MONITORAMENTO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS POR MEIO DO SONAR DE VARREDURA LATERAL

Luiz Antonio Pereira de Souza[(1)]

Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, geólogo pelo Instituto de Geociências da USP, doutor em Oceanografia Geológica pelo Instituto Oceanográfico da USP e especialista em métodos geofísicos aplicados na investigação de áreas submersas rasas.

Nabil Alameddine[(1)]

Pesquisador do IPT, geógrafo pelo Departamento de Geografia da USP, mestre pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, especialista em GIS.

Moysés Gonsalez Tessler[(2)]

Professor do Instituto Oceanográfico da USP, geólogo pelo Instituto de Geociências da USP, doutor em Oceanografia Geológica pelo IO-USP e especialista em geologia costeira.

Eduardo Ayres Yassuda [(3)]

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da USP, Doutor em Modelagem Oceânica pela University of Florida.

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

Endereço[(1)]**:** Av. Prof. Almeida Prado 532, Cidade Univertisária , São Paulo CEP 01000-001 -Brasil - Tel: +55 11 3767-4375 - Fax: +55 11 3767-4767 - e-mail: **laps@ipt.br.**

2 Instituto Oceanográfico da USP- IO-USP

3 ASA South America

RESUMO

Este artigo discute a importância da aplicação do método geofísico denominado de sonar de varredura lateral no monitoramento de emissários submarinos. Apresenta os principio básicos do método geofísico, mostra os principais equipamentos existentes no mercado mundial e discute os resultados obtidos de testes realizados na área costeira das cidades de Santos e Praia Grande, litoral de São Paulo, Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: sonar de varredura lateral, emissários submarinos, geofísica aplicada.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Estudos preliminares sobre a geologia (estratigrafia rasa) e geomorfologia da superfície de fundo de áreas costeiras são fundamentais em projetos de emissários submarinos. É nesta fase do projeto que são coletadas informações geológicas, geomorfológicas e geotécnicas que delinearão o projeto propriamente dito, com relação ao posicionamento adequado das rotas a serem implantadas. A caracterização do assoalho subaquático pode ser feita a partir de coleta de materiais de superfície (amostragens), da execução de sondagens (sondagem rotativa ou a percussão) ou através de levantamentos geofísicos. Comumente, os métodos geofísicos mais empregados são os acústicos (sísmicos), destacando-se os perfiladores que utilizam fontes acústicas do tipo *pinger*, *chirp*, *boomer* ou *sparker* e os imageadores, como o sonar de varredura lateral e os ecobatímetros multifeixes, que com base na emissão de altas frequências, possibilitam a obtenção de imagens detalhadas do assoalho marinho, semelhantes às imagens fotográficas ou de satélite, a partir das quais é possível a caracterização precisa dos ambientes submersos. A contribuição dos métodos geofísicos em projetos desta natureza é indiscutível, já que constituem ferramentas de investigação que, com uma relação custo-benefício favorável, permitem num curto período de tempo o mapeamento detalhado de grandes áreas de interesse à implantação de projetos desta natureza. O objetivo deste artigo é discutir sobre a contribuição do método geofísico conhecido como sonar de varredura lateral não só na fase precedente à implantação do projeto, mas também na fase posterior à implantação, visando o monitoramento de toda a extensão do emissário. As

imagens fornecidas pelo sonar de varredura lateral permitem observar toda e qualquer alteração no posicionamento original ou previsto do emissário ao longo do tempo, bem como, o estado de conservação das conexões entre as partes que compõe o emissário. Os mosaicos construídos com as imagens permitem a reconstrução do "*as-built*", bem como a observação se os dutos estão enterrados ou expostos e se efetivamente estão posicionado ao longo da rota projetada. Testes realizados pelo IPT, em conjunto com a empresa ASA Applied Science, na Praia Grande, SP, Brasil, na área do projeto do emissário número 1 ilustram a discussão proposta.

SONAR DE VARREDURA LATERAL (SVL)

O sonar de varredura lateral – SVL, ou a sonografia, constitui-se num método acústico de investigação de ambientes submersos e baseia-se no princípio da propagação das ondas acústicas na água.

Originalmente sonares eram equipamentos acoplados ao casco dos navios e utilizados com dois objetivos básicos: medir a coluna d'água imediatamente abaixo da embarcação e/ou localizar grandes obstáculos à navegação como *icebergs* e submarinos. Somente a partir dos anos 60, os sonares passaram a emitir vários pulsos acústicos simultaneamente, ao contrário dos primeiros modelos que emitiam um único pulso e numa direção específica. Passaram também nesta mesma época, a apontar lateralmente em relação à rota de navegação, e não verticalmente para baixo, como até então, permitindo desta forma a construção de uma imagem da superfície de fundo a partir de uma série de sucessivas varreduras (*scans*) laterais (Souza, 2006). O processo de construção da imagem do assoalho marinho por meio deste método de investigação está ilustrado na **Figura 1**.

