queiróz C.M, Maia L.P. 1996. Estudos sedimentológicos, geomorfológicos e impactos ambientais causados pela implantação do porto na Laguna de Suape - PE. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais**, 4: 496-499.
- Orellana, E. 1972. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, Paraninfo, 523pp.
- Parasnis, D.S. 1997. **Principles of Applied Geophysics**. 5.ed. Chapman and Hall, London, 429pp.
- Park, C.B., Miller, R.D., Ryden, N., Xia, J., Ivanov, J. 2005. Combined use of active and passive surface waves. **Journal of Engineering and Environmental Geophysics**, 10, (3):323-334.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. **Geophysics**, v. 64, n.3:800-808.
- Pereira L.C.C, Medeiros C, Freitas I.C, Carvalho P.V.V.D.B.C. 1996. Morfologia e hidrodinâmica da praia de Casa Caiada. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais**, 4: 472-476.
- Prado R.L. 1994. O ensaio sísmico entre furos ("crosshole") no estudo de maciços terrosos e rochosos. **Dissertação de mestrado**. IAG-USP. São Paulo, 123 p.
- Reynolds, J.M. 1997. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, New York, 796pp.
- Sjogren, B., Ofsthus, A., Sandberg, J. 1979. Seismic classification of rock mass qualities. **Geophysical Prospecting**, 27:409-442.
- 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.
- Souza L.A.P, Gandolfo O.C.B., Cordeiro R.P, 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. 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., Bianco R, Tessler M.G. & Gandolfo O.C.B. 2007. Investigações geofísicas em áreas submersas rasas: qual o melhor método?. In: 10^o Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro-RJ. **Resumos Expandidos**. CD-ROM.
- Souza, L.A.P, Miranda Filho, O.F. & Mahiques, M.M. 2008. Perfilagem Sísmica em águas rasas: qual a melhor fonte acústica? In: III simbgf, Belém. **Anais**, CD-ROM.
- Souza, L.A.P.; Silva, R. F.; Iyomasa, W. S. 1998. Investigações geofísicas. In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. (Ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). Métodos de investigação. p.165-183.
- Souza, L.A.P., Tessler, M.G. & Yassuda, E.A. 2010a. Importância dos métodos geofísicos no estudo de áreas de descarte. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém-PA. **Anais**. CD-ROM.
- Souza, L.A.P., Alameddine, N & Iyomasa, W. S. 2010b. Aplicação de métodos sísmicos em estudos de dinâmica fluvial: o exemplo do rio Araguaia. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém-PA. **Anais**. CD-ROM.
- Souza, L.A.P., Alameddine, N. & Yassuda, E.A. 2011. Geophysical methods to support ocean outfall monitoring: a side-scan application. In: International Symposium on Outfall Systems, May 15-18, 2011, Mar del Plata, Argentina. **Anais**, CD-ROM.
- Steeple, D.W., Miller, R.D. 1990. Seismic Reflection Methods Applied to Engineering Environmental and Groundwater Problems. In: **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, v.1: Review and Tutorial, p.1-29.
- Taioli, F., Dourado, J.C., Cordeiro, R.P. 1993. Determinação de matacões por sísmica de reflexão de alta resolução. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, **Anais**, v.1, p.219-226.
- Taioli, F; Marchioreto, A; Machado, R.; Gallas, J.D.F. 2009. Boulders mapping by using resistivity imaging survey. In: SBGF, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 11, **Expanded Abstracts**. CD-ROM.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sherif, R.E. 1990. **Applied Geophysics**. 2ed. Cambridge University Press, Cambridge, 770pp.
- Tessler M.G & Mahiques M.M. 1996. Processos erosivos e deposicionais no litoral paulista. Estudo de caso no sistema Cananéia-Iguape. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39. Salvador-BA. **Anais 4**: 456-459.
- Tóth T, Vida R & Horváth F. 1997. Shallow-water single and multichannel seismic profiling in a riverine environment. **Lead. Edge**, p.1691-1695.
- Trainini D.R. 1994. Diagnóstico preliminar de aspectos ambientais do litoral norte do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38. Balneário de Camboriú-SC. **Boletim de Resumos Expandidos**, 1: 26.
- Ward, S.H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. In: **Geotechnical and Environmental Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, v.1: Review and Tutorial, p.147-189.
- Xia, J.; Xia, J.; Miller, R.D.; Park, C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. **Geophysics**, 64, n.3:691-700

