

APOIO AO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO NO BRASIL

A FVD – Fundação Victor Dequech, entidade sem fins lucrativos, criada em 2001, apoia e incentiva ações e projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e Inovativo no Brasil.

Com foco na pesquisa e engenharia mineral -- bem como nas áreas de energia, óleo e gás, meio ambiente e tecnologias a elas relacionadas -- a FVD sente-se plenamente honrada por apoiar a ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental na edição de suas Diretrizes, Guias, Manuais, Boletins e outros documentos assemelhados, agora como Normas Técnicas dessa conceituada associação.

A FVD e a ABGE estão irmanadas no esforço para a educação e a capacitação continuada, que proporcionam qualificação, habilidades e competências de empresas e de profissionais, contribuindo assim com o desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida em nosso país.

Cumprimentamos a todos os participantes dessa iniciativa pioneira.

Antonio de Padua Vieira Chaves
Diretor Presidente da FVD



Rua São Vicente, 255. Bloco B
Bairro Olho D'água - Belo Horizonte, Minas Gerais,
Brasil. CEP 30.390-570.
Tel. +55 31 3288-1742 | www.fvd.org.br



NORMA DA ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE
ENGENHARIA E AMBIENTAL

NÚMERO DE REFERÊNCIA:
NORMA ABGE 200/2023
1ª Edição, 2023

**GEOFÍSICA APLICADA –
MÉTODOS E TÉCNICAS**

NORMA ABGE 200
1ª Edição, 2023

ABGE — AJUDANDO AS EMPRESAS A TRABALHAREM MELHOR



Copyright 2023. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE
Todos os direitos reservados a ABGE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Souza, Luiz Antonio Pereira de
Norma ABGE 200/2023 : geofísica aplicada : métodos
e técnicas / Luiz Antonio Pereira de Souza, Otávio
Coaracy Brasil Gandolfo. -- 1. ed. -- São Paulo :
ABGE, 2023.

Vários colaboradores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-88460-13-9

1. Geofísica 2. Geologia 3. Geotecnia
4. Infraestrutura 5. Normas técnicas I. Gandolfo,
Otávio Coaracy Brasil. II. Título.

CDD-628
-624.15
-624.151

23-159528

Índices para catálogo sistemático:

1. Geofísica aplicada à geologia e meio ambiente :
Engenharia ambiental 628
2. Geotecnia 624.15
3. Geologia de engenharia 624.151

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Sugestão para referência bibliográfica:

Souza, L.A.P.; Gandolfo, O.C.B. NORMA ABGE 200/2023 - Geofísica aplicada - Méto-
dos e Técnicas. Vários colaboradores. 1ª Edição. São Paulo, ABGE, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE
Av. Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 59. Cidade Universitária, São Paulo, SP CEP 05508-901

www.abge.org.br – abge@abge.org.br

Fones: (11) 3767.4361 (11) 9.8687.6560

A ABGE e todos os colaboradores, revisores, coordenadores, autores e editor partici-
pantes dessa Norma ou de artigos e livros utilizados como referência bibliográfica,
não possuem responsabilidade de qualquer natureza por eventuais danos ou perdas
pessoais ou de bens originados do uso da presente publicação. Aqueles que usam
essa publicação são responsáveis por tomar suas próprias decisões quando apli-
carem as informações aqui fornecidas e as cotejarem e harmonizarem com outras.
Críticas e contribuições devem ser encaminhadas a Secretaria Executiva da ABGE:
abge@abge.org.br

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	5
1. FINALIDADE	7
2. CONCEITOS BÁSICOS	7
3. ESPECIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	9
3.1 Área ou local a investigar	9
3.2 Informações prévias	9
3.3 Profundidade e alcance lateral.....	10
3.4 Localização e base cartográfica	10
3.5 Equipamentos.....	11
3.6 Apresentação dos resultados	11
4. INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM TERRA	12
4.1 Finalidades/aplicações.....	12
4.1.1 Caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico	12
4.1.2 Contaminantes e fontes de contaminação.....	13
4.1.3 Caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia.....	13
4.1.4 Outras aplicações.....	13
4.2 Métodos	13
4.2.1 Métodos Sísmicos.....	14
4.2.2 Métodos Elétricos	14
4.2.3 Métodos Eletromagnéticos	14
4.2.4 Métodos Potenciais.....	14
4.2.5 Perfilagem de Poços (PERF)	14
4.3 TABELA RESUMO	14
5. INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM ÁGUA	15
5.1 Finalidades/aplicações	16
5.2 Métodos.....	17
5.2.1 Métodos Acústicos	17

5.2.2 Outros métodos geofísicos aplicados na investigação de ambientes submersos	17
5.3 Tabela resumo	18
6. PERSPECTIVAS.....	18
7. PRINCIPAIS PARTICIPANTES.....	20
8. REFERÊNCIAS.....	21
9. REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS	22
10. LEITURAS RECOMENDADAS	24
11. GLOSSÁRIO	30
TABELA 1.....	36
TABELA 2.....	40
TABELA 3.....	41

APRESENTAÇÃO

Essa Norma apresenta os principais conceitos, métodos e técnicas geofísicas de interesse ao estudo, projeto, construção, operação, manutenção e desativação/descomissionamento de obras de engenharia. A Geofísica Aplicada é uma das mais importantes técnicas de investigações geológico-geotécnicas. Quando bem planejada e interpretada, conjuntamente com os demais estudos e investigações como, por exemplo, mapeamentos geológicos, sondagens mecânicas e ensaios de campo e laboratório, sua importância se torna um método de investigação não apenas eficaz, mas imprescindível às boas práticas da engenharia de obras e de natureza ambiental.

A “Norma ABGE 200 – Geofísica Aplicada” possibilita uma visão ampla do tema, o que permite auxiliar a tomada de decisão sobre quais métodos devem ser adotados. A publicação, como concebida, é a primeira das Normas ABGE sobre o tema Geofísica Aplicada e a ela seguirão normas específicas, individualizadas, sobre os métodos mais utilizados, como sísmica, métodos elétricos e eletromagnéticos e outros.

As referências básicas da presente norma são o livro “Investigações geológico-geotécnicas – Guia de Boas Práticas” (Monticelli, 2021, Ed.), e o livro “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente – Manual de boas práticas” (Souza e Gandolfo, 2021), ambos publicados pela ABGE.

A Norma ABGE possui formato próprio, mas semelhante ao publicado por entidades civis e associações técnicas e profissionais, nacionais ou estrangeiras, como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ASTM (American Society for Testing and Materials), API (American Petroleum Institute), ISO (international Organization for Standardization), ASCE (American Society of Civil Engineering), CDA (Canadian Dam Association), IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment), dentre outras. Essas entidades publicam Normas (Standards), Diretrizes (Guidelines), Boletins (Bulletins), Regras (Codes) e outros documentos assemelhados, com a finalidade de ajudar empresas e profissionais a trabalharem melhor.

As normas e as publicações técnicas editadas pelas entidades acima citadas, assim como a presente NORMA ABGE, são de aceitação voluntária. A sua aplicação somente passará a ter caráter vinculante no plano legal/normativo, caso seja reconhecida e de alguma forma chancelada/acolhida pelo poder público (por exemplo, se a adoção de alguma NORMA ABGE for exigida ou referida por algum dispositivo legal); e, no plano privado, caso seja mencionada em um contrato como norma a ser observada pelas partes no cumprimento de suas obrigações (Passini & Alvares Sociedade de Advogados, 2021).

Sugerimos que os usuários das informações dessa publicação a cotejem e a harmonizem com outras sobre o mesmo tema, assim possibilitando maior consistência nos termos de referências e contratos e maior eficácia, segurança e economicidade nos estudos, projetos e obras.

Agradecimentos aos sócios, às empresas patrocinadoras da ABGE e a todos que apoiaram e colaboraram com a presente publicação, em especial aos participantes dos livros “Investigações geológico-geotécnicas – Guia de Boas Práticas” e “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e ambiental – Manual de boas práticas”, ambos publicados pela ABGE em 2021.

