

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 204/2023
1ª Edição, 2023

**INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM ÁGUA –
MÉTODOS ACÚSTICOS: BATIMETRIA E SONAR
DE VARREDURA LATERAL PARA INVESTIGAÇÃO
DE SUPERFÍCIE SUBMERSA E PERFILAGEM
SÍSMICA CONTÍNUA PARA INVESTIGAÇÃO DE
SUBSUPERFÍCIE SUBMERSA**

NORMA ABGE 204
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 - 204/2023 : investigação geofísica
em água : métodos acústicos : batimetria e sonar
de varredura lateral para investigação de
superfície submersa e perfilagem sísmica contínua
para investigação de subsuperfície submersa / Luiz
Antonio Pereira de Souza, Otávio Coaracy Brasil
Gandolfo. -- 1. ed. -- São Paulo : ABGE, 2023.

Vários colaboradores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-88460-19-1

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

CDD-628
-624.151
-624.15

23-179471

Índices para catálogo sistemático:

1. Geofísica aplicada 628
2. Geologia de engenharia 624.151
3. Geotecnia 624.15

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

Sugestão de referência bibliográfica:

Souza, L. A. P.; Gandolfo, O. C. B. ABGE NORMA 204/2023 – Investigações geofísica em água - métodos acústicos: batimetria e sonar de varredura lateral para investigação de superfície submersa e perfilagem sísmica contínua para investigação de subsuperfície submersa. 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 participantes 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 aplicarem 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	4
1. INTRODUÇÃO	6
2. FINALIDADE	7
3. EQUIPAMENTOS, PROCEDIMENTOS E INFORMAÇÕES GERAIS	9
4. MÉTODO ACÚSTICO DE INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE SUBMERSA - BATIMETRIA	11
4.1 Vantagens	12
4.2 Limitações	14
4.3 Aquisição de dados.....	15
4.4 Processamento e apresentação dos resultados.....	19
5. MÉTODO ACÚSTICO PARA INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE SUBMERSA – SONAR DE VARREDURA LATERAL/IMAGEAMENTO	22
5.1 Breve descrição do método.....	22
5.2 Vantagens	26
5.3 Limitações.....	26
5.4 Aquisição de dados.....	27
5.5 Processamento e apresentação dos resultados.....	30
6. MÉTODO DE PERFILAGEM SÍSMICA CONTÍNUA PARA INVESTIGAÇÃO DE SUBSUPERFÍCIES SUBMERSAS.....	32
6.1 Breve descrição do método.....	33
6.2 Vantagens	34
6.3 Limitações.....	35
6.4 Aquisição de dados.....	37
6.5 Planejamento de linhas sísmicas.....	39
6.6 Escolha da fonte acústica	39
6.7 Processamento, interpretação e apresentação dos resultados.....	44
7. PRINCIPAIS PARTICIPANTES	47
8. REFERÊNCIAS/LEITURAS RECOMENDADAS	48
9. REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS	49
ANEXO 1 – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	50

APRESENTAÇÃO

A Norma ABGE 204/2023 apresenta os **métodos acústicos para investigação de superfícies submersas (batimetria e sonar de varredura lateral) e de investigação de subsuperfície submersa (perfilagem sísmica contínua)**. Essa Norma deve ser cotejada com a “Norma ABGE 200/2023 – Investigações geofísicas – Métodos e técnicas”, norma essa que fornece informações de âmbito conceitual, dentre elas as que possibilitam a escolha dos métodos mais adequados para aplicação da geofísica em estudos, projetos e obras de engenharia e as de natureza ambiental.

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 204/2023 possibilita aprofundar o entendimento dos principais métodos geofísicos acústicos aplicáveis em água: 1) a batimetria e o sonar de varredura lateral para investigação de **superfície submersa**, e; 2) a perfilagem sísmica contínua para investigação de **subssuperfície submersa**.

A presente norma tem por base o conteúdo do livro “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente – Manual de boas práticas” (Souza e Gandolfo, 2021), publicado 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 autores e colaboradores do livro “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente – Manual de boas práticas”, publicado pela ABGE em 2021.

João Jeronimo Monticelli

Editor

Fábio Soares Magalhães

Presidente da ABGE – Gestão 2023-2024

1 INTRODUÇÃO

Para aprimorar o conhecimento dos conceitos básicos e dos fundamentos e aplicabilidade dos métodos sísmicos em terra e em água, recomenda-se a leitura das várias publicações disponíveis na literatura geofísica, como as mencionadas na NORMA ABGE 200/2023, itens Referências Bibliográficas, Leituras Recomendadas e Referências Normativas e Diretivas. Recomenda-se, ainda, consultar o Glossário publicado naquela Norma.

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 do uso e ocupação do mar, rios e de reservatórios de água. Os maiores riscos em projetos desta natureza encontram-se justamente nas incertezas com relação às condições geológicas e geotécnicas dos solos submersos onde serão implantadas as estruturas, a se destacar a presença de: falhas, solos moles ou duros, paleocanais, rocha, sismicidade e gás em sedimentos, entre outros. As primeiras fontes de informações utilizadas, para minimizar os riscos decorrentes das condições geológicas e geotécnicas das áreas de interesse, são os ensaios geotécnicos (intrusivos) e os ensaios geofísicos, também denominados de métodos não destrutivos (COOK *et al.*, 2014).

Os **principais métodos geofísicos aplicados na investigação em água**, na busca de solução para as questões listadas anteriormente, são os **Métodos Acústicos**, listados a seguir:

- **Investigação de superfícies submersas:** Batimetria (BAT) e o Imageamento através de Sonar de Varredura Lateral (SVL);
- **Investigação de subsuperfícies submersas:** Perfilagem Sísmica Contínua (PSC).

Outros métodos geofísicos em água, como eletrorresistividade, eletromagnéticos, potenciais, câmeras acústicas, laser scanner subaquático e filmagem serão abordados à parte, na NORMA ABGE 205/2023.

Ressalta-se que 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. 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.

2 FINALIDADE

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

- 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;
- inspeção de dutos e cabos subaquáticos;
- arqueologia subaquática e operações de busca e salvamento.

O Quadro 1 detalha as finalidades dos métodos acústicos/sísmicos tratado na presente publicação.

Quadro 1 – Principais aplicações dos métodos acústicos/sísmicos na investigação de áreas submersas rasas.

INVESTIGAÇÃO	MÉTODOS ACÚSTICOS	FREQUÊNCIA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES	
SUPERFÍCIE DE FUNDO (morfologia; <i>backscatter</i> ; obstruções e detritos náuticos)	Imageamento	Sonar de Varredura Lateral	100 kHz < 1500 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • classificação dos tipos de fundo; • cartografia de obstruções e detritos náuticos; • arqueologia subaquática; • operações de busca e salvamento.
	Batimetria de Varredura	Sonar Interferométrico	200 kHz < 700 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • mapeamento da espessura da coluna d'água; • classificação dos tipos de fundo (<i>backscatter</i>); • cartografia de obstruções e detritos náuticos; • arqueologia subaquática; • operações de busca e salvamento.
		Sonar Multifase Sonar Multifeixe		
Batimetria	Monofeixe	30 kHz < 200 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • mapeamento da espessura da coluna d'água; • classificação dos tipos de fundo. 	

INVESTIGAÇÃO	MÉTODOS ACÚSTICOS	FREQUÊNCIA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES	
SUB-SUPERFÍCIE DE FUNDO (espessura das camadas de sedimentos; profundidade do topo rochoso)	Perfilagem Sísmica Contínua (Fontes acústicas ressonantes)	<i>Chirp</i> Fonte Paramétrica <i>Pinger</i> SBP em geral	2 kHz < 50 kHz	<ul style="list-style-type: none"> espessura das camadas sub-superficiais de sedimentos inconsolidados; mapeamento de obstruções alongadas enterradas (dutos e cabos submarinos); resolução centimétrica a decimétrica; a penetração na coluna sedimentar pode alcançar alguns metros.
	Perfilagem Sísmica Contínua (Fontes acústicas impulsivas) (Fontes acústicas ressonantes)	<i>Sparker</i> <i>Boomer</i> <i>Bubble-gun</i> <i>Chirp</i> de baixa frequência	100 Hz < 2 kHz 500 Hz – 8 kHz	<ul style="list-style-type: none"> mapeamento estrutural; espessura das camadas de sedimentos inconsolidados; profundidade do embasamento rochoso; resolução métrica penetração na coluna sedimentar pode alcançar dezenas de metros.

Fonte: elaborado pelos autores.

3 EQUIPAMENTOS, PROCEDIMENTOS E INFORMAÇÕES GERAIS

O **ANEXO 1** complementa as informações sobre equipamentos e procedimentos dos **métodos acústicos**, simplificada e tratada nesse item 3.

São vários os métodos acústicos empregados na investigação de áreas submersas e o diferencial entre eles está basicamente relacionado ao espectro de frequências emitido pelas fontes acústicas, que por sua vez, está relacionado com o objetivo da investigação (superfície/subsuperfície e/ou resolução/penetração), conforme ilustrado na Figura 1.

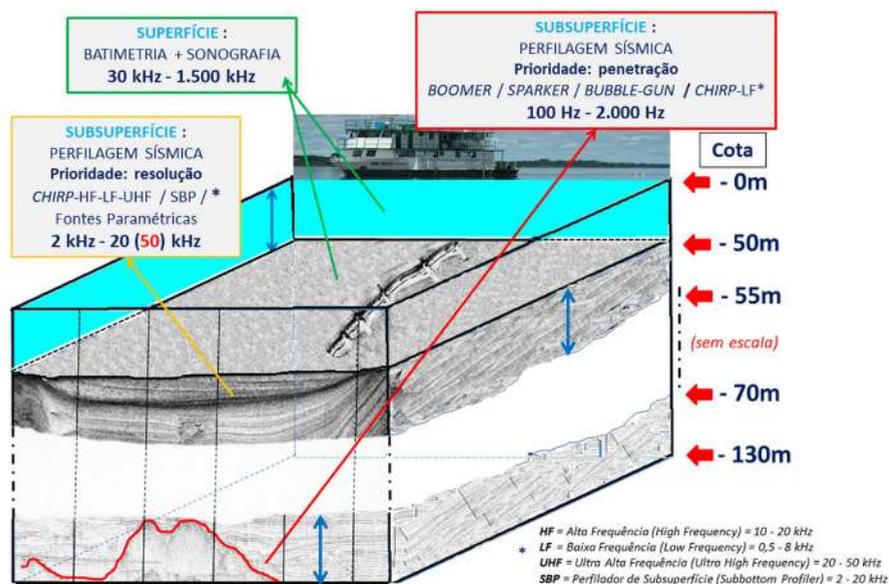


Figura 1 – Principais métodos acústicos empregados na investigação de áreas submersas rasas.

Fonte: elaborada pelos autores.

A maioria dos métodos geofísicos (ABGE NORMA 200/2023) 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 1 apresenta a velocidade das ondas compressionais (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.

Tabela 1 – Velocidade de propagação das ondas sísmicas compressoriais (P) em alguns materiais.

Material	V_p (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

Fonte: elaborada pelos autores.

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.

4 MÉTODO ACÚSTICO DE INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE SUBMERSA - BATIMETRIA

A Batimetria é uma técnica acústica muito bem normatizada e os levantamentos são categorizados por vários parâmetros e critérios definidos em normas técnicas, sendo que as mais importantes vigentes no Brasil são: a NORMAM-25 (MARINHA DO BRASIL, 2017) e a Publicação Especial nº 44 (S-44) da autoridade internacional IHO (INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2020). A presente Norma enfatiza aspectos gerais relativos ao controle de qualidade na operação de aquisição e processamento

de dados, bem como a descrição dos produtos a serem apresentados (entregáveis) oriundos de levantamentos desta natureza.

A **Batimetria tem por objetivo** determinar a espessura da coluna d'água. Como consequência da evolução tecnológica da engenharia acústica e da informática, os modernos ecobatímetros possuem sistemas de registro digitais e periféricos com grande capacidade de armazenamento e de processamento dos dados. Dessa forma, além da medição com alta precisão da espessura da coluna d'água, possibilitam a coleta simultânea de informações acústicas adicionais, tais como os níveis de energia dos sinais de retorno (*backscatter*), dados estes que contribuem para a caracterização da natureza da superfície de fundo. Sinais de retorno da coluna d'água podem também ser gravados e têm vasta aplicação no estudo de massas d'água.

Sistemas multifeixes mais recentes permitem a gravação simultânea de dados de diferentes frequências (modo multiespectral). Gravar uma mesma linha com diferentes frequências só era possível, até então, com a execução (repetição) de tantas linhas quantas frequências se desejasse amostrar um mesmo local da superfície de fundo. A nova antena modelo 2026, da empresa R2Sonic, que permite gravação de até cinco distintas frequências em uma mesma passada, é um bom exemplo de transdutores de última geração com essa capacidade.

As ondas acústicas são emitidas pelos ecobatímetros a partir de transdutores acústicos instalados no casco ou na lateral da embarcação. Constata-se uma tendência atual de instalação de todo o aparato acústico em veículos autônomos.

4.1 Vantagens

Os sistemas batimétricos atualmente disponíveis no mercado possibilitam a precisa determinação da espessura da coluna d'água, seja por meio do sistema monofeixe (SBES) ou dos sistemas batimétricos de varredura do tipo multifeixe (MBES), interferométrico ou multifase. Os sistemas batimétricos de varredura, embora mais caros, possibilitam a cobertura de 100% da área investigada, o que não é possível com o emprego dos sistemas monofeixes, mesmo com execução de perfis (linhas de investigação) muito próximos entre si. As principais regras, atualmente vigentes no mercado hidrográfico, exigem a

utilização de sistemas batimétricos de varredura para levantamentos de áreas portuárias, hidrovias e reservatórios de água. No caso de áreas portuárias, a necessidade de cobertura de 100% da superfície de fundo está diretamente relacionada a questões de segurança de navegação e, no caso de reservatórios de água, à necessidade de uma maior precisão nos cálculos de volume de água armazenada.

O emprego de sistemas do tipo monofeixe ainda é importante, pois possibilita a aferição geral dos sistemas acústicos a bordo e garante a coleta de dados em ambientes extremamente rasos, onde os sistemas batimétricos de varredura tradicionais (MBES) podem não oferecer uma relação custo/benefício satisfatória.