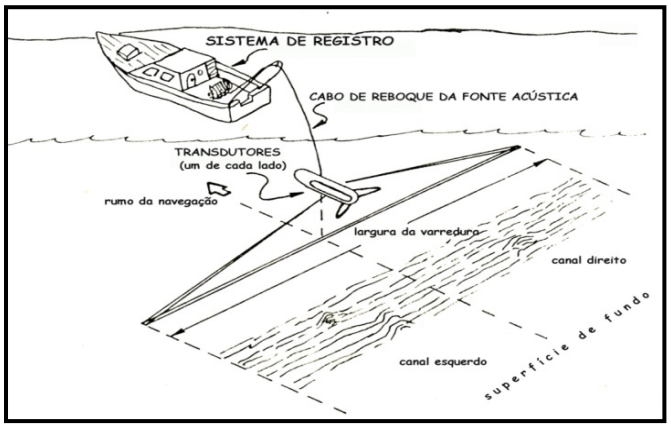


Figura 1: Ilustração mostrando como é construída a imagem do sonar de varredura lateral à medida que a embarcação se locomove ao longo da seção. Modificado de Mazel (1985).

Com a evolução dos sistemas de aquisição de dados, estes equipamentos passaram ainda a ser rebocados a certa distância da embarcação e mergulhados na coluna d'água, o que em muito melhorou o desempenho do sistema e a qualidade dos sinais registrados, pois assim, o sistema ficou à parte dos ruídos e das movimentações inerentes da embarcação, bem como passou a existir a possibilidade de posicionar a fonte acústica abaixo da termoclina, evitando-se deste modo a interferência de outros fenômenos acústicos sobre o sinal emitido (refração etc.).

Quando comparado com os demais sistemas acústicos de investigação de áreas submersas, verifica-se que a sonografia se utiliza de espectros de frequências superiores, normalmente entre 100 e 500 kHz. Existem, sistemas que utilizam frequências menores (entre 8 e 20 kHz), mas com aplicação restrita em mapeamentos em grande escala, pois se trata de sistemas de longo alcance relacionados com mapeamentos de áreas marítimas profundas, quando da necessidade de ampla cobertura (alcances laterais de dezenas de quilômetros), não tendo aplicação em estudos de áreas rasas, como é o caso do tema foco deste artigo.

Alguns sistemas modernos permitem ainda, além do imageamento da superfície de fundo, a perfilagem rasa, já que podem ser acoplados a fontes acústicas de baixa frequência denominadas de forma genérica de SBP (*subbottom profilers*). *Chirp*, *pinger*, 3.5kHz, 7kHz, 10 kHz são exemplos de fontes acústicas desta natureza.

FUNDAMENTOS DA SONOGRAFIA

A sonografia ou o sonar de varredura lateral (SVL) tem por objetivo o imageamento da superfície de fundo de áreas submersas, em substituição às técnicas usualmente empregadas no mapeamento em terra, como a fotografia aérea, imagens de satélite e de radar, que não são aplicáveis no mapeamento de superfícies submersas, tendo em vista as limitações quanto à penetração da luz, que sofre forte atenuação na coluna d'água (McQuillin & Ardus, 1977).

O princípio da sonografia está baseado na emissão de um sinal acústico de alta frequência, em intervalos de tempo regulares, por dois transdutores (emissores e receptores) submersos, que apontam para ambos os lados da superfície de fundo em relação ao rumo da navegação. Em contraste à forma padrão cônica do feixe de sinais emitidos pelos ecobatímetros convencionais, o feixe principal de sinais emitidos pelo sonar de varredura

lateral é bastante estreito, na direção paralela à navegação (raramente ultrapassando 2º) e largo na direção perpendicular à rota de navegação (comumente da ordem de 40-50º). A **Figura 2** ilustra a geometria do método de sonografia.

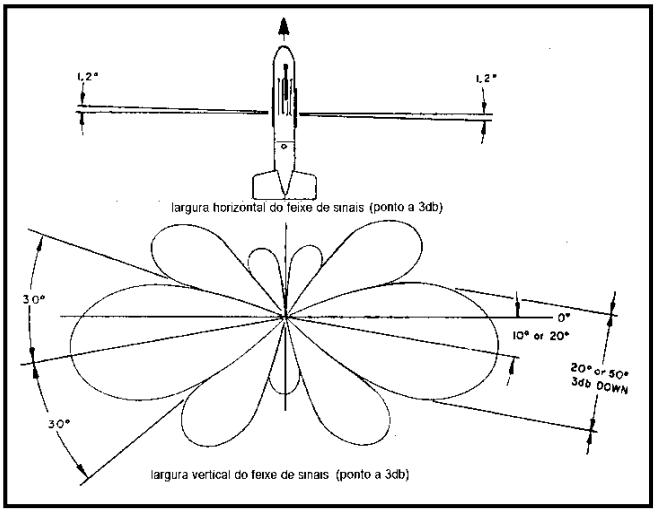


Figura 2: Geometria do sistema de aquisição de dados do sonar de varredura lateral. Vista do canal lateral esquerdo (Souza, 1988).