João Jeronimo Monticelli

Editor

Fábio Soares Magalhães

Presidente da ABGE – Gestão 2023-2024

1 FINALIDADE

A Geofísica Aplicada – fruto de seus avanços tecnológicos ao longo do tempo – é reconhecida no meio profissional e acadêmico como instrumento de ampla aplicabilidade nas investigações geológico-geotécnicas. Sua utilização é útil – em muitos casos imprescindível – nas fases de estudos e projetos de obras de engenharia, na caracterização de áreas contaminadas, no monitoramento de obras em operação e para o descomissionamento seguro de empreendimentos de mineração e de natureza ambiental (barragens de rejeitos, aterros sanitários e outros).

Assim, a presente Norma tem a finalidade de fornecer, de forma célere, informações básicas sucintas que permitam a tomada de decisão por Empreendedores, Projetistas, Consultores e demais atores envolvidos e interessados no tema, sobre o uso eficaz da geofísica, como um dos componentes dos programas de investigações e ensaios geológico – geotécnicos normalmente indicados para as diversas etapas do ciclo de vida de uma obra de engenharia.

A presente publicação pretende, portanto, dar respostas aos profissionais contratantes de serviços de geofísica, que costumam fazer a seguinte pergunta: “qual(ais) o(s) método(s) geofísico(s) que melhor atende(m) à demanda do meu projeto?”.

2 CONCEITOS BÁSICOS

A Geofísica Aplicada constitui-se em um conjunto de métodos indiretos de investigação do subsolo, sendo, portanto, métodos não destrutivos que, a partir de ensaios de campo, fornecem um rápido conhecimento das principais características físicas da área de interesse. Possuem boa relação custo/benefício, sendo capazes de investigar as propriedades físicas dos materiais geológicos em seu estado *in situ*.

O sucesso da aplicação dos métodos geofísicos está diretamente relacionado com a amplitude dos contrastes das propriedades físicas entre o “alvo”

e o seu “entorno”. Dessa forma, eventuais casos de insucesso na investigação geofísica ocorrem devido à inexistência de contrastes suficientemente expressivos entre as propriedades físicas dos diferentes meios geológicos da área investigada, de forma a garantir que o alvo seja identificado e mapeado. Ressalta-se que, os contrastes entre as propriedades físicas dos meios estão diretamente relacionados à natureza do meio geológico e, portanto, são independentes do operador ou do equipamento geofísico empregado. Contudo, por se tratar de ensaios indiretos, a solução – isto é, obter um modelo a partir dos dados – nem sempre é única, podendo envolver alta equivalência dos modelos resultantes, com conseqüente ambigüidade na interpretação, mas que pode ser minimizada com o aporte de informações provenientes de investigações diretas (sondagens, testemunhagens, coleta de amostra etc.) ou mesmo com a utilização de mais de um método geofísico na área investigada.

Os ensaios geofísicos são comumente realizados na etapa inicial de caracterização geral (viabilidade), precedendo as atividades de investigação detalhada da área de interesse. Não raramente, são empregados também na fase executiva dos projetos, quando há necessidade de serem obtidas informações específicas e mais detalhadas.

A Geofísica Aplicada tem evoluído desde os primeiros trabalhos apresentados no início do século 20, como consequência do avanço tecnológico, em especial, da eletrônica. Observa-se uma tendência de atuação da Geofísica Aplicada no campo do monitoramento em tempo real de variações das diversas propriedades físicas dos terrenos. O monitoramento de barragens, por meio dos métodos de Microsísmica, Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo, ilustra algumas das inúmeras possibilidades neste vasto potencial campo de atuação da Geofísica Aplicada.

3 ESPECIFICAÇÃO DOS SERVIÇOS E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Recomenda-se utilizar mais de um método geofísico na investigação, a fim de minimizar a natural ambiguidade do processo de interpretação dos dados. Na investigação de ambientes submersos, recomenda-se o emprego simultâneo de mais de uma fonte acústica, para se garantir o desempenho dos métodos sísmicos em termos de resolução e de penetração na coluna sedimentar.

3.1 Área ou local a investigar

Os ensaios geofísicos de campo são realizados com medidas efetuadas ao longo de perfis lineares ou em pontos discretos no terreno, que devem ser distribuídos na área de interesse de forma representativa. Os perfis devem ser preferencialmente orientados em direção perpendicular à feição linear a ser mapeada ou ao *strike* da estrutura geológica. Muito comumente, torna-se necessária a execução de perfis em direções perpendiculares entre si (formando uma malha ou um *grid*), especialmente recomendada quando a orientação da estrutura, objeto da investigação, for desconhecida. No caso de levantamentos geofísicos em terra, salvo em situações e demandas específicas, não se recomenda desenvolver levantamentos em terrenos demasiadamente acidentados, ou em terrenos com solos extremamente moles, tendo em vista a complexidade operacional, bem como o inerente comprometimento da geometria do método geofísico empregado. O acesso à área deve estar garantido para o deslocamento da equipe e dos equipamentos, comumente sendo necessária a abertura de picadas com conseqüente remoção da vegetação. Especial atenção deve ser dada às licenças à segurança de acesso à áreas indígenas, de preservação ambiental e de difícil acesso.

3.2 Informações prévias

É de extrema relevância, para o aprimoramento do modelo geológico a ser elaborado a partir dos ensaios geofísicos, que sejam disponibilizadas, para a empresa geofísica contratada, todas as informações existentes sobre a área onde será realizado o levantamento: dados de sondagens e de poços, estudos

geológicos, investigações geotécnicas existentes e resultados de levantamentos geofísicos anteriormente executados na área.

A disponibilidade de dados oriundos de investigações diretas (boletins de sondagens, ensaios geotécnicos etc.) contribui efetivamente para a interpretação, já que possibilita a confrontação de dados diretos e indiretos, que viabilizam a análise das concordâncias e das discrepâncias entre os dados.

3.3 Profundidade e alcance lateral

O espaçamento entre os pontos de medidas, extensão dos arranjos lineares, a potência dos equipamentos utilizados, frequências de operação dos sistemas e os demais parâmetros aplicáveis aos diversos métodos e às técnicas geofísicas, deverão ser dimensionados, de modo que as profundidades de investigação e o nível de resolução horizontal (lateral) e vertical sejam efetivamente alcançados, de acordo com as premissas estabelecidas pelo contratante.

3.4 Locação e base cartográfica

O correto posicionamento dos pontos e das linhas onde foram realizados os ensaios geofísicos é fundamental para todas as etapas subsequentes do projeto. Todos os levantamentos de campo devem ser executados com apoio de sistemas de posicionamento global (Global Navigation Satellite System – GNSS), com precisão ao menos submétrica, e/ou estação total, visando a garantir o devido e preciso posicionamento dos pontos e/ou das linhas. No caso da não utilização de GNSS ou estação total, o procedimento utilizado para o posicionamento dos pontos e/ou os perfis deve ser informado. Por exemplo, em levantamentos terrestres pode ser utilizada uma trena associada a uma planta de detalhe da área investigada. Recomenda-se utilizar o *datum* SIRGAS-2000 ou WGS-84. No caso da não adoção destes, deverá ser mencionado qual foi o *datum* utilizado e o motivo de seu emprego.

O posicionamento dos dados adquiridos em campo, seja sob a forma de perfis ou pontos discretos no terreno, deverá ser apresentado no relatório sobre uma planta, mapa ou qualquer outro tipo de base cartográfica. No caso de os resultados serem apresentados como curvas de contornos, é obrigatória a plotagem da localização dos pontos sobre os quais as linhas de isovalores

foram geradas, de forma a evitar interpretações equivocadas nas regiões onde não existem informações.

3.5 Equipamentos

Os equipamentos, acessórios e arranjos geométricos de campo utilizados no processo de aquisição de dados devem ser informados no relatório entregue ao cliente. Qualquer problema relacionado ao funcionamento do equipamento, à qualidade dos dados e ao posicionamento dos perfis e/ou pontos de medida devem ser reportados. Devem também ser informados quais os softwares que foram utilizados para o processamento dos dados.