Exemplo de mapa batimétrico de alta resolução, oriundo de um levantamento de um reservatório de água, pode ser observado na Figura 2, e de uma área portuária, na Figura 3. Nestes dois exemplos os produtos foram obtidos por meio de um sistema multifeixe (MBES) cobrindo 100% da superfície de fundo.

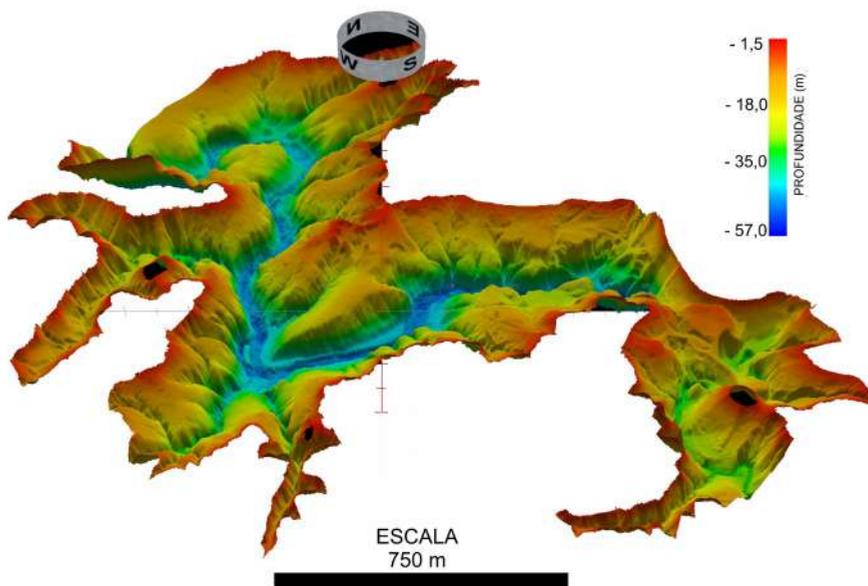


Figura 2 – Exemplo de um produto obtido de um levantamento batimétrico multifeixe (MBES) com cobertura de 100% da superfície de fundo. Reservatório da UHE – Queimados, MG. Dados coletados pelo sistema batimétrico de varredura *Reson T50P*.

Fonte: cortesia da Rural Tech Comércio e Serviços.

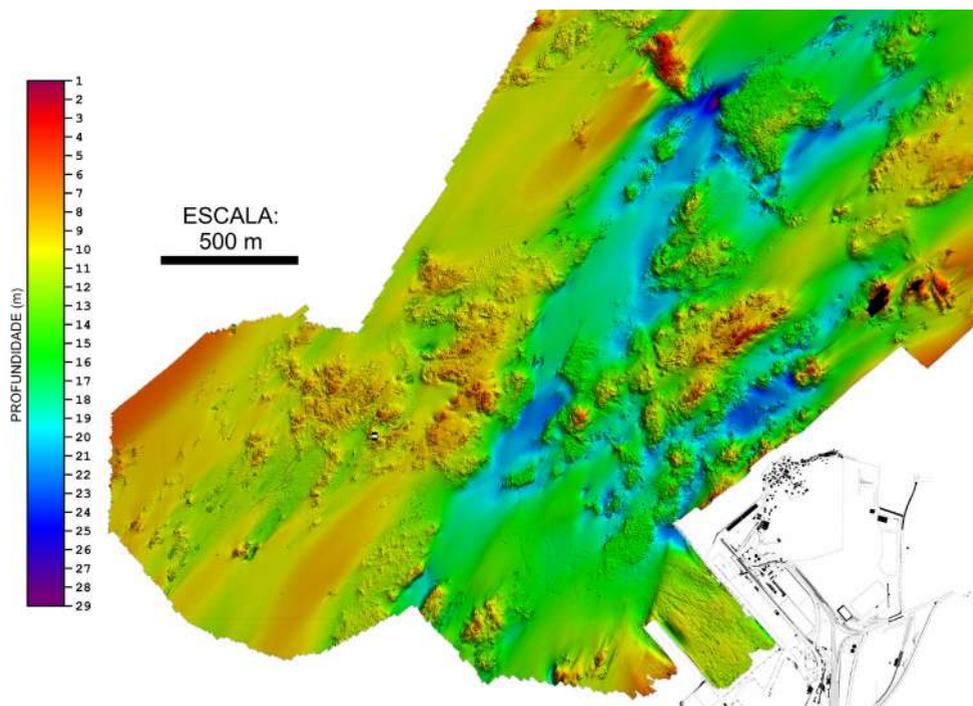


Figura 3 – Exemplo de um produto obtido de um levantamento batimétrico multifeixe com cobertura de 100% da superfície de fundo de área portuária (Porto São Francisco do Sul, SC). Dados coletados pelo sistema batimétrico de varredura (MBES) R2Sonic 2024.

Fonte: cortesia da Belov.

4.2 Limitações

De maneira geral, não existem limitações para o emprego da Batimetria na investigação de ambientes submersos, já que, para cada objetivo, foram desenvolvidos equipamentos apropriados, compostos por transdutores de portes distintos e que lidam com frequências adequadas a cada ambiente a ser investigado. O produto oriundo do emprego de sistema monofeixe sempre conterá áreas não cobertas pelo levantamento e, portanto, processos de interpolação matemática de dados serão empregados para geração do produto final (mapa batimétrico). Há de se considerar, no entanto, que os sistemas monofeixes são de operação mais simples e, assim, oferecem um menor custo operacional, além de maior rapidez no levantamento. Por outro lado, os sistemas batimétricos de varredura possibilitam cobertura de 100% da área investigada, mas, além de preços mais elevados, têm a operação de aquisição e processamento

de dados mais complexa, exigindo profissionais habilitados para garantir a qualidade do produto final.

O sucesso de um levantamento batimétrico está diretamente associado não só à escolha apropriada da fonte acústica, mas também dos periféricos do sistema, a se destacar: o sistema de posicionamento DGPS (*Differential Global Positioning System*), os sensores de movimentos e os sistemas de medição do nível da superfície da água, tais como, maré ou nível d'água de rios e reservatórios de água. Esses elementos compõem o sistema de aquisição de dados e têm um papel crucial para garantir a qualidade do produto final. Não raramente, são os periféricos os responsáveis pela maior fonte de inconsistências em levantamentos hidrográficos, daí a importância da aferição e do controle de qualidade destes instrumentos complementares ao levantamento.

4.3 Aquisição de dados

Ambos os sistemas batimétricos, monofeixe e de varredura, podem ser operados a partir de uma embarcação de pequeno porte e até mesmo a partir de embarcações autônomas. Técnicas de aquisição de dados de Batimetria Monofeixe, a partir de drones que arrastam sensores acústicos mergulhados na água, têm sido também aplicadas a levantamentos de pequenas áreas e/ou de áreas de acesso restrito de embarcações.

Nos levantamentos batimétricos, comumente, as embarcações navegam sobre rotas preestabelecidas, de forma a cobrir total ou parcialmente a área de interesse. É cada vez mais comum a execução de levantamentos batimétricos utilizando embarcações de pequeno porte com suporte para navegação autônoma, com veículos autoguiados ou conduzidos remotamente, ou seja, sem tripulação a bordo. A Figura 4 ilustra alguns dos modelos de sistemas autônomos (ASV – *Autonomous Surface Vehicle* ou USV – *Unmanned Surface Vehicle*) disponíveis no mercado.

Entre as vantagens do emprego de veículos autônomos, destacam-se: a economia nos custos operacionais, como tripulação, combustível, embarcação etc.; a inexistência de riscos à tripulação; a menor emissão de carbono e a possibilidade de execução de levantamentos em locais de difícil acesso às embarcações de porte normal. Adiciona-se, ainda a estas vantagens, o fato de

que as embarcações autônomas obedecem, de forma precisa, às rotas pré-programadas e possibilitam manobras mais restritas na operação de mudança de uma linha para outra, procedimentos que implicam economia de tempo e, por fim, menor custo operacional.



Figura 4 – Exemplos de veículos autônomos de superfície (ASV/USV) disponíveis no mercado, em levantamentos experimentais de demonstração durante a Feira Oceanology International (OI2018 Londres).

Fonte: fotografias dos autores.

Em linhas gerais, não é recomendada a utilização de sistemas batimétricos clássicos de varredura do tipo MBES em ambientes com profundidades menores do que 4 m, uma vez que, nestas condições, o cone acústico destes sistemas não se expande lateralmente para se ter, de forma suficiente, uma ampla e completa cobertura do fundo, o que acaba por proporcionar um levantamento com relação custo/benefício pouco satisfatória. Este fato decorre de que, comumente, os sistemas multifeixe do tipo MBES cobrem lateralmente uma faixa com extensão equivalente a três ou quatro vezes a espessura da coluna d'água.

Algumas soluções para levantamentos de áreas muito rasas podem passar pelo emprego de dois sistemas MBES (multifeixe) instalados em ângulos opostos (*dual head systems*), ou de sistemas SBES (monofeixes) com linhas

de pesquisa muito próximas umas das outras, embora neste último, não seja possível uma cobertura de 100% da superfície de fundo.

Uma alternativa mais recente para abordagem de ambientes muito rasos é o emprego dos sonares interferométricos e sonares multifase, que oferecem uma cobertura lateral equivalente a, pelo menos, sete ou oito vezes a espessura da coluna d'água, ou seja, mais que o dobro da cobertura lateral obtida nos sistemas multifeixe clássicos.

Em algumas situações especiais, como, por exemplo, levantamentos de áreas portuárias, arranjos em paralelo de sistemas monofeixe, operados simultaneamente e sincronizadamente, podem também ser aplicados em substituição aos sistemas monofeixe ou multifeixe clássicos. É importante ressaltar que, no caso do emprego de sistemas do tipo monofeixe, recomenda-se a utilização de transdutores com estreito feixe de sinais de forma a garantir maior diretividade e, assim, uma menor incerteza nas medidas. Incertezas nas medidas realizadas por sistemas monofeixe são proporcionalmente maiores à medida do aumento da largura do feixe de sinais e das irregularidades e/ou inclinação da superfície dos terrenos.

No caso de necessidade de quantificação de volumes, como por exemplo em estudos de reservatórios de água, a opção deve ser sempre pelo emprego de sistemas batimétricos de varredura, tendo em vista que estes métodos possibilitam a cobertura de 100% da área investigada, com a consequente minimização das incertezas no cálculo dos volumes. Cumpre salientar, todavia, que a opção pelo emprego de um sistema batimétrico monofeixe (SBES) ou de varredura (MBES, interferométrico ou multifase) deve ser definida caso a caso, uma vez que, nas fases iniciais de um projeto, podem não ser necessárias informações muito acuradas da superfície de fundo. Nestes casos, um levantamento com um sistema monofeixe (SBES) pode gerar um conjunto de dados suficiente para o devido suporte técnico à fase inicial, de estudos de viabilidade do projeto.

Observa-se, ainda, que existem dezenas de modelos de sistemas monofeixes no mercado, cada qual com propriedades e funções específicas com relação à área de aplicação. Entretanto, ressalta-se que, sistemas monofeixes empregados em lanchas de recreação, que visam a atividades de lazer e pesca, não são adequados para emprego em levantamentos batimétricos.

Quanto à disposição das linhas de investigação na área de interesse, o procedimento comum em levantamentos com sistemas monofeixe é, preferencialmente, posicioná-las perpendicularmente às curvas topográficas (curvas isobatimétricas). Ao se cortar a 90° as linhas de contorno, obtêm-se a melhor visualização da inclinação do terreno. Este raciocínio se inverte no caso de levantamentos com sistemas multifeixe, interferométrico ou multifase no qual as linhas de investigação são preferencialmente planejadas paralelamente às linhas de contorno isobatimétrico. Tal procedimento se deve ao fato de que a cobertura do sistema multifeixe varia com a profundidade, e, portanto, se executadas perpendicularmente às curvas de contorno, surgirão lacunas de recobrimento, já que a área coberta diminui proporcionalmente com a redução da espessura da coluna d'água. Nestes casos, para se garantir uma cobertura de 100% da área investigada, a distância entre as linhas se torna necessariamente um parâmetro dinâmico, que deve ser alterado à medida da evolução do levantamento, o que faz com que as linhas de levantamento não sejam paralelas. Assim, recomenda-se a execução de levantamentos multifeixe com linhas aproximadamente paralelas às linhas de contorno topográfico, já que a espessura da coluna d'água tende a se manter constante ao longo de um perfil, viabilizando o planejamento de linhas de investigação efetivamente paralelas. Neste caso, para a garantia de cobertura 100% da área investigada planeja-se a distância entre as linhas paralelas em função da espessura da coluna d'água.

Conforme mencionado anteriormente, as especificações técnicas para garantia e controle de qualidade de levantamentos batimétricos estão listadas nas referidas normas técnicas e, no caso de levantamentos batimétricos de reservatórios de água, importantes orientações se encontram no manual de atualização de curvas cota-área-volume da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011). Assim, em função dos objetivos de cada projeto, serão exigidas determinadas especificações técnicas dos sistemas de aquisição de dados, que passam pela determinação do tipo de receptores GNSS, pela capacidade de varredura dupla do sistema, densidade de pontos, largura do feixe de sinais, frequências contínuas (CW) e/ou moduladas (FM *chirp*), frequência de transmissão dos pulsos, número de feixes por transmissão, compensação automática do rumo da embarcação (*yaw*), acurácia do sensor de movimentos (*pitch*, *roll*, *yaw* e *heave*), capacidade do sistema de gravar dados de retroespalhamento acústico

(*backscatter*) e dados acústicos da coluna d'água, precisão no sistema de medição da velocidade do som, entre outras propriedades.

A Figura 5 ilustra os produtos distintos obtidos em uma mesma área de estudo empregando-se um sistema monofeixe e um sistema de varredura multifase. Neste exemplo, observa-se que, no mapa construído a partir de dados do sistema multifase, é possível delinear inúmeras feições na superfície de fundo que não são observáveis no mapa construído a partir de dados do sistema monofeixe.