Os mesmos transdutores de emissão do sinal acústico são também responsáveis pela recepção do sinal, oriundos da reflexão ou do *backscattering* na superfície de fundo, e atuam independentemente um do outro. Os transdutores, geralmente constituídos por conjuntos de pastilhas piezelétricas, formam a parte principal do sistema, já que são os responsáveis pela conversão da energia elétrica original em energia mecânica (vibrações) que irá se propagar na coluna d'água, e vice-versa, quando do retorno do sinal, na forma de energia mecânica, ao transdutor, após refletir na superfície de fundo. Existem atualmente sistemas que utilizam fontes e receptores instalados em corpos distintos, mas este não é o padrão do arranjo fonte-receptor nos sonares de varredura lateral mais comuns.

Os sinais acústicos emitidos pelo sistema possuem propriedades, como largura, vertical e horizontal, do feixe e inclinação em relação ao plano da superfície da água conforme ilustrado na **Figura 3**. As pastilhas piezelétricas que compõem os sonares de varredura lateral operam com frequências comumente superiores a 100 kHz. Existem, entretanto sistemas de longo alcance que lidam com frequências mais baixas.

O sinal acústico de alta frequência emitido pelo sonar de varredura lateral não penetra através dos estratos sedimentares, já que emite altas frequências. Todavia, ao retornar ao transdutor, e finalmente ao sistema de recepção, à bordo da embarcação, esses sinais de alta frequencia geram imagens onde se pode observar informações detalhadas da subsuperfície de fundo, possibilitando a identificação, com grande precisão, de feições na superfície de fundo, como estruturas sedimentares, contatos litológicos e objetos diversos, tais como naufrágios, cabos e emissários submarinos, tema principal deste artigo.

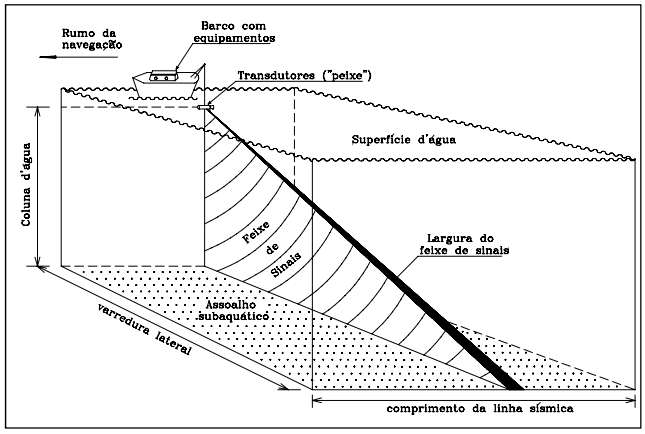


Figura 3: Principais características do sinal acústico emitido pelo sonar de varredura lateral: largura do feixe de sinais paralelamente à rota de navegação comumente inferior a 2º; inclinação do lóbulo principal de sinais, em relação à horizontal, comumente entre 10 e 20º; largura do feixe de sinais no plano perpendicular à rota de navegação, variando comumente entre 20 e 50º. Modificado de Mazel (1985).

Os sinais provindos da superfície de fundo são gravados à medida que chegam ao sistema de registro, de modo que os sinais oriundos de pontos mais próximos são gravados primeiro, e os de pontos mais distantes, posteriormente, compondo desta forma uma imagem do fundo da área investigada. A geometria dos registros de campo obtidos por meio da sonografia, denominados de sonogramas, está ilustrada na **Figura 4**.

São basicamente dois os mecanismos primários que permitem que o som emitido pelo sonar retorne ao transdutor: reflexão e *backscattering*.

A reflexão está relacionada com o sinal que atinge a superfície de fundo e retorna diretamente ao transdutor, numa reflexão total; o *backscattering* está relacionado com a interação entre a energia do som e a textura do material da superfície de fundo. A quantidade de energia que retorna ao transdutor, seja por qualquer um destes fenômenos, está diretamente relacionada, em primeiro lugar, com o tipo de pulso acústico emitido (cada equipamento possui propriedades especificas), e em segundo lugar, com o tipo de fundo e suas propriedades acústicas (impedância acústica etc.). Superfícies extremamente homogêneas favorecerão um baixo retorno dos sinais; superfícies heterogêneas, rugosas, propiciarão retorno do sinal com maior energia, pois neste caso, pelo menos estatisticamente, maior será a probabilidade da existência, na superfície de fundo, de micro áreas ou rugosidades, com faces voltadas para o transdutor, o que evidentemente contribui diretamente para o aumento das reflexões totais do sinal emitido na direção do transdutor (Souza, 2006).