3.6 Apresentação dos resultados

Os dados de campo originais (dados brutos), hoje em sua maioria em formato digital (original do equipamento), devem ser disponibilizados para o Contratante. Os dados deverão ser fornecidos no seu formato original para que possam ser, eventualmente, reprocessados ou simplesmente conferidos por terceiros. Podem também ser fornecidos, adicionalmente, em outros formatos acessíveis aos usuários, como por exemplo, imagens, tabelas com dados numéricos etc., possibilitando que sejam visualizados em softwares de uso comum no mercado.

Os resultados de um levantamento geofísico, dependendo do método utilizado, podem ser apresentados na forma de gráficos, plantas, mapas de contornos, seções 2D e, eventualmente, em blocos diagramas 3D. São amplas as possibilidades de visualização dos dados, se considerarmos a evolução dos softwares de processamento de dados disponíveis atualmente no mercado.

Os dados de imageamento (seções 2D de GPR – Radar de Penetração no Solo, de Sísmica de Reflexão e de Eletrorresistividade) devem ser apresentados em um formato “limpo” (dado original, sem a interpretação) e “interpretado” no qual estejam indicadas as feições delineadas na interpretação, como, por exemplo posição do nível d’água, estratigrafia em subsuperfície, profundidade do topo rochoso, presença de falhas, zonas fraturadas e sujeitas à maior percolação de água, delimitação de uma anomalia associada à uma pluma de contaminantes, objetos enterrados e demais estruturas identificadas. Esta

apresentação possibilita ao Contratante observar os dados originais sem a interpretação do Contratado.

Por conveniência técnica ou por solicitação do Contratante, poderá vir a ser necessária a reinterpretação dos dados, caso novas informações diretas ou indiretas (inexistentes na ocasião em que o levantamento geofísico foi realizado) sejam disponibilizadas posteriormente.

4 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM TERRA

As principais aplicações dos métodos geofísicos empregados em levantamentos terrestres foram organizadas em quatro grandes temas (finalidades/aplicações) e estes, por sua vez, estão relacionados a pautas específicas (métodos), conforme são apresentados a seguir.

4.1 Finalidades/aplicações

4.1.1 *Caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico*

- determinação da espessura de material inconsolidado e da profundidade do topo rochoso;
- estratigrafia geológica/geotécnica;
- localização de falhas com grande rejeito;
- localização de zonas fraturadas;
- localização de diques de rochas básicas;
- localização de matacões;
- localização de paleocanais;
- detecção de zonas carstificadas, vazios e cavidades rasas;
- análise de escorregamentos e caracterização de encostas;
- determinação da profundidade do nível d'água;
- determinação da direção do fluxo de água subterrânea e de fluxos preferenciais;
- identificação de zonas com maior percolação de água em maciços;

- identificação do contato entre água doce e salgada em regiões costeiras.

4.1.2 *Contaminantes e fontes de contaminação*

- identificação e mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos;
- identificação e mapeamento de plumas de contaminantes orgânicos;
- delimitação de valas, cavas, trincheiras e aterros;
- identificação de salinidade nos solos.

4.1.3 *Caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia*

- determinação de módulos elásticos dinâmicos de maciços para engenharia geotécnica e de fundações;
- determinação do grau de escarificabilidade de maciços;
- determinação da resistividade elétrica para projetos de aterramento, proteção catódica e estudos de corrosão;
- inspeção de pavimentos;
- inspeção de estruturas de concreto.

4.1.4 *Outras aplicações*

- detecção de utilidades enterradas em ambientes urbanos (dutos, galerias, adutoras, cabos);
- localização de objetos enterrados (tanques, tambores);
- identificação de fuga d'água em corpos de barragens e lagoas de rejeitos;
- identificação de alvos rasos para fins arqueológicos e forenses.

4.2 Métodos

Os métodos considerados são:

4.2.1 Métodos Sísmicos

- Sísmica de Refração (REFRA);
- Sísmica de Reflexão (REFLEX);
- métodos que empregam ondas de superfície (SW): MASW, SASW, Remi, HVSR;
- ensaios em furos de sondagem: *Crosshole* (CH), *Downhole* (DH), Tomografia Sísmica (TOMO).

4.2.2 Métodos Elétricos

- Eletrorresistividade: Caminhamento Elétrico/Imageamento (CE/Im) e SEV;
- Potencial Espontâneo (SP);
- Polarização Induzida (IP).

4.2.3 Métodos Eletromagnéticos

- Radar de Penetração no Solo (GPR);
- EM no Domínio da Frequência (FDEM);
- EM no Domínio do Tempo (TDEM).

4.2.4 Métodos Potenciais

- Magnetometria (MAG);
- Microgravimetria (GRAV).

4.2.5 Perfilagem de Poços (PERF)

4.3 TABELA RESUMO

A **Tabela 1** indica os métodos geofísicos em terra para as diversas aplicações. Foi utilizado o seguinte critério classificatório para as metodologias geofísicas e/ou técnicas empregadas, em função das principais aplicações: A = primeira escolha (método preferencial); B = segunda escolha (método alternativo); Em branco = o método não é recomendável ou é aplicável em situações muito particulares e, neste caso, deve ser discutido com o profissional executor do trabalho.

5 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM ÁGUA

Observa-se, nestes últimos anos, uma proliferação de projetos em áreas submersas, especialmente no mar. Pontes, túneis, hidrovias, cabos e dutos subaquáticos, projetos de energia renovável (parques eólicos, marés, ventos e plataformas solares) e de mineração são alguns exemplos, que ratificam os mais recentes movimentos da sociedade no rumo da intensificação da ocupação do mar, rios e de reservatórios de água.

A maioria dos métodos geofísicos pode ser aplicada na investigação de ambientes submersos. Todavia, são os métodos acústicos que, embasados no princípio da propagação das ondas acústicas do tipo P, ocupam posição de destaque, principalmente pela facilidade com que estas ondas se propagam na coluna d'água e nas camadas sedimentares subjacentes.

A viabilidade da aplicação dos métodos acústicos está baseada na existência de contrastes entre as propriedades físicas dos diferentes materiais que compõem a crosta terrestre, denominados de contrastes de impedância acústica. Assim, a partir da medição do tempo de ida e volta, que é dependente da velocidade de propagação das ondas acústicas em um determinado meio, é possível avaliar-se a natureza dos materiais subjacentes e as dimensões das feições geológicas observadas. A **Tabela 2 – Variações de velocidade de propagação do som em alguns materiais**, apresenta a velocidade das ondas compressãois (onda P) em diversos materiais. Observa-se nesta tabela, que um mesmo material pode apresentar distintas velocidades de propagação, se considerarmos seu estado físico (saturado em água, fraturado etc.). Ressalta-se que também na água, o som se propaga com distintas velocidades, a depender, principalmente, da temperatura, salinidade e pressão.

Entende-se por **investigação rasa de ambientes submersos rasos** aquela que se desenvolve com o objetivo de atender demandas relacionadas às investigações geológico – geotécnicas para obras de engenharia e do meio ambiente. Neste contexto, é comum o emprego de métodos geofísicos que oferecem resolução, ao menos submétrica, na investigação de ambientes com coluna d'água inferior a 50 m. Este valor é, de certa forma, arbitrário, mas, representa, efetivamente, o limite da espessura da coluna d'água de ambientes onde se

desenvolve a maior parte dos empreendimentos em água. Observa-se ainda que, a investigação rasa pode também ocorrer em ambientes profundos. Não raramente, informações sobre substrato raso em mar profundo são necessárias como suporte técnico a projetos de implantação de plataformas exploratórias, cabos e dutos submarinos, na indústria de óleo, gás e telecomunicações. Entretanto, a presente ABGE Norma 200 e outras normas da ABGE sobre geofísica, a serem publicadas, referem-se às técnicas geofísicas de investigação rasa de ambientes submersos rasos.