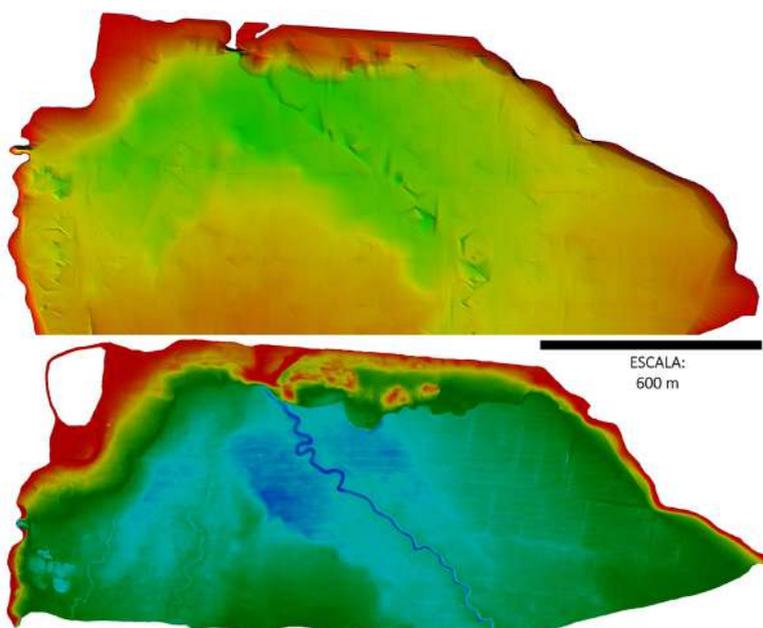


Figura 5 – Superfície batimétrica de um trecho de um reservatório de água obtida com o emprego de um sistema monofeixe (acima) e do sistema de varredura batimétrica multifase Edgetech 6205 (abaixo), mostrando a distinta capacidade de resolução de cada uma das técnicas batimétricas empregadas.

Fonte: elaborada pelos autores com dados processados por Damon Wolfe (Echo81).

4.4 Processamento e apresentação dos resultados

O produto principal, oriundo de levantamentos batimétricos, denomina-se mapa batimétrico, o qual é composto de linhas ou texturas coloridas que representam setores da superfície de fundo de mesma profundidade ou mesma espessura da coluna d'água. Nestes mapas observa-se a distribuição

das profundidades (ou da espessura da coluna d'água) ao longo da área investigada. Uma boa prática na geração dos mapas finais é a representação das profundidades em escala de cores, permitindo ao usuário final uma interatividade visual imediata com o produto. São considerados elementos obrigatórios em um mapa batimétrico: escala, grade de coordenadas, *datum* horizontal, *datum* vertical e detalhes sobre a redução, espaçamento e padrão de isolinhas, paleta de cores utilizada, equipamentos utilizados no levantamento e técnica de interpolação.

Os dados de Batimetria de varredura devidamente processados podem também ser apresentados na forma de mapas 3D de detalhe das feições de fundo, objeto de investigação, como exemplificado na Figura 6.

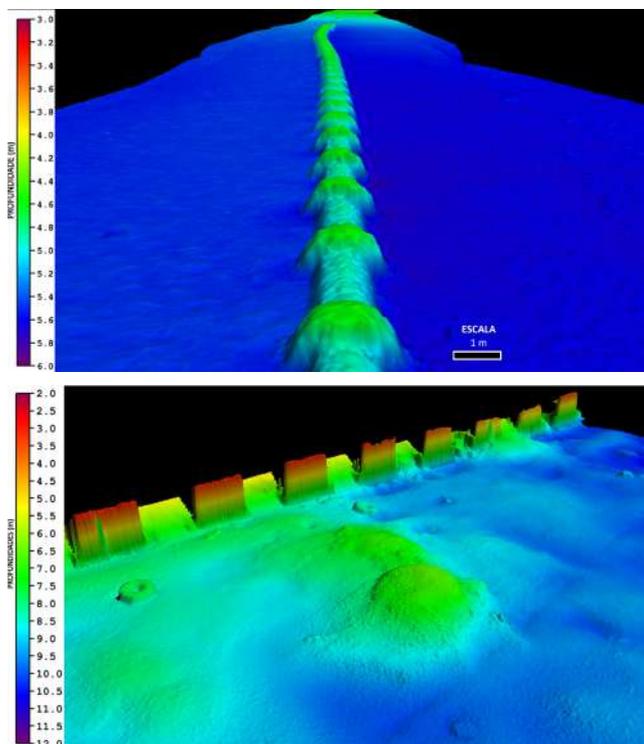


Figura 6 – Exemplos de produtos de levantamentos de Batimetria de varredura: acima, vista de detalhe de um emissário submarino; abaixo, vista de detalhe de um cais de porto, destacando-se na morfologia da superfície de fundo a presença de pneus abandonados e a estrutura do cais. Dados coletados com o sistema batimétrico de varredura do tipo Multifeixe (MBES) modelo Kongsberg EM-2040P.

Fonte: cortesia da Delfos Marítima.

Existem vários softwares disponíveis no mercado para processamento de dados de Batimetria, sejam eles oriundos de sistemas monofeixe, multi-feixe, interferométrico ou multifase. Qinsy/Qimera, PDS 2000, Hypack/Hysweep, Caris Hips & Sips, MDPS, EIVA e Sonarwiz são exemplos de softwares comerciais utilizados no Brasil. Talvez, dentre eles, vale destacar o Qimera, da QPS e o Caris Hips & Sips, da Teledyne Caris. O Qimera possui funções específicas para processamento de dados de retroespalhamento (*backscatter*) adquiridos em levantamentos com aquisição simultânea de diferentes frequências. Possui também algoritmos especiais de inversão, para correção da velocidade do som na água. O Caris Hips & Sips, utilizado por várias empresas e instituições de pesquisa do país, possui ferramentas inovadoras e exclusivas de processamento de dados de retroespalhamento (*backscatter*) e de classificação automática de ruído acústico que, baseada em inteligência artificial, possibilita ao usuário reduzir em até dez vezes o tempo de processamento dos dados, a depender da qualidade do levantamento. Todos os softwares disponíveis no mercado são excelentes e são alguns detalhes operacionais de cada um deles é que podem agradar um usuário ou outro. A opção por um ou por outro software está também relacionada diretamente ao preço, facilidades de pagamento, atendimento pós-venda, taxas de manutenção e atualização e, principalmente, ao conhecimento prévio do usuário.

Em relação aos entregáveis mínimos da contratação de um serviço de levantamento batimétrico, recomenda-se (Quadro 2):

Quadro 2 – Entregáveis recomendados de levantamentos batimétricos.

PRODUTO	FORMATO
Mapa batimétrico	PDF, DWG, DGN
Dados brutos	ASCII (SBES), XTF, GSF (MBES), e/ou formatos originais (do fabricante) dos dados oriundos dos sistemas multi-feixe e monofeixe
Dados reduzidos	XYZ(ASCII)
Dados de leitura de nível (nível d'água/maré)	ASCII
Croqui da embarcação com a geometria das instalações dos instrumentos (GPS, sensores de movimento, transdutores)	PDF, PNG, JPG e XLS

Fonte: elaborado pelos autores.

5 MÉTODO ACÚSTICO PARA INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIE SUBMERSA – SONAR DE VARREDURA LATERAL/IMAGEAMENTO

5.1 Breve descrição do método

O Sonar de Varredura Lateral (SVL) é uma ferramenta acústica utilizada com objetivo de mapear a superfície de fundo de áreas submersas. A imagem obtida pelo SVL é similar a uma fotografia aérea, que não pode ser utilizada na investigação de superfícies submersas tendo em vista a ausência de luz a partir de determinadas profundidades. Um exemplo de produto do Sonar de Varredura Lateral pode ser observado na Figura 7, que mostra a superfície de fundo do rio Araguaia, nas proximidades da cidade de Aruanã, GO, onde estão delineadas: as margens do rio, as estruturas submersas do cais da cidade, estruturas sedimentares e afloramentos rochosos. A Figura 8 ilustra outro excelente exemplo de imagem produzida por um Sonar de Varredura Lateral, neste caso, mostrando interessantes feições morfológicas da superfície de fundo da região de Abrolhos, no litoral sul do Estado da Bahia.

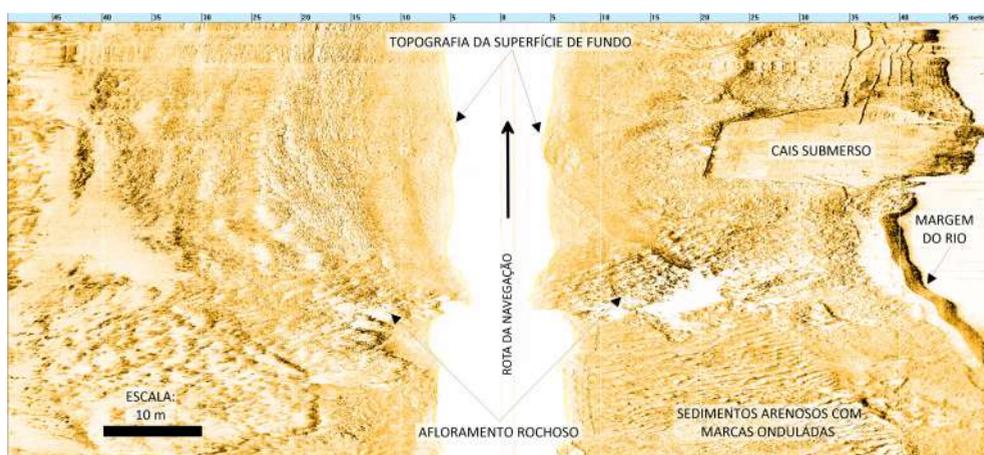


Figura 7 – Imagem do Sonar de Varredura Lateral (Klein 3000 / 500 kHz) do fundo do rio Araguaia. Dados obtidos nos arredores da cidade de Aruanã-GO em projeto IPT-AHITAR-Finep (Processo 1780/06).

Fonte: elaborada pelos autores.



Figura 8 – Imagem do Sonar de Varredura Lateral (Edgetech 4100 – 500 kHz) mostrando recifes de corais na superfície de fundo da região de Abrolhos, litoral sul do Estado da Bahia.

Fonte: cortesia do Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.

O Sonar de Varredura Lateral é composto de uma fonte acústica (“peixe”) imersa na água (Figura 9) que emite sinais em direções opostas ao longo de uma linha de navegação, permitindo que se mapeie a superfície de fundo, desde o ponto na vertical abaixo da embarcação (nadir) até uma distância lateral (alcance lateral), que é igual a 10 - 15 vezes o valor da espessura da coluna d’água abaixo da fonte acústica. Assim, a fonte acústica navegando, por exemplo, a 10 m de altura em relação à superfície de fundo, permite que se mapeie 100 m – 150 m de cada lado da rota de navegação, ou seja, cobre-se uma faixa do fundo equivalente a 200 m – 300 m de largura. Equipamentos com frequências maiores (> 300 kHz) permitem a observação de mais detalhes da superfície de fundo, mas, com prejuízo do alcance lateral, que comumente não ultrapassa 150 m – 200 m de cada lado da rota de navegação. Equipamentos com fontes acústicas que emitem frequências inferiores a 300 kHz geram imagens da superfície de fundo com menor resolução, mas, por outro lado, possuem maior capacidade de cobertura lateral e, assim, viabilizam o mapeamento de áreas maiores em um menor tempo. Sistemas que empregam frequências muito altas (> 900 kHz) possuem alto poder de resolução (centimétrica), mas um pequeno alcance lateral, cobrindo uma área da superfície de fundo com largura raramente superior a três ou quatro dezenas de metros. Pela reduzida capacidade de cobertura lateral, estes sonares devem navegar próximos da superfície de fundo, sendo comumente transportados por sistemas autônomos

(ROV ou AUV), de forma a garantir a devida aproximação dos sensores da superfície de fundo.



Figura 9 – Klein 3000 (100 kHz – 500 kHz), um dos modelos de Sonar de Varredura Lateral disponível no mercado e pertencente ao IPT.

Fonte: cortesia da Klein Marine Systems.

Comumente, levantamentos sonográficos são desenvolvidos em duas fases: a primeira utilizando-se de frequências baixas, de forma a garantir uma rápida e ampla cobertura da área de interesse e a segunda, empregando frequências mais altas e com foco nas áreas avaliadas como prioritárias na análise dos dados do sonar de baixa frequência. No caso de levantamentos de áreas com interesse na implantação de grandes projetos de obras civis (portos, parques eólicos, rotas de navegação etc.), comumente programa-se a cobertura de 100% da área com sistemas de alta frequência (> 400 kHz), tendo em vista que nestes tipos de projetos um mapeamento de detalhe se faz necessário.

A Sonografia tem vasta aplicação na investigação de áreas submersas sendo utilizada especialmente para identificar obstruções e detritos náuticos (cascos soçobrados, âncoras etc.) e no mapeamento geológico da superfície do fundo do mar, de rios e de reservatórios de água, visando ao suporte técnico para projetos de implantação de rotas de navegação, cabos e dutos subaquáticos, mineração subaquática, entre outros. Observa-se que são referidos como obstruções e detritos náuticos, qualquer corpo estranho na superfície de fundo com representatividade no projeto, comumente a partir de dimensões submétricas.

O Sonar de Varredura Lateral tem também vasta aplicação no monitoramento de estruturas submersas (cabos, dutos etc.), em operações de busca e salvamento e na arqueologia subaquática. A Figura 10 mostra um exemplo de produto da aplicação desta técnica no monitoramento de emissários submarinos. A Figura 11 apresenta o produto de uma operação de mapeamento de obstruções à navegação, mostrando um casco de navio soçobrado no canal do Porto de Santos.

Com base na análise de propriedades relacionadas às texturas das imagens coletadas pelo SVL, associada à análise táctil-visual de amostras de fundo, os mosaicos, gerados a partir da justaposição destas imagens, permitem também a caracterização geológica de superfícies submersas tais como: tipo de fundo, identificação de contatos litológicos, falhas e lineamentos.

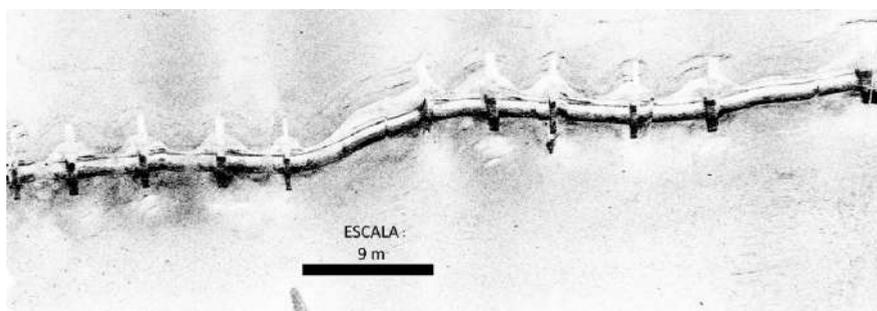


Figura 10 – Imagem do Sonar de Varredura Lateral (Klein 3000 – 500 kHz) mostrando um emissário submarino na região costeira de Santos, SP.