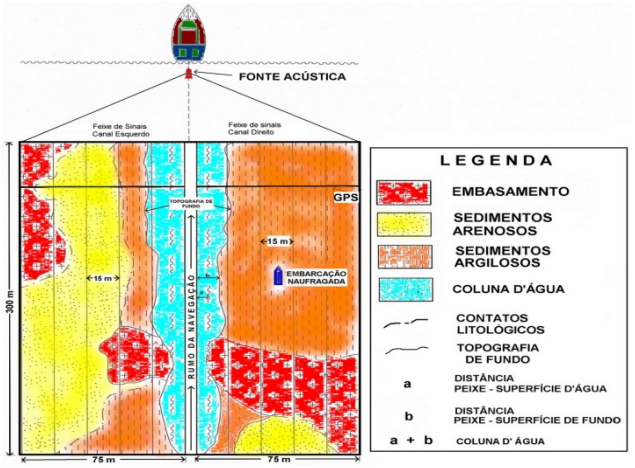


Figura 4: Características geométricas do registro de campo obtido por meio da sonografia (Souza, 1988).

De fato, ao se admitir uma superfície de fundo plana e lisa, os sinais sísmicos não retornariam ao transdutor, conforme ilustrado na **Figura 5**. A existência de rugosidades na superfície de fundo, seja devido à granulometria ou à micro e macrotopografia de fundo, é que proporcionará o espalhamento (*scattering*) do sinal incidente, e parte deste sinal atingirá os transdutores (*backscattering*). A intensidade do sinal oriundo da superfície de fundo é função também do ângulo de incidência do sinal emitido. Quanto mais rugosa a superfície de fundo e menor o ângulo de incidência, maior intensidade terá o sinal de retorno a ser registrado.

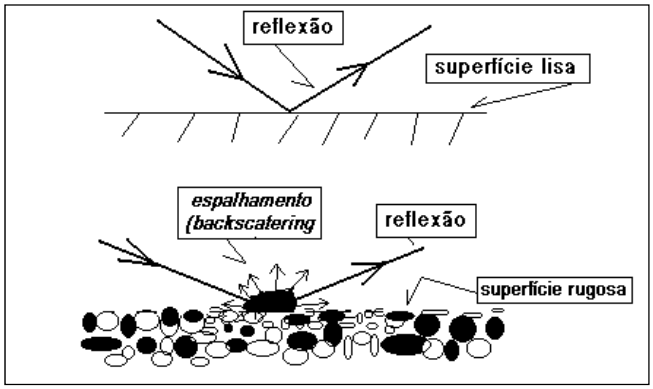


Figura 5: Reflexão e espalhamento (backscattering) do sinal acústico emitido pelo sonar. Modificado de Mazel (1985).

AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados por meio da sonografia é feita através de transdutores que podem ser afixados no casco de uma embarcação, ou rebocados na superfície ou próximo dela, quando da execução de levantamentos em áreas muito rasas. O mais comum, porém é rebocar os transdutores por meio de cabos com dupla função (tração e condução dos sinais), o que permite que estes se posicionem numa parte intermediária da coluna d'água e, portanto, distante da embarcação, garantindo desta forma uma melhor relação sinal/ruído, proporcionando a obtenção de registros de melhor qualidade. Nestes casos, os transdutores são montados em estruturas de aço, com formas hidrodinâmicas, denominadas de "peixe". A **Figura 6** ilustra um sistema de sonar de varredura lateral em operação no litoral de Santos, na área do emissário.

Observa-se que, no caso da opção por rebocamento da fonte acústica na coluna d'água, deve ser obedecida uma geometria que favoreça a projeção do sinal emitido na porção central do alcance lateral escolhido. Para que isto ocorra, durante o levantamento, os transdutores devem ser mantidos a uma distância do fundo equivalente a 10-15% do alcance lateral escolhido, ou seja, em levantamentos de áreas rasas, onde tipicamente se utilizam alcances laterais de 100-200 m, os melhores resultados vão ser colhidos com os transdutores (peixe) posicionados a uma altura de 10-20 metros em relação à superfície de fundo.