Ao abordar o uso ou a ocupação de áreas submersas rasas e sua importância para a sociedade, devem ser evocados temas relacionados à investigação geológica básica, à erosão costeira, à erosão de margens de rios e de reservatórios, a projetos de expansão de portos e marinas, a obras civis como, túneis, pontes, barragens, estações de energia renovável (solar, marés, ondas e ventos), a operações de dragagem, a projetos de cabos e dutos subaquáticos, de hidrovias, a prospecção de recursos minerais e de recursos pesqueiros, a projetos de regeneração de praias, à arqueologia subaquática, a operações de busca e salvamento, entre muitos outros. O apropriado desenvolvimento destes temas passa necessariamente pelo estudo detalhado dos ambientes geológicos submersos no qual a geofísica e, em especial, os métodos acústicos/sísmicos têm muito a contribuir.

5.1 Finalidades/aplicações

As principais aplicações dos métodos geofísicos empregados em levantamentos de ambientes submersos rasos (rios, lagos naturais e artificiais, áreas costeiras – plataforma continental interna) são:

- determinação da espessura da coluna d'água/topografia de fundo;
- identificação de estruturas sedimentares na superfície de fundo;
- mapeamento de paleocanais enterrados, estruturas de escavação e preenchimento;
- mapeamento da cobertura sedimentar (classificação de fundo, contatos geológicos);
- mapeamento de estruturas geológicas (lineamentos, falhas etc.);
- mapeamento de áreas de exsudação de gás;

- caracterização da estratigrafia rasa (determinação da espessura das camadas de sedimentos inconsolidados em suporte a projetos de dragagem, assoreamento de reservatórios, entre outros);
- mapeamento de depósitos de interesse mineral (material de construção etc.);
- determinação da profundidade do embasamento rochoso;
- mapeamento de áreas favoráveis à implantação de cabos e dutos;
- mapeamento de dutos e cabos subaquáticos instalados;
- arqueologia subaquática e operações de busca e salvamento.

5.2 Métodos

Os principais métodos geofísicos aplicados na investigação de ambientes submersos, na busca de solução para as questões listadas acima, e abordados neste Manual, são:

5.2.1 *Métodos Acústicos*

- Batimetria (BAT);
- Sonar de Varredura Lateral (SVL);
- Perfilagem Sísmica Contínua (PSC).

5.2.2 *Outros métodos geofísicos aplicados na investigação de ambientes submersos*

- Eletrorresistividade: Caminhamento Elétrico/Imageamento (CE/Im);
- Métodos Eletromagnéticos: Radar de Penetração do Solo (GPR);
- Métodos Potenciais: Magnetometria (MAG).
- Câmeras Acústicas;
- Laser Scanner Subaquático;
- Veículo Submersível Operado Remotamente (ROV)
- Filmagens.

Ressalta-se que, nesta publicação, não são abordados os métodos de Sísmica de Refração e de Sísmica de Reflexão multicanal (2D ou 3D) em água,

tendo em vista que não são ainda amplamente utilizados no Brasil com foco em investigações geológico – geotécnicas. São raros os ensaios de Sísmica de Refração desenvolvidos no Brasil, que objetivam determinar a velocidade de propagação das ondas acústicas nas camadas sedimentares. Ensaio de Sísmica de Reflexão multicanal (2D) têm sido utilizados na Europa (Mar do Norte) e nos Estados Unidos, visando à caracterização geotécnica detalhada de trechos da plataforma continental interna em projetos de obras civis de grande porte, tais como: plataformas exploratórias, parques eólicos, túneis, entre outros. Ensaio de Sísmica de Reflexão 3D e 4D, focados em projetos de engenharia no mar, ainda estão em desenvolvimento em todo o mundo. Atualmente, a aplicação desses métodos de investigação sísmica é cara e complexa, sob o ponto de vista operacional e a relação custo/benefício talvez não tenha justificado, até este momento, sua ampla aplicação em projetos de engenharia em áreas costeiras do Brasil. Esta relação deve se alterar nos próximos anos, tendo em vista não só a evolução tecnológica, que certamente tornará o custo operacional mais acessível, como também o grande potencial de desenvolvimento de projetos de energia renovável em áreas *offshore* no Brasil.

5.3 Tabela resumo

As principais aplicações dos métodos acústicos na investigação de ambientes submersos rasos estão apresentadas na **Tabela 3**.

6 PERSPECTIVAS

Os métodos geofísicos de investigação têm evoluído muito rapidamente frente às demandas da sociedade e aos avanços tecnológicos. Sistemas de monitoramento geofísico de estruturas, em tempo real, como barragens, de água ou de rejeitos de mineração, estão em pleno desenvolvimento, e certamente representarão um papel importante nos próximos anos no contexto do emprego da geofísica na engenharia, com destaque para os métodos de Microsísmica, da Eletroresistividade e do Potencial Espontâneo.

Com relação à sísmica terrestre, tem se tornado cada vez mais relevante os métodos que determinam a velocidade da onda de cisalhamento (V_s) e,

consequentemente, o módulo de rigidez dinâmico (G_0), um importante parâmetro para a engenharia geotécnica. O método MASW (item 4.2.1) vem sendo cada vez mais utilizado em projetos de fundações, como por exemplo, parques eólicos, estradas, entre outros. Os ensaios *Crosshole* e *Downhole* devem se consolidar nos próximos anos como técnicas de investigação de maciços terrosos, em projetos de fundações de edifícios pois, se executados sistematicamente e em conjunto com outros ensaios geotécnicos de campo e de laboratório, fornecem resultados que podem representar uma enorme economia, reduzindo os custos das fundações de uma obra, particularmente em solos lateríticos.

A evolução tecnológica é também uma componente importante no desenvolvimento da investigação geofísica de áreas submersas. O método de Perfilagem Sísmica Contínua empregando fontes ressonantes, por exemplo, passou nestes últimos anos a empregar espectros de frequências entre 20 kHz e 50 kHz, outrora não utilizadas no campo da Perfilagem Sísmica Contínua, adicionando grande capacidade de resolução ao método, no processo de investigação de detalhe das camadas sedimentares subsuperficiais. Sistemas de Perfilagem Sísmica Contínua de varredura já estão em desenvolvimento e prometem revolucionar a área de inspeção subaquática, garantindo ampla cobertura, em uma única passada, na inspeção de áreas submersas visando projetos de dutos e de cabos submarinos.

Inexorável será o desenvolvimento de inteligência artificial para viabilizar o processamento e a interpretação da grande quantidade de dados adquiridos pelos métodos geofísicos em geral. A disponibilização, a custos acessíveis, de processamento nas nuvens por computadores de alto desempenho ocupará também importante papel no desenvolvimento das aplicações dos métodos geofísicos.

Outro aspecto a se destacar na evolução tecnológica da investigação de áreas submersas é o advento de veículos autônomos visando, em especial, a inspeção subaquática. Prevê-se que nos próximos cinco anos toda a inspeção subaquática será efetivada por embarcações não tripuladas (AUV ou ASV), quicá também os levantamentos geofísicos rotineiros em áreas submersas.

A utilização de pequenos veículos aerotransportados (drones ou *vants*) portando sensores geofísicos (magnéticos, eletromagnéticos etc.) na investigação em terra e em áreas submersas, também se encontra em pleno desenvolvimento e certamente passarão a ser instrumentos de rotina na investigação geofísica, com foco na engenharia, em especial, de áreas com acesso restrito.

Métodos hoje utilizados apenas na prospecção de hidrocarbonetos no mar, como Sísmica de Reflexão Multicanal 3D e 4D, e a Sísmica de Refração, certamente se tornarão viáveis também para aplicação em projetos de engenharia, em especial para suporte a obras de grande porte em áreas *offshore*, como parques eólicos e túneis, entre outros.