Fonte: Souza *et al.* (2011).



Figura 11 – Imagem do Sonar de Varredura Lateral (Klein 3000 – 500 kHz) mostrando um casco de navio soçobrado no canal do porto de Santos, SP.

Fonte: imagem coletada e processada pelos autores.

5.2 Vantagens

As imagens contínuas obtidas do Sonar de Varredura Lateral, visualizadas na tela do computador em tempo real, permitem ao operador o total controle de qualidade do processo de aquisição de dados. Possibilita também a análise e interpretação dos dados à medida do deslocamento da embarcação, o que viabiliza a tomada de decisões durante a operação de aquisição de dados, ação de extrema relevância, em especial quando se trata de operações de busca e salvamento.

No contexto de ambientes de águas rasas, esta ferramenta é a que possui maior produtividade, visto que, durante a aquisição de dados, a embarcação pode deslocar-se com velocidades superiores às exigidas nas operações de campo dos demais métodos geofísicos empregados na investigação destes ambientes.

5.3 Limitações

Em levantamentos com o Sonar de Varredura Lateral, a fonte acústica é rebocada a dezenas ou centenas de metros da popa da embarcação e, dessa forma, quando não se utilizam sistemas auxiliares de posicionamento acústico (USBL), a precisão do posicionamento dos dados adquiridos se deteriora proporcionalmente à extensão do cabo de conexão com a embarcação.

Observa-se que existem sistemas cuja fonte acústica é acoplada ao casco da embarcação e, nestes casos, não existem limitações com relação ao posicionamento das imagens adquiridas, já que a fonte acústica e o sistema de posicionamento possuem geometria fixa. Todavia, levantamentos que empregam esses sistemas são de aplicação restrita à investigação de áreas rasas (< 50 m de profundidade), tendo em vista a impossibilidade do manuseio, pelo operador, da distância entre a fonte acústica e a superfície de fundo, já que a fonte está fixa no casco da embarcação. É importante lembrar que o fator geométrico correspondente à distância da fonte acústica à superfície de fundo, constitui-se em um parâmetro de extrema relevância para garantir a qualidade e cobertura dos dados de sonografia, especialmente em levantamentos de áreas mais profundas.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é que, embora seja possível medir as dimensões de feições e de objetos nas imagens do Sonar de Varredura Lateral, esta técnica não fornece dados precisos de espessura da coluna d'água e, portanto, não pode ser empregada com a finalidade de obtenção de dados batimétricos. Exceção se faz a alguns modelos mais recentes, os quais possuem sensores acústicos batimétricos integrados ao sistema principal do sonar, que dessa forma coletam, simultaneamente, dados batimétricos e sonográficos. Ressalta-se que, assim como na Batimetria de varredura, os sinais emitidos pelo Sonar de Varredura Lateral tampouco penetram na coluna sedimentar. Em situações geológicas específicas (superfícies cobertas por sedimentos muito finos) os sinais emitidos por esses sistemas acústicos podem penetrar alguns centímetros na coluna sedimentar, o que pode, eventualmente, contribuir para a caracterização do tipo de fundo da área investigada ou, para a localização de uma embarcação naufragada e enterrada.

5.4 Aquisição de dados

A aquisição de dados de Sonar de Varredura Lateral deve obedecer a procedimentos básicos, que envolvem desde o planejamento de linhas de navegação retas, à necessidade de, ao longo do levantamento, manter-se a fonte acústica a uma distância do fundo entre 10% a 15% do alcance lateral designado. Assim, ao se decidir cobrir 100 m de cada lado da linha de navegação planejada e, portanto, cobrir-se uma faixa total de 200 m da superfície de fundo, é fundamental manter a fonte acústica a uma distância do fundo entre 10 m e 15 m, sob pena de se comprometer a qualidade dos dados e a cobertura, propriamente dita, da área investigada. Outro aspecto, não menos relevante, é a necessidade do permanente registro da extensão de cabo de conexão entre a fonte acústica e a embarcação, que pode ser alterada várias vezes ao longo do levantamento, face às necessidades operacionais (alterações abruptas da topografia de fundo etc.). Esse registro deve ser feito em planilhas apropriadas para aquisição de dados, mesmo quando essas alterações são automaticamente aplicadas e registradas internamente nos sistemas de aquisição de dados digitais. Essas anotações serão extremamente relevantes quando do processamento e da análise dos dados, as quais garantirão maior precisão no posicionamento das feições identificadas na superfície de fundo.

Para o mapeamento de obstruções, objetos ou estruturas de dimensões submétricas, são indicados os sistemas que empregam frequências mais altas (> 400 kHz) e que comumente têm alcances laterais de até 150 m de cada lado. Recomenda-se também que os levantamentos sejam executados a velocidades mais baixas, comumente abaixo de 5 nós (9,2 km/h), visando a garantir uma resolução adequada das imagens. Alguns modelos de SVL de última geração possuem mais de uma fonte acústica (sistemas multipulsos), que atuam sincronizadamente emitindo pulsos de forma alternada, possibilitando que o levantamento se desenvolva em maior velocidade, com garantia da plena cobertura da superfície de fundo em menor tempo. Este tipo de sistema tem grande aplicação em projetos cujo tempo disponível para a investigação de uma determinada área é elemento vital para sua consecução.

Outro aspecto importante, relativo aos procedimentos operacionais de aquisição de dados desta técnica, é que, em operações de busca ou salvamento, ou de aproximação de alvos de interesse (por exemplo, mapeamento detalhado de embarcações naufragadas), o planejamento das linhas de investigação deve prever que o objeto da busca esteja posicionado próximo da área central do alcance lateral escolhido. É neste setor que o sistema acústico tem seu melhor desempenho em termos de qualidade da imagem. Em outras palavras, não é a melhor opção navegar com o Sonar de Varredura Lateral exatamente sobre o ponto de interesse. Normalmente, planeja-se a disposição das linhas, de forma que os pontos de interesse estejam localizados a uma distância da linha de navegação aproximadamente igual à metade do alcance lateral escolhido.

O adensamento das linhas, de forma a prover ao menos uma cobertura da superfície de fundo de 200% (incluindo o nadir), é recomendado. Estes parâmetros (distância entre as linhas e cobertura) devem ser calculados na etapa de planejamento da campanha de aquisição de dados. Observa-se que alguns sistemas de última geração, como é o caso do modelo Klein Ma-X View 600, a cobertura da área correspondente ao nadir é realizada por uma fonte acústica auxiliar que opera simultaneamente à fonte principal. Com o emprego destes sistemas, poupa-se da necessidade de planejamento de linhas com cobertura do nadir, o que contribui para o levantamento de uma determinada área em um menor tempo, aumentando a produtividade deste método de investigação. A Figura 12 ilustra uma imagem do fundo marinho oriunda deste sistema.

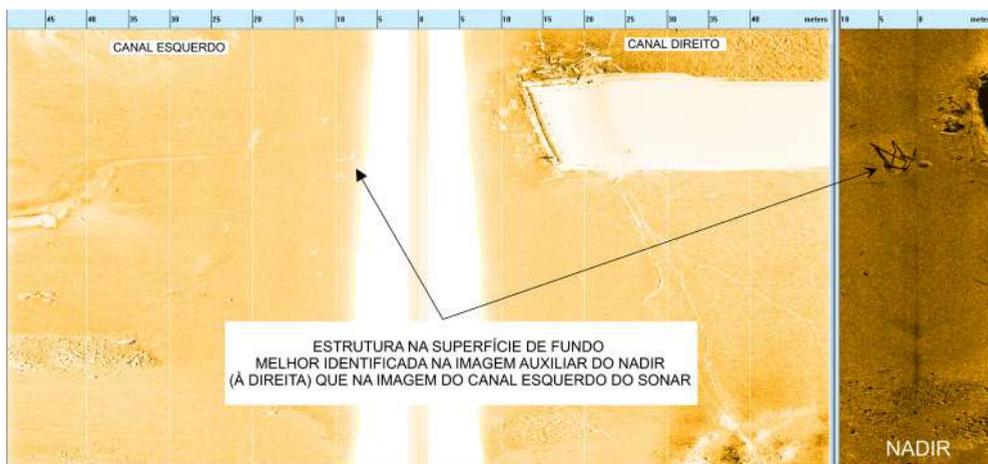


Figura 12 – Exemplo de um registro coletado por um Sonar de Varredura Lateral (Klein Ma-X View 600) de última geração, com capacidade de cobertura da área do nadir. Observa-se na figura à direita, a melhor identificação da estrutura observada exatamente na área do nadir na imagem principal.

Fonte: cortesia da Klein Marine Systems.

Quando o objetivo do projeto é caracterizar grandes áreas, devem ser empregados sistemas que utilizam frequências mais baixas (< 300 kHz), que possuem maior alcance lateral (algumas centenas de metros). Esses sistemas possibilitam a cobertura total de uma determinada área num menor intervalo de tempo.

A coleta de amostras da superfície de fundo, com pelo menos análise táctil-visual para aferir os diferentes padrões texturais das imagens, devem ser intrínsecas ao planejamento das atividades de investigação, pois garantirão a correlação entre as texturas identificadas nas imagens do SVL e a sua natureza geológica.

Observa-se que, em ambientes com profundidades maiores que 50 m, a correção do posicionamento da fonte acústica, utilizando apenas a extensão do cabo, é imprecisa, tornando-se mandatário o emprego de sistemas de posicionamento acústico auxiliares do tipo USBL (*Ultra-Short Baseline*).

Sonares de Varredura Lateral são produzidos atualmente com várias finalidades, desde recreativas até profissionais. Os modelos profissionais são mais robustos e oferecem resultados mais compatíveis com as demandas de projetos de engenharia. Gerenciamento de ruídos, técnica multipulso, fontes

acústicas auxiliares para cobertura da área do nadir, foco dinâmico, entre outras características, diferenciam os modelos com finalidades recreativas daqueles com finalidades profissionais. Recomenda-se a consulta a especialistas da área no momento da contratação desse tipo de levantamento, ou para a aquisição de equipamentos, pois são grandes as possibilidades de comprometimento do projeto caso ocorra algum equívoco na escolha do equipamento adequado aos objetivos de um determinado projeto.

5.5 Processamento e apresentação dos resultados

O processamento dos dados de Sonar de Varredura Lateral tem por objetivo a construção de mosaicos a partir da justaposição lateral das imagens coletadas. O processo é realizado por meio de softwares dedicados que têm como funções principais:

- corrigir ou aferir a geometria de aquisição de dados (posição da fonte acústica em relação à antena do GPS, de forma a garantir o correto posicionamento geográfico das imagens);
- aplicar e homogeneizar ganhos no sinal registrado (AGC, TVG, EGN entre outros);
- corrigir a distância (*slant-range*) entre a fonte acústica e a superfície de fundo que é medida pelo sistema ao longo da hipotenusa do triângulo retângulo formado pela fonte acústica, um ponto na superfície de fundo na vertical abaixo da fonte acústica e um ponto qualquer de interesse na superfície de fundo ao longo do alcance lateral. Tal procedimento visa ao correto posicionamento horizontal das feições de fundo;
- justapor as imagens gerando um mosaico, sobre o qual serão desenvolvidas as análises e interpretações;
- posicionar e registrar as feições geológicas ou não (obstruções e/ou detritos náuticos) evidenciados na superfície de fundo.

No caso da não utilização de sistemas de posicionamento acústicos auxiliares do tipo USBL, a geometria de aquisição deve ser corrigida com os *offsets* da embarcação, o que basicamente é realizado inserindo-se no sistema

os valores anotados das extensões de cabo utilizadas ao logo do levantamento. Não raramente um ajuste fino se faz necessário, comparando-se o posicionamento de estruturas conhecidas, fixas e cartografadas na superfície de fundo, com as estruturas mapeadas pelos sensores acústicos do SVL.

Os produtos principais de um levantamento com SVL são: mapa faciológico (tipos de solo, habitats etc.) e mapa de localização de obstruções/detritos náuticos. O primeiro deve conter as localizações dos pontos de amostragem, bem como ter delineados os contatos entre os diferentes padrões texturais identificados nas imagens, os quais correspondem aos tipos de fundos observados. Os mapas de obstruções devem mostrar os pontos de ocorrência e suas dimensões, características que podem também ser descritas em arquivos associados.

Existem vários softwares no mercado para o processamento de imagens do Sonar de Varredura Lateral. O SonarWiz é um dos softwares clássicos amplamente utilizado no Brasil e no mundo para essa finalidade. Assim como vários outros, este software tem também a capacidade de processar dados de Batimetria, Perfilagem Sísmica Contínua, Magnetometria, LIDAR (*Light Detection And Ranging*) e até mesmo dados de GPR. Um exemplo de mosaico gerado a partir do processamento de dados do Sonar de Varredura Lateral está ilustrado na Figura 13.



Figura 13 – Mosaico de imagens de Sonar de Varredura Lateral da costa leste dos EUA, mostrando contrastes texturais entre os diferentes tipos de fundo. Dados processados pelo software SonarWiz7.6.

Fonte: cortesia da Chesapeake Technology e da Klein Marine Systems.

Os entregáveis mínimos de um levantamento com SVL estão listados no Quadro 3.

Quadro 3 – Entregáveis mínimos de um levantamento com o Sonar de Varredura Lateral.

PRODUTO	FORMATO
Mosaico das imagens do SVL/mapa fa- ciológico	GeoPDF, DWG, DGN, GeoTIFF
Mapa de localização das obstruções	PDF, DWG, DGN, GeoTIFF
Dados brutos	Formatos originais dos fabricantes (XTF, HSX, JSF, SDF entre outros)
Dados vetoriais (X, Y, padrões de tipo de fundo, obstruções)	ASCII, SHP, DXF
Croqui da embarcação e da geometria das instalações (GPS, guincho de rebo- que, cabos)	PDF, PNG, JPG

Fonte: elaborado pelos autores.

6 MÉTODO DE PERFILAGEM SÍSMICA CONTÍNUA PARA INVESTIGAÇÃO DE SUBSUPERFÍCIES SUBMERSAS

O conjunto de técnicas empregadas na investigação de ambientes submersos, levando-se em consideração a natureza das fontes acústicas, pode ser compartimentado em dois grupos (Figura 14): **grupo 1**, composto de técnicas que priorizam a investigação de superfícies submersas, tratados nos itens anteriores; **grupo 2**, composto de técnicas que priorizam a investigação de subsuperfícies submersas

O grupo 2 constitui-se em um conjunto de técnicas que prioriza a investigação de subsuperfícies submersas, destacando-se a técnica de Perfilagem Sísmica Contínua (PSC).