Figura 6: Sonar de Varredura Lateral Klein (pertencente ao IPT) em operação na Praia Grande, litoral de São Paulo, Brasil; a) foto à esquerda, a fonte acústica de dupla frequencia (100/500 kHz) denominada de "peixe"; b) foto à direita, equipe do IPT em operação de lançamento do peixe (ao fundo, a cidade de Praia Grande).

Normalmente transdutores do sonar de varredura lateral operam com uma única frequência e com único emissor de sinais instalado em cada lado do "peixe". Sistemas modernos têm utilizado com sucesso transdutores de dupla frequência, que permitem, ao mesmo tempo, a utilização de alcances laterais maiores, devido às baixas frequências (ao redor de 100 kHz), e a obtenção de grande resolução, devido às altas frequências (entre 300 e 500 kHz). Sistemas de altíssima resolução estão hoje também disponíveis. Alguns destes modelos são mostrados na **Figura** 7. Existem ainda disponíveis no mercado sistemas de altíssima resolução. Alguns fabricantes produzem sistemas com transdutores que emitem sinais com frequências, desde 600 até 1200 kHz, em alguns casos até 2400 kHz, que possuem aplicação mais restrita, comumente relacionada com operações de busca e salvamento e operações militares (localização de minas, por exemplo).

Uma tendência de evolução dos SVL que se constata atualmente é a construção de sistemas com mais de uma fonte acústica (sistemas multifeixes) de cada lado do "peixe". Os modelos 4300 MPX da *EdgeTech* e o *System* 5000 da *Klein* são bons exemplares desta tendência evolutiva do sonar de varredura lateral.

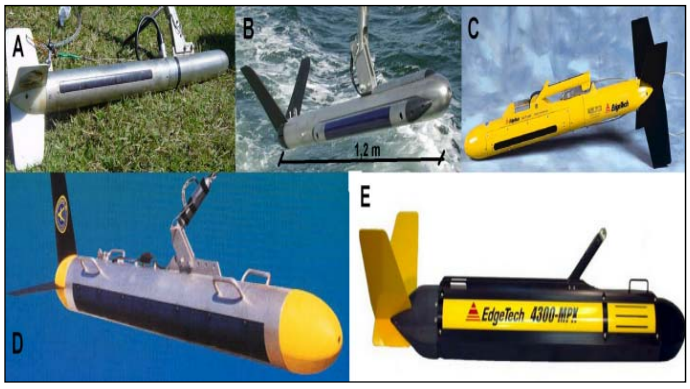


Figura 7: Exemplos de cinco modelos de "peixes" existentes no mercado mundial: a) modelo antigo Klein Hydroscan 530 (100kHz, pertencente ao IPT); b) sistema 3000 digital da Klein (132-445kHz, pertencente também ao IPT); c) modelo 272 TD digital da Edgetech (100-500 kHz); d) sistema de ultra-resolução multifeixe (2, 4 ou 8 feixes de cada lado) modelo 5000 (455kHz) da Klein; e) sistema de ultra-resolução multifeixe modelo 4300 MPX–410 kHz da Edgetech.

Com a emissão de sinais laterais a partir de mais de uma fonte acústica (multifeixes de 2, 4 ou 8 emissores), estes sistemas possibilitam a aquisição de dados com cobertura total da superfície, com a embarcação navegando em velocidades muito superiores àquelas convencionais, permitindo, deste modo, a obtenção de grande cobertura em área, num intervalo de tempo muito menor que o convencional, altíssima resolução e longo alcance lateral, contribuindo efetivamente para diminuição dos custos operacionais quando da investigação de grandes áreas. A título de exemplo, a **Figura 8** ilustra uma imagem de altíssima resolução obtida com a utilização destes sistemas. Neste caso, uma embarcação navegando a uma velocidade de 14 km/h, bastante superior à média (6-8 km/h) e com um alcance lateral de 75m, permitiu a detecção de detalhes centimétricos da superfície de fundo da área investigada.

APLICAÇÕES

O sonar de varredura lateral tem vasta aplicação na investigação de áreas submersas, contribuindo para a solução de várias questões em projetos de investigação geológica, geotécnica e oceanográfica nos quais é importante a caracterização geológica das superfícies submersas. A aplicação deste método de investigação possibilita a análise e caracterização de terrenos submersos, visando, por exemplo, em demandas ambientais, a

escolha e monitoramento de áreas para depósito de materiais dragados, mapeamento de recifes naturais ou artificiais. Na construção civil, a inspeção ou a obtenção de subsídios técnicos para projetos de obras submersas, tais como, pontes, píers, cabos, dutos, emissários submarinos, entre outros. Tem ainda grande aplicação em questões não necessariamente relacionadas à investigação geológica, tais como, operações de busca e salvamento de pessoas afogadas, veículos, barcos, aeronaves e equipamentos naufragados, e até mesmo em questões militares, de segurança nacional de áreas portuárias, quando das operações de busca de armas (minas etc.).