7 PRINCIPAIS PARTICIPANTES

Editor: João Jeronimo Monticelli

Autores: Luiz Antonio Pereira de Souza e Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Colaboradores: Adalberto Aurélio Azevedo (Consultor), Adriano Marchioreto (Alta Resolução), Aluizio Oliveira Júnior (Delfos Marítima), Anita Gomes Oliveira (UFBa), Antonio Celso de Oliveira Braga (Consultor), Arthur Ayres Neto (UFF), Augustinho Rigoti (Gideon), César Alexandre Félix (Tessec Serviços Marítimos), Debora Silveira Carvalho, (Geofísica Consultoria), Deborah Durgin e Carol A. Morrissey (Klein Marine Systems), Eduardo Rodrigues e Hasan Aktarakçi (AGI), Fábio Novais e Kayque Bergamaschi (Rural Tech), Garry Kozak (Edgetech), Geraldo Cunha (Microars), Gerrit Olivier e Tjaart de Wit (IMS), John Gann e Ashley Chan (Chesapeake), José Domingos Faraco Gallas (IGC-USP), Juliano Vitorino e Fábio Miranda (Neogeo), Kim Olá e Tom Olá (Meridata), Kinoshita Yasumasa (Serviço Geológico do Japão – GSJ) – *in memoriam*, Leonardo Santana, Eduardo Yassuda, Camila Rodrigues e Lorena Andrade Oliveira (Tetra Tech), Lisa Brisson e Damon Wolfe (Echo81), Luis Américo Conti (USP Leste), Marco Ianniruberto (UNB), Marcos Saito de Paula (JS Geologia Aplicada), Mariucha da Silva (Consultora), Mascimiliano de los Santos Maly (IO-USP), Michel Michaelovitch de Mahiques (IO-USP), Mike Brissette (R2Sonic), Moysés Gonzales Tessler (Consultor), Nabil Alameddine (Ministério Público do Estado de São Paulo), Oleg Bokhonok (UNISANTOS), Régis Gonçalves Blanco (*in memoriam*), Carlos Alberto Birelli, Vicente Luiz Galli e Leonides Guireli Netto (IPT), Renato Luiz Prado (IAG-USP), Roberto Bianco (INPH), Rodolfo Jasão Soares Dias (Subgeo), Sérgio Augusto Palazzo (SAP Service Engenheiros Consultores) e Sérgio Correia (Belov).

8 REFERÊNCIAS

BENSON, R. C.; GLACCUM, R.; NOEL, M. **Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration**. Las Vegas: U.S. EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1984. 236 p. (NTIS PB84-198449).

BORTOLOZO, C. A. *et al.* Aplicação do Método Eletromagnético no Domínio do Tempo (TDEM) para mapeamento do maciço rochoso da Formação São Roque, São Paulo-SP. *In* INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 14., 2015, Rio de Janeiro. **Expanded Abstracts[...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2015. 1 CD-ROM.

COOK, Mike *et al.* (ed.). **Guidance notes for the planning and execution of geophysical and geotechnical ground investigations for offshore renewable energy developments**. London: Society for Underwater Technology, 2014. 49 p. (Offshore Site Investigation and Geotechnics Committee).

EATON, D. W.; VAN DER BAAN, M.; INGELSON, A. Terminology for fluid-injection induced seismicity in oil and gas operations. **CSEG Recorder**, p. 24–28, Apr. 2016.

GANDOLFO, O. C. B; PRADO, R. L.; SOUZA, L. A. P. (Organizadores). III Workshop de geofísica aplicada à engenharia e meio ambiente. Vários autores. São Paulo: ABGE/SBGf, 2003, 92 p.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. Standards for Hydrographic Surveys. **S-44 Edition 6.0.0**. Principauté de Monaco: IHO, 2020. 50 p.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. [S.L.]: Marinha do Brasil, 2017. 94 p. (NORMAM-25/DHN).

OLIVIER, G. *et al.* Monitoring the stability of tailings dam walls with ambient seismic noise. **The Leading Edge**, v. 36, n. 4, p. 350a1-350a6, Apr. 2017.

PORSANI, J. L.; MOUTINHO, L. ASSINE, M. L. GPR survey in the Taquari River, Pantanal Wetland, West-Central Brazil. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR*, 10., 2004, Delft, Netherlands. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2004.

RICCOMINI, C. *et al.* The Colônia structure, São Paulo, Brazil. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 46, n. 11, p. 1630–1639, 2011.

SOUZA, L. A. P. ; GANDOLFO, O. G. B. Geofísica aplicada. *In: Oliveira, A.M.S.; Monticelli, J.J.(Editores.): Geologia de engenharia e ambiental, Volume 2 – Métodos e Técnicas, Cap. 15. São Paulo: ABGE, 2018.*

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. 311 f. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, L. A. P.; MIRANDA FILHO, O. F.; MAHIQUES, M. M. Perfilagem sísmica em águas rasas: qual a melhor fonte acústica? *In: Simpósio Brasileiro de Geofísica*, 3., 2008, Belém. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: SBGf, 2008.

SOUZA, L. A. P. *et al.* Geophysical methods to support ocean outfall monitoring: a side-scan application. *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OUTFALL SYSTEMS*, 2011, Mar del Plata, Argentina. **Proceedings** [...]. Madrid: IAHR/IWA, 2011.

9 REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS

Cabe ao usuário da presente publicação cotejar a mesma com outras normas (diretrizes, guias, manuais, boletins técnicos, instruções e artigos técnicos, em geral), nacionais e estrangeiras, visando harmonização e melhor aplicação prática nos projetos. No presente caso, recomenda-se considerar, dentre outras, as seguintes publicações:

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília: ANA, 2011. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15935**: Investigações ambientais – Aplicação de métodos geofísicos. Rio de Janeiro, 2011. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117-1**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2020. 64 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D4428**: Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. West Conshohocken, 2007. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6431**: Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation, West Conshohocken, 2005. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D5753**: Standard Guide for Planning and Conducting Borehole Geophysical Logging. West Conshohocken, 2005. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D5777**: Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2006. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6430**: Standard Guide for Using the Gravity Method for Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2005. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6432**: Using the Surface Ground Penetration Radar Method for Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2005. 17 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6639:** Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations. West Conshohocken, 2008. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6432:** Using the Surface Ground Penetrating Radar Method

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D6820:** Standard Guide for Use of the Time Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2007. 15 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7128:** Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2005. 25 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7400:** Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. West Conshohocken, 2008. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7128:** Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2005. 25 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7400:** Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. West Conshohocken, 2008. 11 p.

NORMA ABGE 100/2023. Investigações geológico-geotécnicas para obras de infraestrutura – Métodos e técnicas. São Paulo: ABGE, 2023.

10 LEITURAS RECOMENDADAS

ATHERTON, M. K. Echoes and Images. *In: The Encyclopedia of Side-Scan and Scanning Sonar Operations*. Vancouver: OysterInk Publications, 2011. 456 p.

AYRES NETO, A. Uso da Sísmica de Reflexão de alta resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, p. 241-256, 2002.

AYRES NETO, A.; BAPTISTA NETO, J. A. Métodos diretos e indiretos de investigação do fundo oceânico. *In*: PONZI, V. R.A.; BAPTISTA NETO, J. A.; SICHEL, S. E. (org.). **Introdução à Geologia Marinha**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciências, 2004. p. 127-151.

AYRES NETO, A.; RODRIGUES, G. P.; ALVARENGA, I. D. Seabed Mapping with HISAS Sonar for decommissioning projects. **Sea Technology**, Arlington, Virginia, USA, p. 15-18, 25 set. 2017.

BIRELLI, C. A. *et al.* Integração de perfilagens ótica, acústica e elétrica para fins de avaliação ambiental de aquíferos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 1, 2004, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: SBGf, 2004.

BLONDEL, P. **The handbook of sidescan sonar**. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2009. 316 p.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 159 p.

CARRIO, J. A. *et al.* Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales em el Litoral. *In*: **Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo**. Espanha: Cytel, 2009. 325 p. (Manualles Cytel).

CONTI, L. A.; RODRIGUES, M; HANOT, B. Hydroelectric Power Plant Inspections. **Hydro: The Global Magazine for Hydrography**, v. 20, n. 4, p. 16-19, 2016.

DANIELS, J. J. Fundamentals of ground penetrating radar. *In*: **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. Golden, Colorado: Society of Engineering and Mineral Exploration Geophysicists, 1989. p. 62-142.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531-551, 1989.