INVESTIGAÇÃO ACÚSTICA/SÍSMICA SUBAQUÁTICA		
SUPERFÍCIE	<p>BATIMETRIA</p> <p>24 - 28 - 30 - 33 - 38 - 50 - 100 200 - 400 - 550 - 700 (kHz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema Monofeixe • Batimetria de Varredura 	<p>IMAGEAMENTO</p> <p>100 - 200 - 300 - 400 500 - 900 - 1.600 (kHz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sonar de Varredura Lateral • Batimetria de Varredura
	<p>PENETRAÇÃO</p> <p>0,1 - 2,0 kHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boomer, Sparker, Bubble-gun, Chirp <i>bf</i>* <p><small>* bf = baixa frequência</small></p>	<p>RESOLUÇÃO</p> <p>2 - 50 kHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • SBP 3,5 - 7 - 12 - 15 - 24 (kHz) • Chirp 2 - 8 / 10 - 20 / 20 - 50 (kHz) • Fontes Paramétricas

Figura 14 – Métodos acústicos empregados na investigação de áreas submersas rasas, compartimentados em função do tipo de fonte acústica e do espectro de frequências emitido.

6.1 Breve descrição do método

O termo Perfilagem Sísmica Contínua (PSC) tem significado amplo no contexto da investigação acústica de áreas submersas. Sob esta nomenclatura, podem ser reunidos vários métodos sísmicos que têm por objetivo penetrar na superfície de fundo identificando a espessura da coluna sedimentar, conforme ilustrado na Figura 15. Podem ser incluídos, sob esta denominação, os métodos que utilizam fontes acústicas de grande potência, como *sparkers*, *air-guns* e *water-guns*, entre outras, e aquelas de potências intermediárias, como *minisparkers*, *boomers*, *bubble-guns* e *chirps* de baixa frequência, e que comumente lidam com frequências abaixo de 2 kHz. São também incluídos neste grupo os perfiladores de baixa potência do tipo SBP (*Subbottom Profiler*). Neste grupo, estão incluídas fontes acústicas do tipo: *chirp* (2 – 8 kHz, 10 – 20 kHz e 20 – 50 kHz), SBP 3,5 kHz, 7 kHz, 10 kHz, 12 kHz, 15 kHz, além de sistemas paramétricos, entre outros. Nesta Norma, os sistemas de baixa potência, que lidam com frequências mais altas e que utilizam pastilhas piezoelétricas para a emissão e recepção do pulso sísmico, são referidos como fontes acústicas

ressonantes ou, simplesmente, como sísmica ressonante. Os sistemas de maior potência e, que lidam com frequências mais baixas (< 2 kHz) e que possuem emissor/receptor separados (fonte acústica/hidrofone), são referidos como fontes acústicas impulsivas ou sísmica impulsiva.

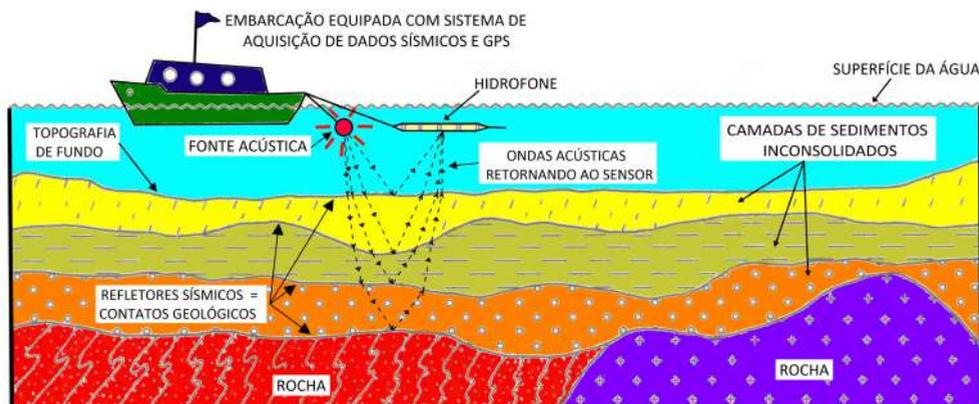


Figura 15 – Ilustração da técnica de Perfilagem Sísmica Contínua monocal aplicada à investigação de ambientes submersos.

Fonte: elaborada pelos autores.

6.2 Vantagens

A execução de ensaios de Perfilagem Sísmica Contínua permite a identificação da espessura total da coluna sedimentar rasa, depositada sobre o embasamento rochoso, e da espessura das diversas camadas intermediárias que compõem a coluna sedimentar local. Estes parâmetros são medidos de forma contínua ao longo da linha de navegação, à medida que a embarcação se desloca sobre uma rota pré-programada.

A execução de levantamentos sísmicos em áreas submersas contribui efetivamente para diminuir o número de sondagens diretas necessárias para viabilizar a adequada caracterização de uma área de estudo, poupando, dessa forma, tempo e dinheiro.

Em termos operacionais, a Perfilagem Sísmica Contínua é um método de investigação de aplicação relativamente rápida, já que grandes áreas podem ser cobertas em um pequeno intervalo de tempo, se considerarmos que uma

embarcação devidamente equipada se desloca, na superfície da água, a uma velocidade ao redor de 4 nós (7,4 km/h). Em condições favoráveis para navegação (ventos, ondas etc.), uma embarcação pode executar cerca de 40 km a 50 km lineares de perfis sísmicos a cada dia, sendo, portanto, um método de investigação bastante produtivo. Esse número pode ser ainda maior quando são realizados levantamentos marinhos nos quais a embarcação executa os ensaios de forma ininterrupta (24 horas por dia).

6.3 Limitações

A elaboração de um modelo geológico-geotécnico pleno da área investigada, com base nos produtos obtidos da Perfilagem Sísmica Contínua, passa necessariamente pela correlação destes dados com informações geológicas (sondagens e testemunhagens) e/ou outros dados geofísicos pré-existentes.

Alguns tipos de substratos geológicos limitam a penetração das ondas sísmicas, impedindo a observação dos estratos sedimentares subjacentes à superfície de fundo. Solos endurecidos (concreções lateríticas), sedimentos grossos (cascalho), sedimentos arenosos compactados, são exemplos de características geológicas de um pacote sedimentar que podem inibir a propagação das ondas acústicas na direção dos estratos mais profundos. Outro fator inibidor da propagação das ondas sísmicas é a presença de gás nos sedimentos, o que ocorre com bastante frequência em áreas estuarinas. A Figura 16 ilustra um exemplo de registro sísmico obtido com o emprego de uma fonte acústica do tipo *boomer*, onde se observa a estratigrafia da área (refletores sísmicos) apenas na porção central do registro, tendo em vista a presença de gás inibindo a propagação do sinal sísmico nas áreas adjacentes.

Os métodos sísmicos podem não apresentar bom desempenho em áreas de águas ultrarrasas (< 3 m), especialmente quando a superfície de fundo é constituída de sedimentos mais grossos (cascalhos) ou de sedimentos compactados. Este comprometimento deve-se principalmente ao excesso de reverberação das ondas acústicas, consequência do elevado contraste de impedância acústica entre os meios e do pequeno espaço para propagação das ondas, entre a superfície da água e a superfície de fundo.

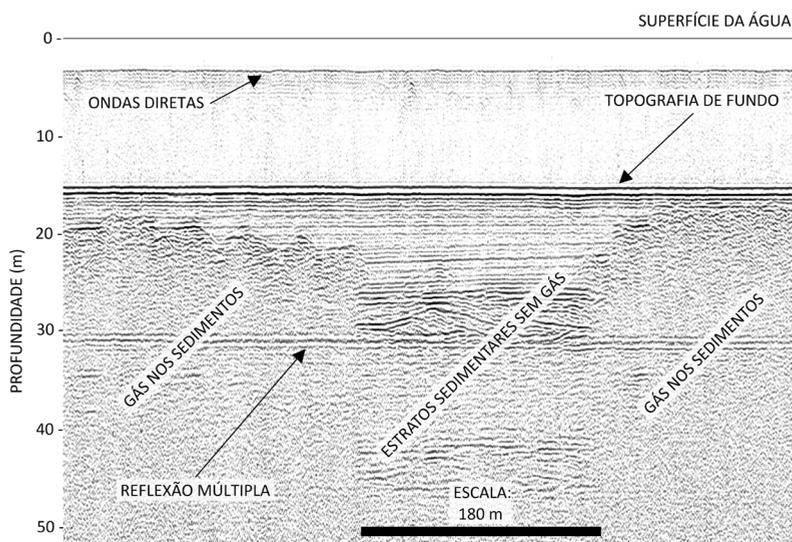


Figura 16 – Exemplo de registro sísmico (sistema Meridata com boomer SIG France), obtido na região da Baía de Paranaguá, mostrando a presença de gás em sedimentos.

Fonte: cortesia da Belov.

As condições de navegação (vento, ondas etc.) afetam o deslocamento das embarcações na superfície da água e, portanto, constituem-se também em importantes fatores que influenciam a qualidade dos dados, bem como a produtividade do levantamento, além da própria viabilidade de execução dos ensaios. Recomenda-se interromper o levantamento sísmico, pelo menos temporariamente, no caso de ocorrência de condições adversas à navegação.

Outro fator limitante do processo de análise dos perfis sísmicos é o desconhecimento da velocidade de propagação das ondas acústicas em cada uma das camadas sedimentares identificadas nos registros, o que impede o intérprete de aferir precisamente a espessura dessas camadas. A execução de sondagens mecânicas e de ensaios de Sísmica de Refração ou Sísmica de Reflexão, empregando sistemas multicanais, são algumas das possibilidades de averiguação da real velocidade de propagação das ondas sísmicas nas camadas sedimentares. Ressalta-se, entretanto, que nem sempre estes dados/ensaios estão disponíveis em projetos de engenharia. Comumente, o intérprete transforma o tempo de propagação do sinal sísmico (medidos precisamente pelos sismógrafos em milissegundos) em distâncias percorridas/profundidades (em

metros), com base em dados da literatura, o que pode gerar certa imprecisão na determinação das espessuras das camadas sedimentares e da cota do topo do embasamento rochoso.

6.4 Aquisição de dados

As técnicas de Perfilagem Sísmica Contínua descritas nesta Norma são do tipo monocanal 2D, com a aquisição de dados realizada continuamente ao longo de uma linha de navegação. Cada ponto amostrado na superfície de fundo tem sua posição horizontal correspondente à projeção, na superfície de fundo, do ponto médio entre o hidrofone e a fonte acústica na superfície da água. O espaçamento entre as linhas de navegação é decidido a partir da escala do produto final definida para cada projeto. Comumente, a execução de linhas a cada 1 cm na escala do mapa é desejável. Assim, a título de exemplo, ao se propor a confecção de um mapa final da área investigada na escala 1:1.000, é desejável que as linhas sísmicas sejam executadas, no máximo, a cada 10 m. Evidentemente que outros fatores podem influir na decisão sobre o espaçamento entre as linhas. Um número grande de sondagens preexistentes, ou, até mesmo a necessidade de um amplo e rápido reconhecimento da área de interesse, por exemplo, são fatores que podem indicar que um levantamento seja executado com maior espaçamento entre linhas.

O registro sísmico digital obtido em campo apresenta-se na forma de uma seção em duas dimensões, que é interpretada a partir do delineamento dos principais refletores sísmicos identificados. Refletores, ou horizontes sísmicos, são os elementos em uma seção sísmica, os quais simbolizam os contrastes de impedância acústica detectados pelas ondas ao se propagarem através do meio, e representam os contatos entre meios geológicos com propriedades físicas/acústicas distintas. Quanto maior o contraste de impedância, maior a nitidez com que será detectada a interface (refletor) entre os meios geológicos distintos numa seção sísmica. Um exemplo bastante claro desta definição pode ser observado na seção sísmica da Figura 17, onde estão traçados os distintos refletores (contatos) que estão identificados no perfil sísmico por diferentes cores.

Por mais claros e evidentes que possam se apresentar os contatos entre as camadas sedimentares (refletores) em uma seção sísmica, sempre se fará necessário correlacionar dados sísmicos a sondagens diretas ou testemunhagens, de forma a viabilizar a interpretação final dos dados e a correlação espacial e temporal entre os refletores para, finalmente, criar-se um modelo geológico-geotécnico da área investigada. Eventuais detalhes identificados nos materiais recuperados das sondagens, como microfósseis, concentração de minerais pesados etc., podem permitir a correlação direta de um determinado refletor com eventos geológicos relevantes para a área, tornando este refletor um marcador, ou seja, uma espécie de crono-refletor, o que contribui, por exemplo, em estudos de reconstituição paleoambiental.

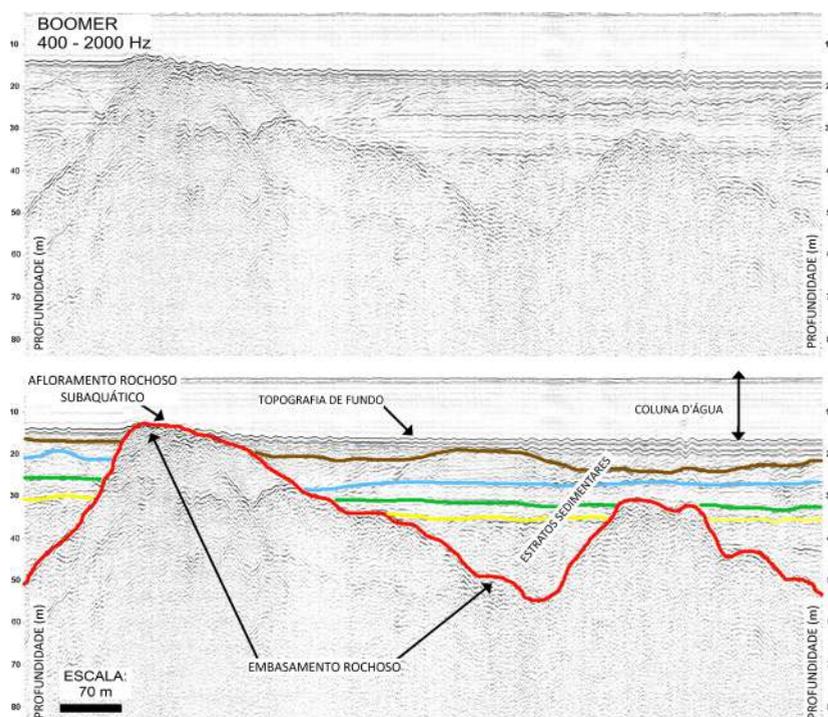


Figura 17 – Registro obtido da Perfilagem Sísmica Contínua – PSC utilizando o sistema sísmico Meridata, com boomer SIG France, em levantamento no litoral norte de São Paulo. Acima, registro sísmico original de campo; abaixo, registro sísmico interpretado. As linhas de diferentes cores correspondem aos refletores sísmicos que, por sua vez, representam os contatos geológicos (estratigrafia local).