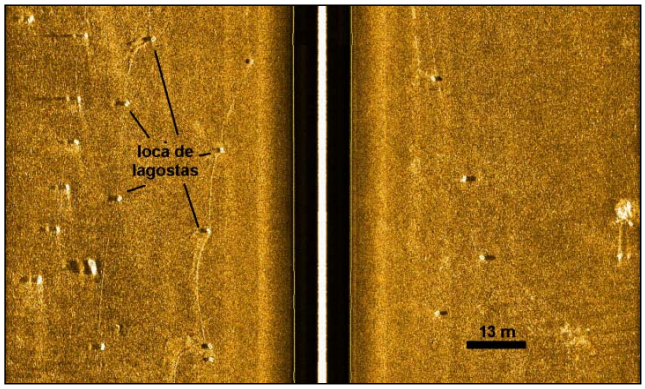


Figura 8: Imagem de altíssima resolução obtida por meio do sonar Klein System 5000 ilustrando detalhes centimétricos da superfície de fundo. Locas de lagostas de dimensões submétricas e as trilhas que as interligam são visualizadas em detalhe nesta imagem. Fonte: <http://www.l-3klein.com>.

Em estudos geológicos e oceanográficos, o SVL tem aplicação sem precedentes, pois possibilita o mapeamento detalhado (a depender da frequência empregada) das superfícies submersas, identificando estruturas sedimentares (Tessler & Souza, 1996, 1998; Souza, 1984, 1988, 1995; Lopes *et al.* 2003; Lancker *et al.*, 2004), afloramentos rochosos, *beachrocks*, recifes de corais (IPT, 2002; 2005, Dias *et al*., 1982; Dias, 2000), bancos arenosos, estruturas geológicas (falhas, lineamentos etc.) e a distribuição de sedimentos de fundo (Woodruff *et al*. 2001), características geológicas que muito contribuem para a compreensão da evolução geológica da área investigada e dos processos sedimentares atuantes. A **Figura 9** ilustra um exemplo de registro onde se identifica claramente o contato litológico entre afloramentos rochosos e a superfície sedimentar contígua.

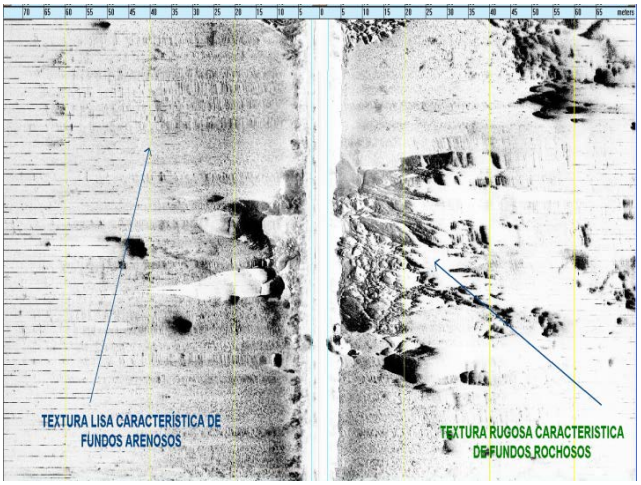


Figura 9: Exemplo de registro do sonar de varredura lateral obtidos na região de Ubatuba, litoral norte de São Paulo, Brasil, mostrando de forma clara o contato entre o afloramento rochoso e as formações sedimentares adjacentes (Rogacheski, 2011).

Este método de investigação de áreas submersas constitui-se assim em um poderoso instrumento, não só em estudos geológicos básicos, mas também nos estudos que envolvam a delimitação de áreas de riscos à integridade de estruturas instaladas, ou por instalar, tais como, plataformas exploratórias de petróleo, dutos de gás e petróleo, cabos de telecomunicações etc. Por áreas de riscos, entendem-se superfícies submersas com afloramentos rochosos, *beachrocks*, recifes de corais, taludes instáveis, cânions submarinos, evidências de depósitos de gás subsuperficiais, características estas identificáveis nas imagens do sonar de varredura lateral.

Na prospecção de materiais de construção (areias e cascalhos) em áreas submersas, esta técnica de investigação tem papel muito especial, não só na investigação da plataforma continental interna, como também das áreas costeiras, dos rios e dos reservatórios, já que é premente o esgotamento dos depósitos continentais destes materiais, ante o aumento da demanda, consequência do aumento da população e das necessidades inerentes referentes à construção civil. As imagens obtidas por meio SVL em projetos com este objetivo propiciam, de forma rápida e com excelente relação custo-benefício, o mapeamento detalhado da superfície de fundo. Os contrastes texturais identificados em imagens de sonar possibilitam identificar as áreas de ocorrência dos depósitos sedimentares, tornando viável a otimização do planejamento dos ensaios adicionais para avaliação do volume das jazidas mapeadas. A **Figura 10** ilustra exemplo de imagens obtidas em projeto desenvolvido com este objetivo no rio Paranapanema, (SP, Brasil).