DE WIT, T.; OLIVIER, G. **Imaging and monitoring tailings dam walls with ambient seismic noise**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. p. 455-464.

DÉCOURT, L. *et al.* Maximum shear modulus of a Brazilian lateritic soil from in situ and laboratory tests. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION*, 5., 2016, Queensland, Australia. Proceedings [...]. Sydney: Australian Geomechanics Society, 2016. 5 p.

DELATIM, I. J. *et al.* **Manual de sondagens**. *In: MONTICELLI, J.J. (Ed.)*. Investigações geológico-geotécnicas para obras de infraestrutura – Guia de boas práticas. São Paulo: ABGE, 2023. p. 87-241.

DOBECKI, T. L.; ROMIG, P. R. Geotechnical and groundwater geophysics. **Geophysics**, v. 50, n. 12, p. 2621-2636, 1985.

DOURADO, J. C. **A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos “in situ”**. São Paulo: ABGE, 1984. 12 p. (artigos técnicos da ABGE, n.8).

DOURADO, J. C.; CORDEIRO, R. P.; TAIOLI, F. A aplicação da tomografia sísmica no zoneamento de maciços. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 7, 1993, Poços de Caldas. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE. 1993. v. 1, p. 211-218.

DUARTE, O. O. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: SBGf, 2011. 379 p.

FELIX, C.; AYRES NETO, A.; Souza, L. A. P. Scouting for energy cable route for an Island off Rio. **Sea Technology**, p. 14 – 16, 2017.

FERREIRA, I. O. *et al.* Modelo de incerteza para sondadores de feixe simples. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 5, p. 863-881, maio/jun. 2016.

FISH, J. P.; CARR, H. A. **A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data**. 2. ed. Orleans: Lower Cape Publishing, 1990. 188 p.

FONSECA, L.; MAYER, L. Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data. **Marine Geophysical Researches**, v. 28, p. 119-126, 2007.

FOTI, S. Combined use of geophysical methods in site characterization. *In*: COUTINHO, R. Q.; MAYNE, P. W. (eds). **Geotechnical and geophysical site characterization**. London: Taylor & Francis Group, 2013. p. 43-61.

GALLAS, J. D. F. O método do potencial espontâneo (SP) – uma revisão de suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 2, n. 23, p. 133-144, 2005.

GALLAS, J. D. F. Self-potential (SP) generated by electrokinesis – efficiency and low cost dam safety. **Journal of Applied Geophysics**, v. 180, p. 104122, Sept. 2020.

GALLI, V.L.; BLANCO, R. G.; IYOMASSA, W. S. GPR and electrical resistivity applied to detect small tunnels. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Expanded Abstracts [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2003. 1 CD-ROM.

GALLI, V. L.; IYOMASA, W. S.; SILVA, V. D. Magnetometria aplicada na localização de artefatos metálicos. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFISICA, 1, 2004, São Paulo. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2004. 1 CD-ROM.

GANDOLFO, O. C. B. **Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): um estudo comparativo**. 1999. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Rio Claro, 1999.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GIACHETI, H. L. *et al.* Comparação entre resultados de ensaios sísmicos down-hole e cross-hole no campo experimental da UNESP de Bauru. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 13, 2006, Curitiba. **Anais [...]**. São Paulo: ABMS, 2006. v. 2, p. 669-674.

GREENHOUSE, J. P. Environmental geophysics: It's about time. **Geophysics: The Leading Edge of Exploration**, v. 10, n. 1, p.32-34, 1991.

GRIFFITHS, D. H.; KING, R. F. **Applied geophysics for geologists & engineers – the elements of geophysical prospecting**. 3. ed. Oxford: Pergamon Press, 1983. 230 p.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC)**. Principauté de Monaco: IHO, 2020. 28 p.

JONES, E. J. W. **Marine geophysics**. Baffins Lane, Chichester: John Willey & Sons, 1999. 466 p.

KAMEI, R.; NAKATA, N.; LUMLEY, D. Introduction to microseismic source mechanisms. **The Leading Edge**, v. 34, n. 8, p. 876–880, Aug. 2015.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 438 p. (Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho).

LANKSTON, R. W. High-resolution refraction seismic data acquisition and interpretation. *In: Geotechnical and Environmental Geophysics*. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1990. p. 45-73.

LIMA, O. A. L. **Propriedades físicas das rochas – bases da geofísica aplicada**. Rio de Janeiro: SBGf, INCT-GP, 2014.

LOPES, I.; SANTOS, J. A.; ALMEIDA, I. M. O método das ondas superficiais: aquisição, processamento e inversão. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 11., 2008, Coimbra. **Atas [...]**. Coimbra: Universidade de Coimbra, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008. 24 p.

LURTON, X. **An introduction to underwater acoustics: principles and applications**. Chichester, UK: Praxis Publishing, 2002.

MAZEL C. **Side scan sonar training manual**. Salem, NH: Klein Associates, Inc., 1985.

MILSON, J. **Field geophysics**. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2003. 227 p.

NERY, G. G. **Perfilagem geofísica em poço aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo**. Rio de Janeiro: SBGf INCT-GP, 2003.

PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**. 5. ed. London: Chapman and Hall, 1997. 429 p.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. Multichannel analysis of surface waves. **Geophysics**, v. 64, n. 3, p. 800-808, 1999.

POLETO, C. (org.). **Ambientes e sedimentos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008. 404 p.

PRADO, R. L. **O ensaio sísmico entre furos (“crosshole”) no estudo de maciços terrosos e rochosos**. 1994. 123 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

PRADO, R. L. 2000. **A sísmica de reflexão rasa e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: um estudo na cidade de São Paulo – SP, Brasil**. 2000. 177 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Rio Claro, 2000.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 796 p.

SHARMA, P. V. **Environmental and engineering geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 475p.

SHERIFF, R. E. **Encyclopedic dictionary of applied geophysics**. 4. ed. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 2002. 429 p.

SOUZA, L. A. P. SBP 3.5, 7, 10 kHz, Chirp (05 – 2.0 kHz), Chirp (2 – 12 kHz), Chirp (10 – 18 kHz), Boomer (0.5 – 2 kHz) e Sparker (01 – 1 kHz): quando decidir por uma ou por outra fonte acústica? *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 12., 2011, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2011.

SOUZA, L. A. P.; MARRANO, A.; IYOMASA, W. S. Geofísica aplicada a estudos de lagos em áreas urbanas. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 1., 2004, São Paulo. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2004.

STEEPLES, D. W. Engineering and environmental geophysics at the millennium. **Geophysics**, v. 66, n. 1, p. 31-35, 2001.

TAIOLI, F. *et al.* Boulders mapping by using resistivity imaging survey. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 11, 2009, Salvador. **Expanded Abstracts [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2009. (CD-ROM).

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 770 p.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. Hydrographic Surveying. Engineer Manual n. 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C. USA, 2013.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Geophysical exploration for engineering and environmental investigations**. San Francisco: University Press of the Pacific, 2005. 220 p.

VOGELSANG, D. **Environmental geophysics: a practical guide**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 173 p.

WARD, S. H. Resistivity and induced polarization methods. In: **Geotechnical and environmental geophysics**. Houston: Society of Exploration Geophysicists, 1990. v. 1, p.147-189.

11 GLOSSÁRIO

Análise de ruído: ensaio utilizado na Sísmica de Reflexão, antes do levantamento propriamente dito, para a definição de um espaçamento ótimo entre o ponto de tiro e o primeiro geofone do arranjo, a fim de registrar os eventos de reflexão, fora da influência de outros eventos sísmicos indesejados.

Anomalia: desvio da uniformidade de uma determinada propriedade física medida, possibilitando que um alvo seja identificado e/ou mapeado por um método geofísico.

AUV: sigla do inglês para *Autonomous Underwater Vehicle*, um veículo submersível operado remotamente sem cabos conectados à embarcação.

Base sísmica: arranjo de geofones e pontos de tiro, dispostos em um alinhamento, utilizados nos métodos da Sísmica de Refração, Sísmica de Reflexão e MASW.

Bobina: fios ou cabos enrolados dentro de um dispositivo que, quando energizados, geram um campo magnético.