Fonte: cortesia do Prof. Dr. Michel M. de Mahiques – Universidade de São Paulo – USP.

6.5 Planejamento de linhas sísmicas

Recomenda-se que a investigação de uma determinada área inicie-se com o planejamento de aquisição de dados sísmicos priorizando o reconhecimento geral da área de interesse. Esse procedimento implica na decisão por um espaçamento entre linhas de algumas centenas de metros (200 m a 500 m). Em uma etapa seguinte, procede-se o planejamento de levantamento detalhado, com foco no setor de interesse delimitado a partir da análise dos dados preliminares obtidos na fase anterior. Nesta fase, decide-se por espaçamento entre linhas de apenas algumas dezenas de metros (10 m a 50 m), a depender da escala final desejada.

Observa-se que é essencial em um levantamento de Perfilagem Sísmica Contínua a execução de linhas de referência, cruzando perpendicularmente todas as principais linhas planejadas. Recomenda-se que a distância entre as linhas de referência não seja superior a 4 ou 5 vezes o espaçamento entre as linhas regulares. Ressalta-se, ainda, a importância da execução dos perfis sísmicos em linhas retas, em especial no caso de execução de ensaios de sísmica impulsiva, nos quais a fonte acústica e os sensores (hidrofonos) são tracionados na superfície da água. Este procedimento exige o alinhamento da embarcação para a manutenção de uma distância constante, entre os sensores e a fonte acústica, ao longo de todo o levantamento.

6.6 Escolha da fonte acústica

A escolha da fonte acústica adequada para o estudo de uma determinada área submersa visando ao devido suporte técnico a obras civis de grande porte ou mesmo para projetos de investigação geológica básica (estratigrafia rasa, prospecção mineral, etc.), não é um procedimento trivial. Não é incomum em um grande projeto a necessidade de dados de espessura da coluna sedimentar subsuperficial e da profundidade do embasamento rochoso, o que necessariamente implica no emprego de mais de uma fonte acústica, já que não existe uma única fonte que ofereça ambas as soluções, a saber, penetração e resolução. Portanto, recomenda-se o planejamento de aquisição de dados de Perfilagem Sísmica Contínua com o emprego de sistemas acústicos multifrequenciais. Nestes sistemas é possível o emprego simultâneo de pelo menos,

uma ou duas fontes acústicas ressonantes (por exemplo, fontes do tipo *chirp*, *SBP 3,5 kHz*, ou fontes paramétricas, entre outras), visando a resolução, e uma fonte impulsiva (por exemplo, *boomer*, *sparker*, *bubble gun*, entre outras) visando a penetração na coluna sedimentar. Tal procedimento garante uma grande penetração na coluna sedimentar (de algumas dezenas de metros), com grande possibilidade de identificação do topo do embasamento rochoso e da espessura total da coluna sedimentar, bem como da espessura dos estratos intermediários, subsuperficiais.

De uma maneira geral, quando houver a necessidade de mapeamento do topo do embasamento rochoso, ou da identificação da espessura total da coluna sedimentar, fontes do tipo impulsivas deverão ser utilizadas em caráter mandatório. Em condições geológicas favoráveis (p.ex. sedimentos finos depositados sobre o embasamento rochoso), fontes do tipo *chirp* de alta potência e baixa frequência, podem apresentar também bons resultados. A Figura 18 mostra dois registros sísmicos: o superior, foi obtido de uma fonte acústica ressonante do tipo *chirp* de alta potência e baixa frequência, empregada em estudos estratigráficos na Baía da Babitonga, no Estado de Santa Catarina; o registro inferior, foi obtido de uma fonte acústica impulsiva do tipo *sparker*, empregada em estudo de viabilidade de implantação de parques eólicos no Mar do Norte. Em ambos os registros estão claramente delineados: na imagem superior, o topo do embasamento rochoso, a uma profundidade de até 33 m; na imagem inferior, embora não esteja delineado o topo do embasamento rochoso, é possível identificar os contatos entre as camadas de uma coluna sedimentar de mais de 120 m de espessura.

No caso de projetos cujo objeto de investigação não ultrapasse 5 m abaixo da superfície de fundo, como, por exemplo, na determinação da cota de enterramento de cabos ou dutos e da espessura do assoreamento de reservatórios, ou na dragagem de canais de navegação, fontes ressonantes, que priorizam a resolução, devem ser empregadas. Essas fontes possibilitam obter informações com maior detalhe dos estratos sedimentares mais rasos e de pequena espessura, conforme exemplo ilustrado na Figura 19.

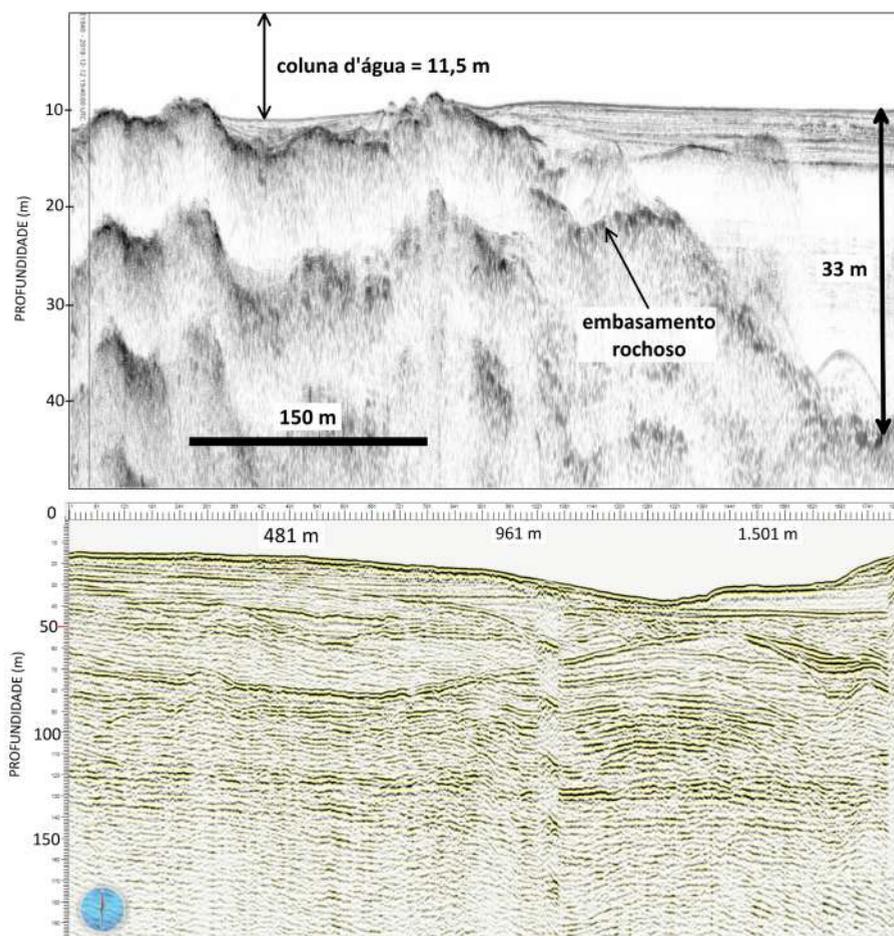


Figura 18 – Imagem superior: perfil sísmico obtido de uma fonte acústica do tipo *chirp* de alta potência e baixa frequência (Edgetech 512i); imagem inferior: perfil sísmico monocanal adquirido com a fonte acústica Light Weight Geo Source 200 e hidrofones Geo Sense de 8 elementos da GEO Marine Survey Systems), processado por GeoSurveys.

Fontes: imagem superior, cortesia do Prof. Dr. Antonio H. F. Klein, da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC; imagem inferior, cortesia da GEO Marine Survey Systems.

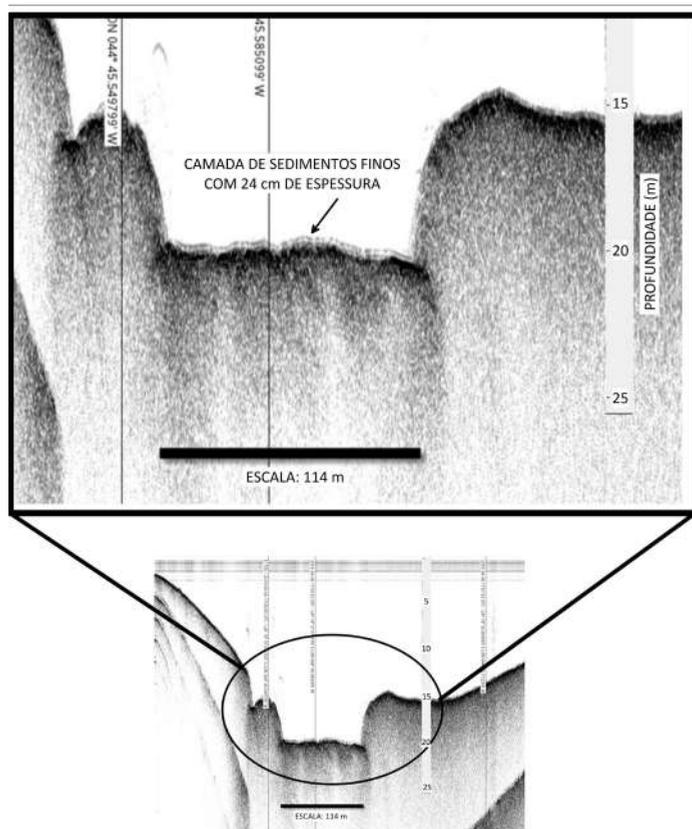


Figura 19 – Perfil sísmico oriundo de uma fonte acústica ressonante do tipo *chirp* (Edgetech 216) no qual se observa, no leito principal do rio Paraopeba (MG), uma fina camada de sedimentos de cerca de 24 cm de espessura.

Fonte: cortesia da Rural Tech.

São vários os sistemas acústicos disponíveis no mercado que possibilitam a atuação simultânea e integrada de fontes acústicas diversas. A Figura 20 mostra produtos de uma investigação multifrequencial, que ilustram o poder de resolução (perfil superior) e de penetração (perfil inferior), a partir do emprego simultâneo de mais de uma fonte acústica de perfilação. Observa-se, nesta figura, que o embasamento rochoso na área está perfeitamente delineado no perfil inferior, obtido de uma fonte acústica do tipo *boomer*. O perfil superior e o perfil intermediário, por outro lado, demonstram a alta capacidade de resolução de uma fonte do tipo *chirp*, já que permitem a observação de camadas de espessuras centimétricas na coluna

sedimentar subsuperficial. Nestes dois registros o contorno do embasamento rochoso não se encontra perfeitamente delineado demonstrando o baixo poder de penetração destas duas fontes acústicas ressonantes.

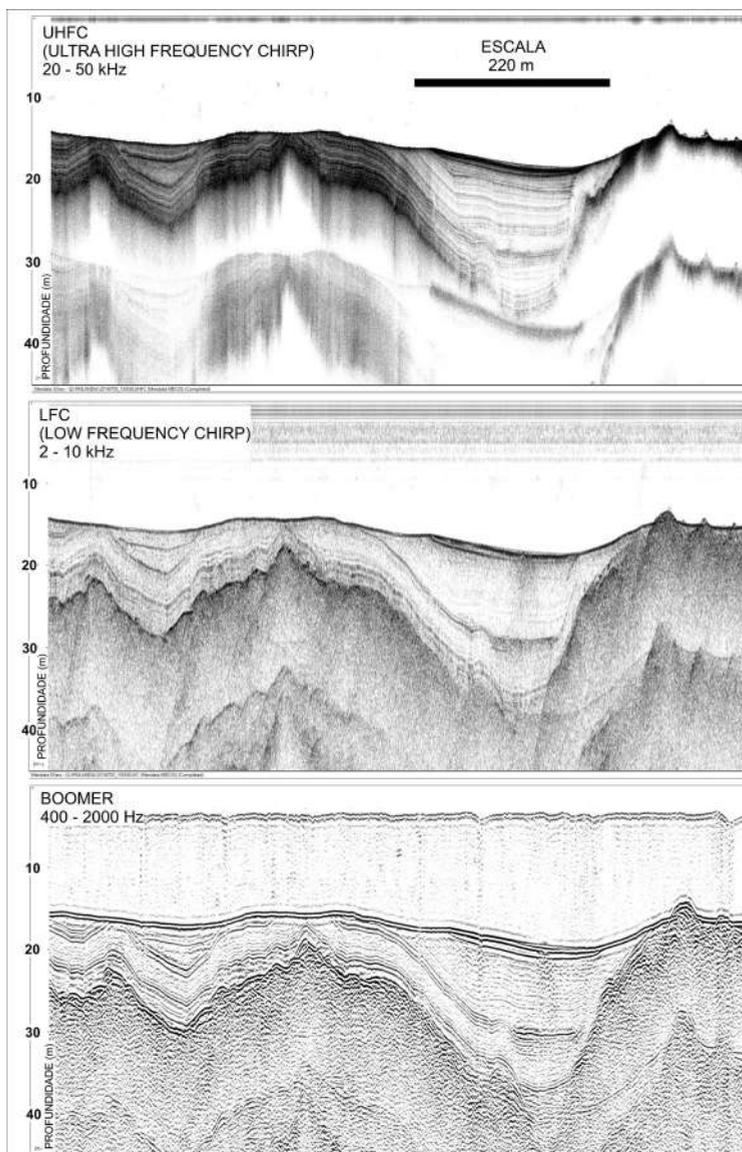


Figura 20 – Perfis sísmicos obtidos a partir do emprego simultâneo de três fontes acústicas mostrando as distintas características dos produtos de cada fonte acústica, sob o ponto de vista da penetração e da resolução (sistema acústico Meridata com um *chirp* UHFC, um *chirp* LFC e boomer SIG France).