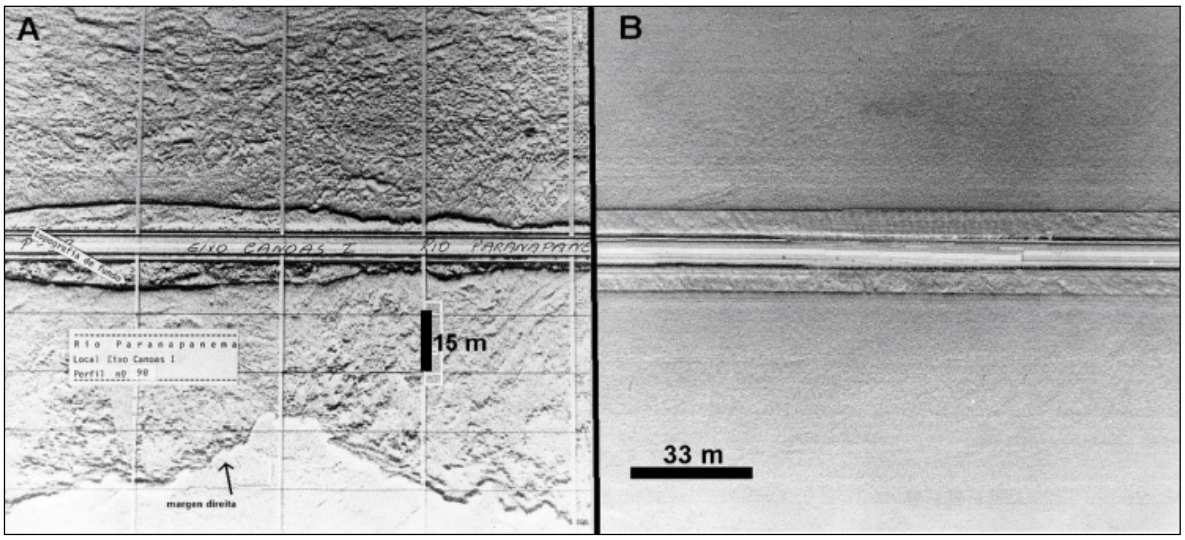


Figura 10: Registros obtidos de sonar de varredura lateral utilizado na prospecção de material de construção (areias) no rio Paranapanema (SP/PR) em subsídio a projeto de construção de barragem: a) registro com textura rugosa característica de fundos rochosos; b) registro com textura lisa e homogênea, característico de fundos com cobertura sedimentar arenosa. IPT (1990a,b).

Outra aplicação de destaque do SVL se dá nos estudos relativos a hidrovias, seja na fase de execução do projeto, seja nas fases posteriores de aperfeiçoamento de rotas de navegação, quando se precisa avaliar os dinâmicos processos sedimentares atuantes nos rios (IPT, 1998b, 2006). As imagens obtidas com este equipamento permitem identificar obstáculos à navegação de toda ordem, desde embarcações naufragadas, afloramentos rochosos, bancos de areia, árvores (comuns em reservatórios), características de fundamental importância, quando da necessidade do remodelamento ou redimensionamento de vias navegáveis, o que comumente implica a remoção de materiais.



Figura 11: Exemplos de imagens do sonar de varredura lateral mostrando: à esquerda, mostra contato entre afloramento rochoso e sedimentos; à direita, contato entre cascalhos (área sem estruturas sedimentares) e sedimentos arenosos. Registros obtidos no rio Araguaia em projeto financiado pela Finep – Financiadora de Estudos e Projetos (Processo 1780/06).

O sonar de varredura lateral tem também vasta aplicação em questões ambientais. O monitoramento de áreas de deposição de material dragado constitui-se num dos exemplos desta aplicação. Apesar do rígido controle existente quanto à rota de navegação e, portanto, da posição da embarcação no processo de transporte e descarga de sedimentos dragados em áreas predeterminadas, levantamentos com o sonar de varredura lateral permitem o monitoramento de detalhe das transformações que ocorrem na superfície de fundo da área de descarte, quando do lançamento do material dragado. Permitem ainda, principalmente quando associados com imagens de vídeo, observar se o material lançado se depositou efetivamente na posição esperada ou planejada. Um exemplo de superfície de fundo sob forte ação de dragagem pode ser observada na **Figura 12**.