Boomer: termo em inglês para designar uma fonte acústica do tipo impulsiva que normalmente lida com frequências entre 500 Hz e 2.000 Hz. Alguns modelos podem lidar com frequências mais altas.

Cargabilidade: propriedade física medida pelo método da Polarização Induzida (IP), no domínio do tempo, e que expressa a capacidade de o terreno carregar-se em função de um fluxo de corrente.

Chirp (*Compressed High Intensity Radar Pulse*): termo em inglês para designar uma fonte acústica do tipo ressonante que lida com frequências entre 2 kHz e 20 kHz. Existem modelos que lidam com frequências entre 20 kHz e 50 kHz.

Common Depth Point (CDP): denominação em inglês para técnica de aquisição de dados de Sísmica de Reflexão, mais robusta que a técnica do *common offset*, onde são registradas todas as reflexões em um conjunto de geofones, respeitando-se o espaçamento ótimo (definido pela análise de ruído). O arranjo é movido ao longo da linha do levantamento, possibilitando a múltipla cobertura de pontos em subsuperfície (CDP), aumentando a resolução.

Common Mid Point (CMP): denominação em inglês para técnica de aquisição de dados de sísmica de reflexão, similar à técnica CDP.

Common offset: denominação em inglês para técnica de aquisição de dados de Sísmica de Reflexão, mantendo-se o espaçamento ótimo (definido pela análise de ruído) constante durante todo o levantamento.

Condutividade elétrica: é a facilidade de um material em conduzir corrente elétrica. É o inverso da resistividade elétrica.

Crawler: termo em inglês que, na investigação subaquática, significa veículos que se movem na superfície de fundo por sistemas de correias, como tanques ou tratores, portando equipamentos de observação ou de medição.

Domínio da frequência: termo que se refere às medidas analisadas de acordo com o seu conteúdo de frequências.

Domínio do tempo: termo que se refere às medidas analisadas de acordo com o seu comportamento ao longo do tempo.

Empilhamento: registros de dados geofísicos (sísmicos e GPR) digitalmente somados, com o objetivo de melhoria da razão sinal/ruído.

Gal: unidade de medida do campo gravitacional da Terra, utilizada no método da Gravimetria, equivalente a 1 cm/s².

Galvânico: termo que designa o contato direto de um dispositivo com o terreno, tendo por objetivo introduzir uma corrente elétrica no subsolo.

Geofone: instrumento sensível ao movimento de partículas, utilizado para transformar a energia sísmica em uma voltagem elétrica, constituindo o sensor comumente utilizado nos métodos sísmicos terrestres.

GNSS (Global Navigation Satellite System): é o nome dado para os sistemas de satélites que possibilitam a localização de qualquer ponto na superfície terrestre (fornece as coordenadas). O sistema é atualmente composto pelos satélites GPS (americano), GLONASS (russo), GALILEO (europeu), BeiDou (Chinês) e o QZSS (japonês).

Gradiômetro: magnetômetro composto por dois sensores e que é utilizado para medir o gradiente vertical do campo magnético da Terra.

Gravímetro: instrumento empregado no método da Gravimetria utilizado para medir as variações da atração gravitacional. A unidade de medida da aceleração da gravidade é comumente o miligal (10^{-3} gal), sendo que 1 gal equivale a 1 cm/s^2 .

Hidrofones: sensores sensíveis à variação de pressão na coluna d'água que são dispostos na superfície da água para receberem os sinais de retorno das fontes acústicas.

Impedância acústica: parâmetro dado pela multiplicação da velocidade da onda sísmica pela densidade do meio no qual ela se propaga.

Interpretação: é o procedimento que consiste na transformação das medidas geofísicas (propriedades físicas) em estruturas e feições identificadas em subsuperfície.

Inversão: é o processo de obtenção de um modelo da subsuperfície, por meio de algoritmos matemáticos, consistente com os dados geofísicos obtidos em campo. Fornece soluções não únicas, das quais deverá ser selecionada a mais plausível.

Magnetômetro: equipamento utilizado para medir a intensidade do campo magnético da Terra, comumente expressa em unidades de nanoTesla (nT).

Magnitude: medida quantitativa do tamanho do terremoto e que está relacionada com a energia sísmica liberada no foco e com a amplitude das ondas registradas pelos sismógrafos. Para cobrir todos os tamanhos de terremotos,

desde os microtremores de magnitude negativas até os grandes terremotos com magnitudes superiores a 8, foi idealizada uma escala logarítmica sem limites.

Microssismo: evento sísmico de pequena intensidade, geralmente não perceptível por seres humanos e que pode ser registrado apenas por equipamentos com grande sensibilidade.

Modelo direto: é um procedimento matemático que prediz o dado que seria obtido em campo, partindo-se de um modelo teórico. Este modelo de subsuperfície é constituído pela distribuição das propriedades físicas envolvidas, a partir do qual é calculada a “resposta do modelo”, resultando em um conjunto de dados simulados.

Modelo inverso: é o processo que utiliza as medidas de um levantamento (dado de campo) para obter um modelo com a distribuição em subsuperfície das propriedades físicas envolvidas (inversão). Sua obtenção é, fundamentalmente, o objetivo do processamento de dados geofísicos.

Módulos elásticos dinâmicos: são parâmetros, E (módulo de Young), ν (coeficiente de Poisson), G (módulo de rigidez ou de cisalhamento), K (módulo de incompressibilidade), que podem ser calculados a partir da velocidade da onda P, da onda S e da densidade do material.

Nadir: na acústica, significa um ponto ou uma linha na superfície de fundo projetada na vertical a partir da posição ou do alinhamento da embarcação na rota de navegação.

Nó: unidade utilizada para expressar a velocidade de uma embarcação e que equivale a uma milha náutica por hora ou 1.852 m/h.

Ondas sísmicas: é uma perturbação elástica que se propaga de ponto a ponto através de um meio. As ondas sísmicas podem ser classificadas em: ondas de corpo (ondas P e ondas S) e ondas de superfície (ondas Rayleigh e ondas Love).

Ponto de tiro: local na superfície do terreno onde é artificialmente gerada uma onda sísmica por uma fonte de energia.

Refletor sísmico: linha contínua, ou não, identificada em uma seção Sísmica de Reflexão e de Perfilagem Sísmica Contínua, que representa o contato entre dois meios geológicos com impedâncias acústicas distintas.

Resistividade elétrica aparente: é o valor medido na superfície do terreno influenciado por todas as resistividades elétricas em subsuperfície existentes no volume medido.

Resistividade elétrica: é a grandeza física correspondente à dificuldade de um material em conduzir corrente elétrica. É o inverso da condutividade elétrica.

Resistivímetro: equipamento que executa as medidas de resistividade elétrica aparente do terreno em unidades de ohm x m.

Resolução horizontal (lateral): espaçamento mínimo entre pontos de medidas em superfície, de maneira que um alvo ou feição possa ser identificado/mapeado ou individualizado, no caso da existência de alvos ou feições muito próximos(as) entre si.

Resolução vertical: é a distância mínima, em profundidade, que deve existir entre dois alvos ou feições, de modo que possam ser reconhecidos(as) individualmente por meio de algum método geofísico.

ROV: sigla do inglês para *Remotely Operated underwater Vehicle*, utilizada para designar um veículo submersível operado remotamente através de cabos conectados à embarcação.

Ruído ambiental: distúrbio indesejável que contamina o sinal, gerado por vibrações, linhas de energia elétrica, presença de estruturas metálicas em superfície etc., que podem afetar negativamente a aplicação de determinado método geofísico.

SBP: *Subbottom Profiler*: Sigla do inglês utilizada para designar equipamentos sísmicos que fazem Perfilagem Sísmica Contínua

SEG: sigla da entidade técnica-científica *Society of Exploration Geophysics*.

Sismógrafo: instrumento ou sistema que registra as ondas sísmicas e gera os sismogramas.

Sismograma: gravação de um registro composto por traços sísmicos em uma base de tempo, que exhibe a chegada das ondas originadas de diferentes eventos (diretas, refratadas, refletidas e outras).