Fonte: cortesia da Meridata.

6.7 Processamento, interpretação e apresentação dos resultados

Em um bom registro sísmico obtido a partir da Perfilagem Sísmica Contínua são observadas as camadas atravessadas pelo sinal sísmico. Essas camadas correspondem à coluna d'água, aos estratos sedimentares inconsolidados e ao topo do embasamento acústico, que é entendido como o limite de penetração do sinal sísmico e que, em alguns casos, pode ser interpretado como o topo do embasamento rochoso.

O limite de penetração do sinal acústico é resultado, basicamente, do tipo de fonte acústica empregada (espectro de frequências e energia) e do tipo de material que compõe o substrato geológico da área. Sinais de baixa frequência (< 2 kHz) tem maior capacidade de penetração, em detrimento da resolução. O contrário ocorre na emissão de sinais de alta frequência (2 kHz - 50 kHz), que possibilitam maior resolução e, portanto, uma melhor definição dos estratos sedimentares subsuperficiais, com espessuras métricas ou submétricas, em alguns casos, centimétricas.

É imprescindível que os produtos oriundos da aplicação da Perfilagem Sísmica Contínua sejam corrigidos das variações do nível d'água (maré, ou nível de água dos rios e de reservatórios) ocorridas ao longo do levantamento. Esse procedimento é realizado com a aplicação direta das variações de nível sobre os dados coletados, analogamente aos procedimentos adotados em levantamentos batimétricos. ReflexWin, Kingdom, RadExPro, Geosuite All Works, Coda Octopus, SonarWiz, Hypack e MDPS são alguns dos softwares de processamento de dados de Perfilagem Sísmica Contínua disponíveis no mercado que preveem e facilitam esse procedimento. Observa-se que a maioria destes softwares processam também dados de Sonografia, Magnetometria e Batimetria. Ressalta-se, no caso da investigação rasa, a importância do processamento e interpretação, simultâneos, dos perfis sísmicos obtidos por diferentes fontes acústicas de perfilagem, procedimento ainda incomum na maioria dos softwares. Neste contexto, destaca-se o MDPS (*Marine Data Processing and Interpretation Software*), desenvolvido pela empresa finlandesa Meridata e que é utilizado por algumas universidades e empresas no Brasil. Este software tem a capacidade de processar, simultaneamente, dados de

Perfilagem Sísmica Contínua de diversas fontes acústicas (*chirp*, *boomer* etc.), de Sonar de Varredura Lateral, de Batimetria (monofeixe e multifeixe) e de Magnetometria.

Os principais produtos de um levantamento de PSC são mapas estruturais (topo do embasamento rochoso) e mapas de espessura de sedimentos (isópacas) ou de cotas de um determinado horizonte de interesse específico.

Dentre as aplicações da Perfilagem Sísmica Contínua, utilizando fontes sísmicas ressonantes, está o mapeamento de obstruções alongadas, como cabos e dutos subaquáticos. Estas estruturas são representadas em uma seção sísmica na forma de hipérboles de difração (Figura 21), feições estas que, analisadas por meio de softwares apropriados, permitem a definição da profundidade de enterramento e de suas dimensões. Nestes casos, o principal produto é um mapa de localização com as dimensões, as profundidades das estruturas e o seu traçado.

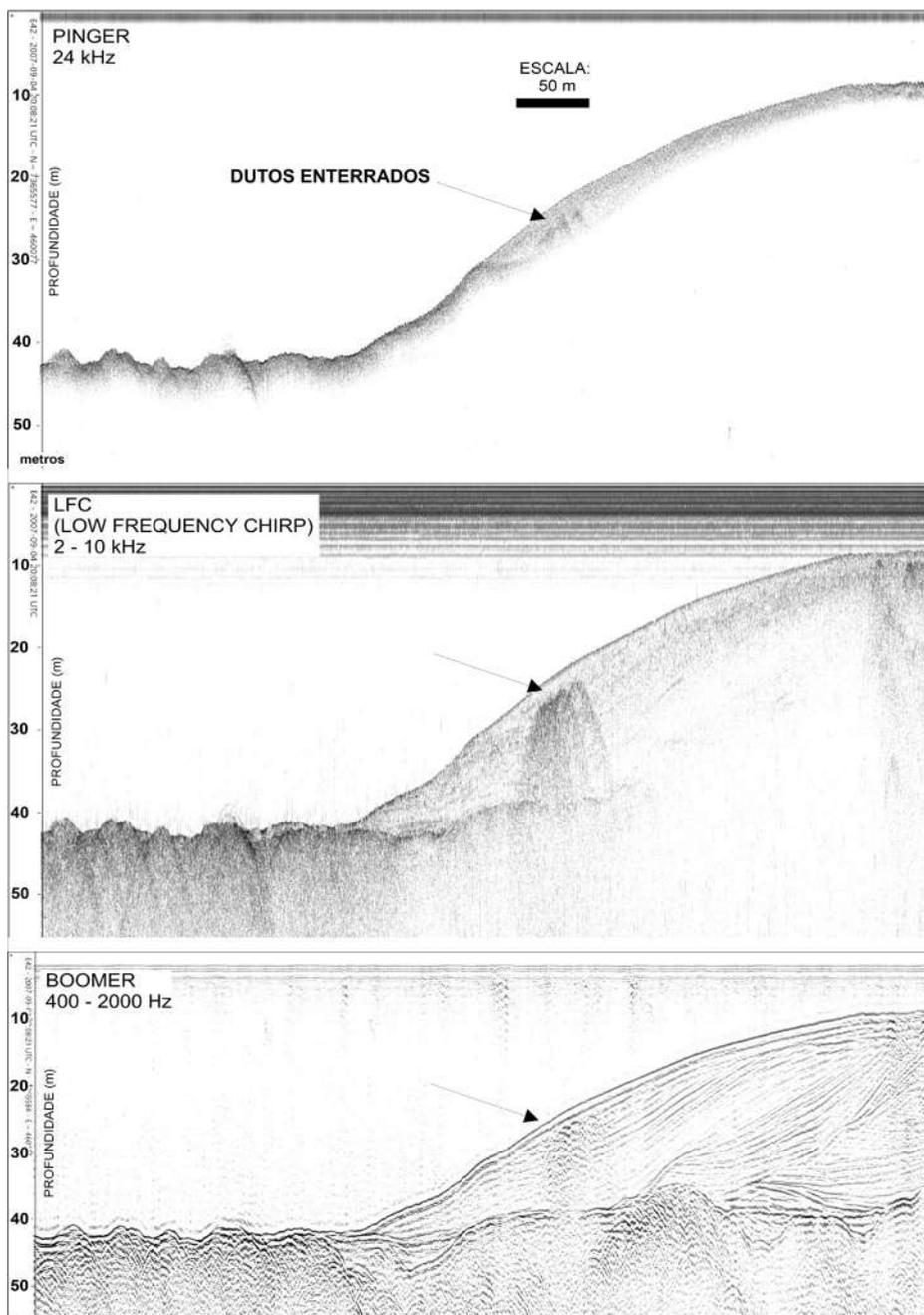


Figura 21 – Exemplos de dutos identificados em subsuperfície por meio da Perfilagem Sísmica Contínua, neste caso, empregando, simultaneamente, três fontes acústicas (sistema sísmico Meridata com *pinger*, *chirp* e *boomer* SIG France). Observa-se que os dutos são mais bem visualizados no registro oriundo da fonte acústica *chirp*.

Fonte: Souza, Miranda Filho e Mahiques (2008).

Os entregáveis mínimos oriundos de levantamentos de Perfilagem Sísmica Contínua estão listados no Quadro 4.

Quadro 4 – Entregáveis em levantamentos de Perfilagem Sísmica Contínua empregando fontes acústicas do tipo impulsivas.

PRODUTO	FORMATO
Mapa de isópacas/mapas estruturais/mapas de cotas dos horizontes de interesse	PDF, DWG, DGN, SRF etc.
Dados brutos	SGY, SEG-Y (ou SEGY), SEG2 e formatos originais dos fabricantes
Dados vetoriais (X, Y, cotas de horizontes, isópacas)	XYZ, ASCII, CSV, SHP
Croqui da embarcação e da geometria das instalações (fonte acústica, GPS, sensores de movimento etc.)	PDF, PNG, JPG

Fonte: elaborado pelos autores.

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/LEITURAS RECOMENDADAS

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.

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

PASSINI & ALVARES – SOCIEDADE DE ADVOGADOS. Parecer – Natureza das “Normas” a serem emitidas pela ABGE. 2021. **Relatório de consultoria jurídica à ABGE**, 13 p. Disponível em www.abge.org.br, 2021.

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, 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.

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 GEOFISICA*, 1., 2004, São Paulo. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBGf, 2004.

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:

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

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).

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.

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

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. (S.L.): Marinha do Brasil, 2017. 94 p. 9 (NORMAM – 25/DHN)

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

SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O. C. B. **NORMA ABGE 200/2023: Geofísica aplicada – Métodos e técnicas**. Vários colaboradores. 1ª Edição. São Paulo: ABGE, 2023.

ANEXO 1 – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

1. INVESTIGAÇÃO RASA

No contexto das demandas relacionadas às investigações geológico-geotécnicas mais comumente utilizadas, 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.

2. IMPORTÂNCIA DOS 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.

3. VANTAGENS DO EMPREGO DA GEOFÍSICA NA INVESTIGAÇÃO DE AMBIENTE SUBMERSOS

Existem inúmeras vantagens na aplicação de métodos geofísicos na investigação de ambientes submersos, destacando-se:

- **Método não destrutivo**

A coleta de dados na investigação geofísica de ambientes submersos ocorre a partir do deslocamento de uma embarcação com equipamentos geofísicos pela superfície da água na área de interesse, constituindo-se, portanto, em um método de investigação indireto e não destrutivo, ocasionando mínima intervenção no ambiente a ser investigado.

- **Portabilidade e rapidez na aplicação**

Com a evolução tecnológica dos últimos anos, o porte dos equipamentos foi reduzido e, assim, a aquisição de dados pode ser desenvolvida por meio de pequenas embarcações e em áreas restritas ou

confinadas. Atualmente, encontra-se em franca evolução o emprego de sistemas autônomos, que são pequenas embarcações que se deslocam na superfície da água por meio de controle remoto, ou seja, sem tripulação a bordo. Sistemas geofísicos de pequeno porte, aerotransportados (drones), têm também representando papel de destaque sob o ponto de vista da portabilidade e rapidez dos ensaios. Magnetômetros, antenas de GPR e sensores acústicos são exemplos de dispositivos empregados na geofísica aerotransportada para levantamentos de áreas restritas.

Diretamente relacionada com a portabilidade dos equipamentos geofísicos modernos, está a rapidez como são desenvolvidos os ensaios. Comumente, as embarcações se deslocam na superfície da água com velocidades entre 3 e 5 nós (5,5 km/h – 9,2 km/h), o que possibilita que grandes áreas possam ser cobertas por centenas de quilômetros de perfis geofísicos em um curto intervalo de tempo.

- **Relação custo/benefício x cobertura**

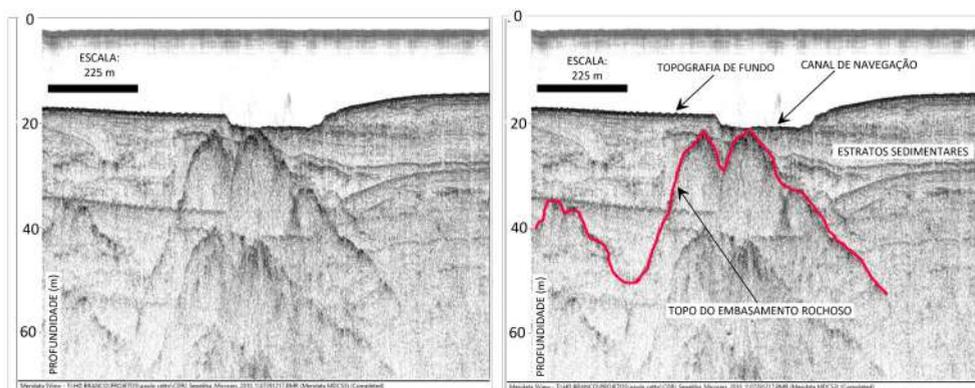
Levantamentos geofísicos de ambientes submersos rasos proporcionam uma excelente relação custo/benefício, tendo em vista a possibilidade da coleta de grande quantidade de dados num curto intervalo de tempo, gerando dados com excelente representatividade em área, o que não seria possível com o emprego apenas dos métodos convencionais de investigação, como amostragens, testemunhagens ou sondagens.

- **A investigação geofísica x ambientes submersos**

A ausência de luz e as dificuldades naturais de acesso aos ambientes submersos, prejudicam ou, por vezes, inviabilizam a utilização das ferramentas convencionais de investigação. Assim, o emprego dos métodos geofísicos torna-se ainda mais relevante quando se trata de investigação destes ambientes, tendo em vista não só as facilidades operacionais envolvidas nos procedimentos de aquisição de dados, mas também, no caso dos métodos acústicos, a facilidade com que se propagam as ondas acústicas na água.

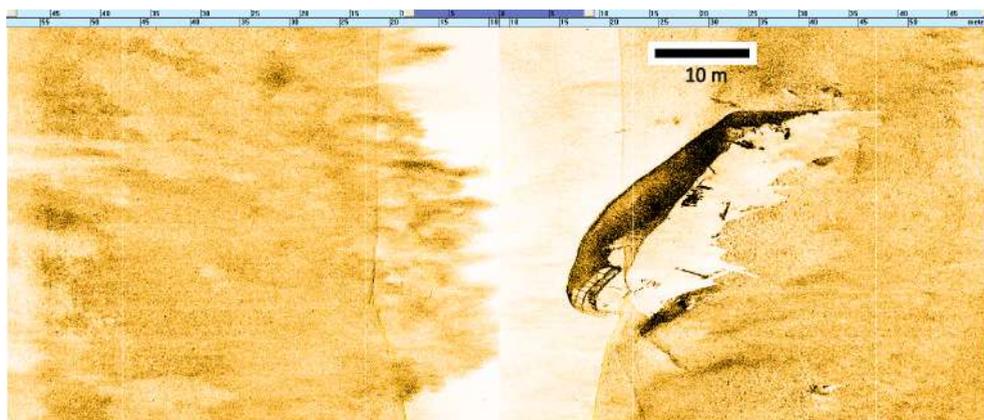
- **Visualização dos dados e os métodos acústicos**

Os métodos acústicos se diferenciam dos demais métodos geofísicos sob o ponto de vista da visualização dos dados em tempo real. Ao contrário da maioria dos métodos geofísicos, que exige pós-processamento dos dados adquiridos, para a caracterização do ambiente investigado, a maioria dos produtos oriundos de levantamentos acústicos pode ser observada em tempo real, na tela do computador a bordo da embarcação e sem processamento prévio. Este procedimento viabiliza a tomada de decisões em tempo real, à medida do desenvolvimento do levantamento. Por tomada de decisões em tempo real entende-se a eventual necessidade de reposicionamento dos perfis ou de adensamento das linhas de investigação, face à detecção de anomalias de interesse ao projeto, tais como, por exemplo, a presença de afloramentos rochosos (Anexo 1, Figura 1) ou de uma embarcação naufragada (Anexo 2, Figura 2)) em local não previsto. Esta propriedade dos métodos sísmicos é bastante relevante se for considerado o alto custo operacional de levantamentos marítimos. Uma eventual necessidade de remobilização da equipe para detalhamento de anomalias identificadas *a posteriori*, durante a interpretação dos dados no escritório, pode ser inviável para um determinado projeto em termos de custos.



Anexo 1, Figura 1 – Seção sísmica bruta (à esquerda) e interpretada (à direita) mostrando a presença de afloramento rochoso raso em área portuária da costa sul do Rio de Janeiro.

Fonte: cortesia da Microars Consultoria Projetos e Serviços Técnicos Ltda.



Anexo 2, Figura 2 – Imagem do Sonar de Varredura Lateral (Klein 3000 – 500 kHz) mostrando um casco de navio soçobrado no canal do porto de Santos, SP.

Fonte: imagem coletada e processada pelos autores

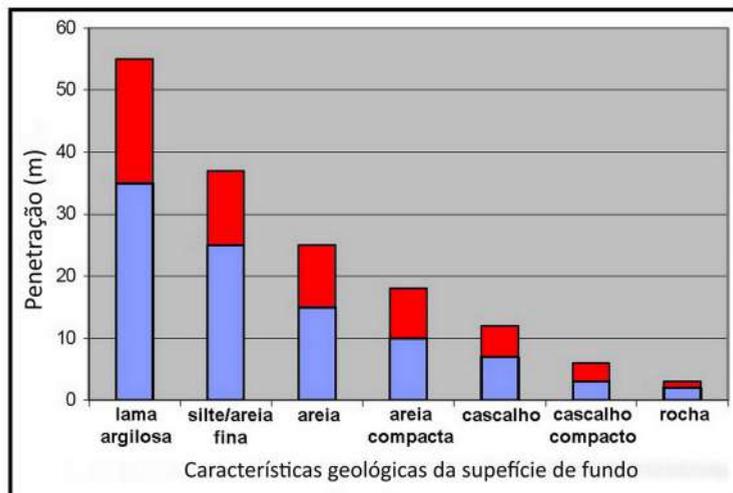
4. DIFERENCIAL ENTRE OS MÉTODOS ACÚSTICOS APLICADOS NAS INVESTIGAÇÕES DE ÁREAS SUBMERSAS

As fontes acústicas são construídas com objetivos específicos, ou seja, cada uma emite um determinado espectro de frequências definido em função do objetivo para o qual foi criada, contemplando uma faixa que, comumente, varia entre 100 Hz e 2.000 kHz.

Uma fonte acústica que lida com a frequência de 3,5 kHz, por exemplo, tem o objetivo de perfilar a coluna sedimentar subsuperficial e, lidando com este espectro de frequências, sua capacidade de penetração é limitada a 30 m ou 40 m em sedimentos finos (lamas e areias finas), a 10 m em sedimentos grossos (areia grossa, areia compacta, cascalhos) e reduzida capacidade de penetração em rocha ou rocha alterada, conforme mostrado no Anexo 1, Figura 3. Por outro lado, fontes do tipo *boomer*, *sparker*, *bubble-gun* e *chirp* de baixa frequência, entre outras, lidam com frequências abaixo de 2 kHz e assim, têm a capacidade de penetrar algumas dezenas de metros na coluna sedimentar.

Geomarine Survey Systems, SIG France, Applied Acoustics, Edgetech, Meridata, Falmouth Scientific, Geoacoustics, Geoforce, Kongsberg, Inommar, Teledyne, SyQuest são alguns exemplos de fabricantes mundiais de equipamentos sísmicos que têm por objetivo investigar a espessura da coluna sedimentar,

alguns com prioridade na resolução, outros, na penetração, a depender do modelo escolhido.



Anexo 1, Figura 3 – Desempenho da fonte acústica modelo GeoPulse Pinger 3,5 kHz, da Kongsberg Geoacoustics: penetração esperada (em azul) e a variabilidade possível (em vermelho) para a relação penetração do sinal acústico x tipo de fundo.

Fonte: Geoacoustics (*apud* SOUZA, 2006).

As principais aplicações dos métodos acústicos na investigação de ambientes submersos rasos foram apresentadas no Quadro 1, item 2 desta publicação.

No contexto da investigação rasa, espectros acústicos que lidam com altas frequências (> 30 kHz) atuam com o objetivo de caracterizar superfícies submersas e aqueles que lidam com baixas frequências (< 30 kHz) têm, comumente, por objetivo, a investigação das subsuperfícies submersas. O limite de 30 kHz estabelecido neste manual não deve ser entendido como um valor absoluto, pois, com a evolução tecnológica dos últimos anos, outros espectros de frequências têm assumido capacidades outrora inexistentes. Um excelente exemplo destas transformações é a fonte acústica *chirp* desenvolvida pela empresa finlandesa Meridata em 2019, que lida com frequências entre 20 kHz e 50 kHz, espectro até então não incluído entre aqueles com capacidade de penetração na coluna sedimentar.

Assim, o conjunto de técnicas empregadas na investigação de ambientes submersos, levando-se em consideração a natureza das fontes acústicas, pode ser compartimentado em dois grupos (Figura 4): **grupo 1**, composto de técnicas que priorizam a investigação de superfícies submersas; **grupo 2**, composto de técnicas que priorizam a investigação de subsuperfícies submersas.

INVESTIGAÇÃO ACÚSTICA/SÍSMICA SUBAQUÁTICA		
SUPERFÍCIE	<p>BATIMETRIA</p> <p>24 - 28 - 30 - 33 - 38 - 50 - 100 200 - 400 - 550 - 700 (kHz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistema Monofeixe • Batimetria de Varredura 	<p>IMAGEAMENTO</p> <p>100 - 200 - 300 - 400 500 - 900 - 1.600 (kHz)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sonar de Varredura Lateral • Batimetria de Varredura
	SUBSUPERFÍCIE	<p>PENETRAÇÃO</p> <p>0,1 - 2,0 kHz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boomer, Sparker, Bubble-gun, Chirp <i>bf</i>* <p><small>* <i>bf</i> = baixa frequência</small></p>

Anexo 1, Figura 4 – Métodos acústicos empregados na investigação de áreas submersas rasas, compartimentados em função do tipo de fonte acústica e do espectro de frequências emitido.

Fonte: elaborada pelos autores.

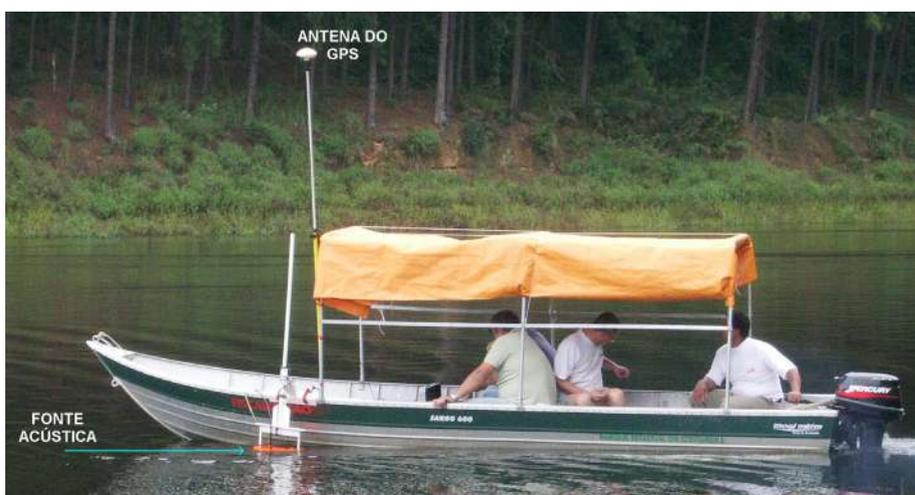
5. INVESTIGAÇÃO DE SUPERFÍCIES SUBMERSAS

No **grupo 1**, que reúne um conjunto de métodos acústicos que prioriza a investigação de superfícies submersas, destacam-se as técnicas de Batimetria e de Imageamento Acústico/Sonar de Varredura Lateral.

Algumas considerações sobre as técnicas

Entende-se por Batimetria o método geofísico que emprega transdutores acústicos que emitem espectros de frequências, comumente, superiores a 30

kHz. Estão incluídos neste grupo os sistemas monofeixe (Anexo 1, Figura 5) e os sistemas batimétricos de varredura dos tipos multifeixe (*beamform*), interferométrico e multifase (Anexo 2, Figura 6). Ressalta-se que existem disponíveis no mercado sistemas batimétricos que lidam com frequências inferiores a 30 kHz. É importante destacar, todavia, que estes sistemas têm aplicação principal em levantamentos de áreas profundas, com espessura da coluna d'água de centenas ou milhares de metros e, portanto, não se aplicam a levantamentos de áreas submersas rasas, foco deste manual.



Anexo 1, Figura 5 – Embarcação de pequeno porte equipada com GPS (Global Positioning System) e ecobatímetro monofeixe de dupla frequência (Kongsberg-Simrad EA400 38 e 200 kHz), pertencente ao IPT e em operação no lago Cabuçu, Guarulhos, SP.

Fonte: fotografia dos autores.

Por Imageamento Acústico, entende-se que são os levantamentos que empregam métodos de investigação de superfícies submersas, os quais lidam com frequências comumente superiores a 100 kHz. Da mesma forma que na Batimetria, existem sistemas de Imageamento Acústico que lidam com frequências abaixo de 100 kHz, todavia, com foco de aplicação na investigação de áreas profundas, não contempladas na abordagem deste manual. O Sonar de Varredura Lateral e os sistemas batimétricos de varredura do tipo multifeixe clássico, interferométrico ou multifase, constituem-se nas principais ferramentas utilizadas no contexto do imageamento acústico de superfícies submersas.



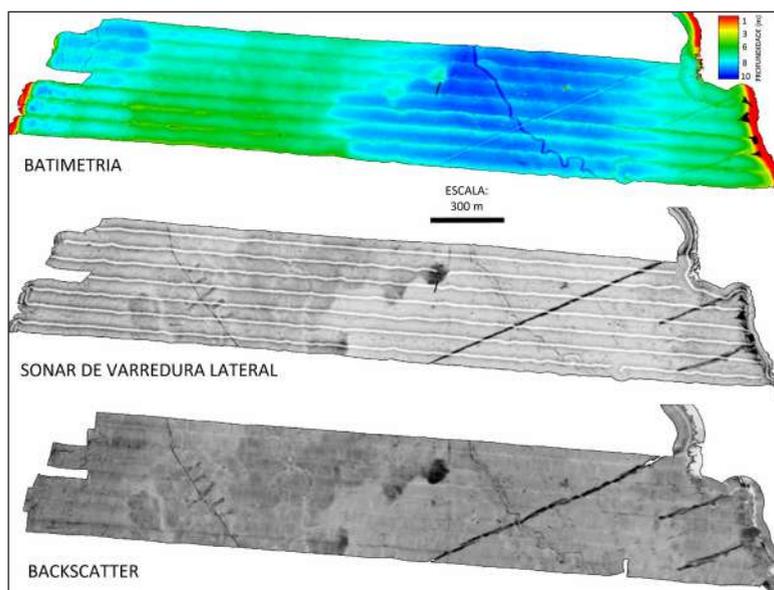
Anexo 2, Figura 6 – Sistema híbrido multifase (Batimetria 550 kHz + Sonar de Varredura Lateral 550/1.600 kHz) modelo Edgetech 6205, em levantamento experimental no lago Taiacupeba, Suzano, SP.

Fonte: fotografia dos autores.

A maioria dos equipamentos utilizados no imageamento de ambientes submersos rasos utiliza frequências entre 100 kHz e 750 kHz. Existem modelos de última geração que empregam frequências ainda mais altas (1.600 kHz), e assim, priorizam a ultra-alta resolução, em prejuízo do alcance lateral, que não ultrapassa poucas dezenas de metros.

Observa-se, nestas últimas décadas, uma tendência na evolução tecnológica no sentido da junção das técnicas de Batimetria e Sonografia, o que pode ser constatado pela disponibilidade, no mercado atual, de sistemas que executam levantamentos batimétricos e sonográficos simultaneamente, empregando pares de frequências (250/550 kHz, 550/900 kHz, 550/1.600 kHz, entre outros), como, por exemplo, os modelos Edgetech 6205 (Figura 6) e o Klein HydroChart 3500, entre outros. Adicionalmente, constata-se também, que a maioria dos sistemas batimétricos de varredura disponíveis no mercado possibilitam o registro simultâneo de dados de *Backscatter*, com os quais

elaboram-se mosaicos muito semelhantes aos produtos oriundos do Sonar de Varredura Lateral, sendo ambos os dados extremamente úteis na caracterização do tipo de fundo. Esta tendência de associação dos processos de aquisição de dados oriundos destas duas técnicas decorre das similaridades conceituais entre os sistemas batimétricos e sonográficos. Um produto dessa tríplice aliança – Batimetria + Sonografia + *Backscatter* – pode ser observado no Anexo 1, Figura 7.



Anexo 1, Figura 7 – Trecho de um reservatório de água em São Paulo, mostrando o tríplice produto de um levantamento batimétrico empregando o sistema multifase Edgetech 6205. De cima para baixo: mapa batimétrico (as cores representam áreas com distintas profundidades), mosaico do Sonar de Varredura Lateral e mosaico de *Backscatter* (as diferentes texturas, em tons de cinza, podem ser correlacionadas a distintos tipos de fundo).

Fonte: elaborada pelos autores.