Suscetibilidade magnética: é a propriedade física medida pelo método da Magnetometria, diretamente relacionada ao conteúdo de minerais ferromagnéticos (principalmente magnetita) de rochas ou solos. É uma grandeza adimensional.

WARR: sigla do inglês que significa *Wide Angle Refraction and Reflection*, uma técnica de aquisição de dados com GPR, que possibilita determinar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio.

Tabela 1 – Métodos geofísicos utilizados na investigação em terra e suas principais aplicações.

APLICAÇÕES	MÉTODOS SÍSMICOS						MÉTODOS ELÉTRICOS				MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS			MÉTODOS POTENCIAIS		PERFI-LAGEM
	REFRA	REFLEX	SW	CH	DH	TOMO	CE/Im	SEV	SP	IP	GPR	FDEM	TDEM	MAG	GRAV	PERF
Caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico																
Determinação da espessura de material inconsolidado e da profundidade do topo rochoso	A	B	A			A	A	A			B		B		B	A
Estratigrafia geológica/geotécnica	A	A	A			A	A	A			A	B	A			A
Localização de falhas com grande rejeito	B	A					A						B	B	B	
Localização de zonas fraturadas							A				A	A	B			A
Localização de diques de rochas básicas							B							A		
Localização de matacões	B						A				B					
Localização de paleocanais	A	B	A				B				A					
Detecção de zonas carstificadas, vazios e cavidades rasas	B		A			A	A				A	B			A	
Análise de escorregamentos e caracterização de encostas	A	B	A				A		B		B					
Determinação da profundidade do nível d'água	B						A	A			A	B				
Determinação da direção do fluxo de água subterrânea e de fluxos preferenciais							B		A							
Identificação de zonas com maior percolação de água em maciços							A		B		B	B				
Identificação do contato entre água doce e salgada em regiões costeiras							A	A		B	A	A	A			

A= primeira escolha (método preferencial); B= segunda escolha (método alternativo); Em branco = o método não deve ser utilizado

Tabela 1 – Continuação

APLICAÇÕES	MÉTODOS SÍSMICOS						MÉTODOS ELÉTRICOS				MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS			MÉTODOS POTENCIAIS		PERFI-LAGEM
	REFRA	REFLEX	SW	CH	DH	TOMO	CE/lm	SEV	SP	IP	GPR	FDEM	TDEM	MAG	GRAV	PERF
Contaminantes e fontes de contaminação																
Identificação e mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos							A			B	A	A	B			
Identificação e mapeamento de plumas de contaminantes orgânicos							B			B	A	B				
Delimitação de valas, cavas, trincheiras e aterros							A			B	A	B				
Identificação de salinidade nos solos							B			B	B	A	B			

A= primeira escolha (método preferencial); B= segunda escolha (método alternativo); Em branco = o método não deve ser utilizado

Tabela 1 – Continuação

APLICAÇÕES	MÉTODOS SÍSMICOS						MÉTODOS ELÉTRICOS				MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS			MÉTODOS POTENCIAIS		PERFI-LAGEM
	REFRA	REFLEX	SW	CH	DH	TOMO	CE/Im	SEV	SP	IP	GPR	FDEM	TDEM	MAG	GRAV	PERF
Caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia																
Determinação de módulos elásticos dinâmicos de maciços para engenharia geotécnica e de fundações	B		B	A	A	B										B
Determinação do grau de escarificabilidade de maciços	A			B	B	B										
Determinação da resistividade elétrica para projetos de aterramento, proteção catódica e estudos de corrosão							A	A								
Inspeção de pavimentos			B								A					
Inspeção de estruturas de concreto											A					

A= primeira escolha (método preferencial); B= segunda escolha (método alternativo); Em branco = o método não deve ser utilizado

Tabela 1 – Continuação

APLICAÇÕES	MÉTODOS SÍSMICOS						MÉTODOS ELÉTRICOS				MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS			MÉTODOS POTENCIAIS		PERFILAGEM
	REFRA	REFLEX	SW	CH	DH	TOMO	CE/Im	SEV	SP	IP	GPR	FDEM	TDEM	MAG	GRAV	PERF
Outras aplicações																
Detecção de utilidades enterradas em ambientes urbanos (dutos, galerias, adutoras, cabos)											A	B	B	B		
Localização de objetos enterrados (tanques, tambores)											A	A	A	B		
Identificação de fuga d'água em corpos de barragens e lagoas de rejeitos							A		A		B	B				
Identificação de alvos rasos para fins arqueológicos e forenses											A	B	B	A		

A= primeira escolha (método preferencial); B= segunda escolha (método alternativo); Em branco = o método não deve ser utilizado

Tabela 2 – Variações de velocidade de propagação do som em alguns materiais.

MATERIAL	Vp (m/s)
Solos, sedimentos não consolidados	200-500
Solos consolidados secos, argilas compostas	600 - 1200
Solos saturados	1500 - 1900
Sedimentos inconsolidados saturados	1500 - 2000
Rochas sedimentares sãs, não fraturadas	2000 - 4500
Rochas ígneas/metamórficas altamente fraturadas ou alteradas, arenitos alterados e/ou fraturados	1900 - 2800
Rochas ígneas/metamórficas pouco alteradas e/ou fraturadas, arenito são	2900 - 3900
Rochas ígneas/metamórficas sãs, não fraturadas	4200 - 6000
Aço	5500 - 5800
Concreto	3500 - 4500
Água	1450 - 1550
Ar	340

Obs.: Nesta tabela, rochas “sedimentares sãs/arenito são” correspondem às rochas sedimentares resistentes, classificadas como coerentes a muito coerentes na geologia de engenharia; “arenitos alterados” correspondem a rochas friáveis, pouco coerentes.

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 3 – Principais aplicações dos métodos acústicos/sísmicos na investigação de áreas submersas rasas. Fonte: elaborado pelos autores.

INVESTIGAÇÃO	MÉTODOS ACÚSTICOS		FREQUÊNCIA	PRINCIPAL CARACTERÍSTICA
SUPERFÍCIE DE FUNDO (morfologia; obstruções)	Imageamento	Sonar de Varredura Lateral	>100 kHz	<ul style="list-style-type: none"> mapeamento de tipos de fundo; cartografia de obstruções e detritos náuticos, arqueologia, operações de busca e salvamento.
	Batimetria	Sonar Interferométrico Sonar Multifase Sonar Multifeixe	200 kHz < 700 kHz	<ul style="list-style-type: none"> identificação da espessura da coluna d'água; cartografia de obstruções e detritos náuticos, arqueologia subaquática, operações de busca e salvamento; mapeamento da espessura da coluna d'água; mapeamento de obstruções.
		Monofeixe	30 kHz < 200 kHz	<ul style="list-style-type: none"> mapeamento da espessura da coluna d'água.
SUBSUPERFÍCIE DE FUNDO (espessura das camadas de sedimentos)	Perfilagem Sísmica Contínua (Fontes acústicas ressonantes)	<i>Chirp</i> Fonte Paramétrica Pinger SBP em geral	2 kHz < 50 kHz	<ul style="list-style-type: none"> mapeamento da espessura das camadas subsuperficiais de sedimentos inconsolidados; mapeamento de obstruções alongadas (dutos e cabos submarinos); resolução centimétrica a decimétrica; a penetração na coluna sedimentar pode alcançar alguns metros.
	Perfilagem Sísmica Contínua (Fontes acústicas impulsivas) (Fonte acústica ressonante)	<i>Sparker</i> Boomer Bubble-gun <i>Chirp</i> de baixa frequência	100 Hz < 2 kHz	<ul style="list-style-type: none"> mapeamento estrutural; espessura das camadas de sedimentos inconsolidados; profundidade do embasamento rochoso; penetração pode alcançar dezenas de metros na coluna sedimentar.

Obs.: outros métodos geofísicos aplicáveis na investigação de ambientes e áreas submersas: GPR, Eletrorresistividade, Métodos potenciais, Câmeras acústicas, Laser scanner subaquático, ROV e Filmagem.