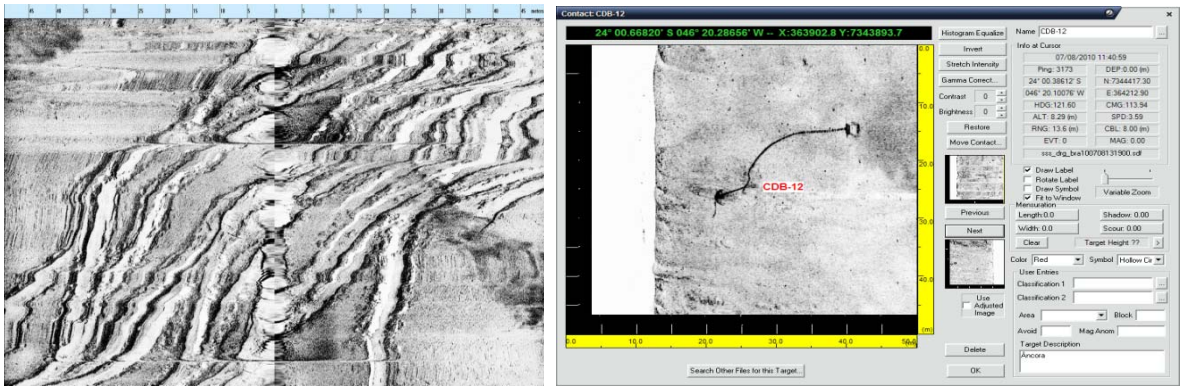


Figura 12: Imagem do sonar de varredura lateral obtido na área do canal de navegação do Porto de Santos. À esquerda, as estrias correspondem a marcas da ação da dragagem; à direita, a imagem mostra uma âncora abandonada na superfície de fundo do canal (IPT, 2010c).

O potencial de monitorar a superfície de fundo é, hoje em dia, ainda mais eficaz, pois a maioria dos SVL é atualmente digital possibilitando não só a interpretação dos registros ou das imagens, em tempo real, como a geração dos próprios mosaicos, também em tempo real, o que propicia uma ampla visualização da área estudada. As alterações texturais nas imagens sequenciais do SVL, oriundas de levantamentos sistemáticos em áreas submetidas a este tipo de atividade, permitirão certamente o monitoramento em detalhe da evolução dos processos atuantes nestas superfícies submersas. Excelentes exemplos de aplicação desta ferramenta no monitoramento ambiental estão ilustrados em Mosher & Currie (1997), que se utilizaram desta para monitorar uma das mais ativas áreas de descarga de material de dragagem na costa Oeste do Canadá e, em Garcia-Garcia *et al.* (1999) e Garcia-Garcia *et al.* (2005), que identificaram nas imagens de sonar de varredura lateral, obtidas na costa noroeste da Espanha (Vigo), marcas na superfície de fundo correlacionadas a pontos de exsudação de gás (*gas-seep pockmarks*), fenômeno relativamente comum em ambientes costeiros.

Ainda no contexto de questões ambientais, o SVL tem ainda larga aplicação no mapeamento de recifes de corais naturais, de recifes artificiais, e de afloramentos rochosos, principalmente em áreas cuja visibilidade é comprometida a partir de certa profundidade, tornando os métodos visuais convencionais inoperantes (observação visual, fotografia ou vídeo). Apesar da ocorrência em área ser praticamente desprezível, se comparada com a enorme área que corresponde às superfícies submersas sedimentares, as superfícies duras (afloramentos rochosos, recifes de corais etc.) têm papel de suma importância na biodiversidade submarina e, portanto, a delimitação das áreas de ocorrência destas feições cumpre papel relevante na investigação biológica (Bianchi *et al*., 2004).

As imagens ilustradas na **Figura 13** constituem-se em excelentes exemplos de aplicação deste método na identificação das ocorrências de recifes submersos. A precisa localização destas feições submersas (imagem da esquerda na **Figura 13**) na região de Abrolhos (BA) permitiu aos pesquisadores da *Conservation International do Brasil* executar mergulhos precisos nos pontos de interesse do projeto, obtendo desta forma maior rendimento operacional. No litoral do Paraná, o Instituto *Ecoplan* utilizou o sonar de varredura lateral para conferir ou identificar o arranjo dos recifes artificiais lançados próximos da costa paranaense (foto à direita na **Figura 13**), em local de péssima visibilidade, onde os métodos convencionais de observação direta (vídeos, fotografia etc.) não produziram resultados satisfatórios.

À parte do excelente desempenho na investigação geológica de superfícies submersas, o SVL tem também grande aplicação nas investigações relacionadas com a arqueologia subaquática e a operações de busca e salvamento.

Na arqueologia subaquática, as imagens obtidas com o SVL subsidiam efetivamente não só a localização, mas também o mapeamento detalhado de embarcações naufragadas de interesse arqueológico, conforme exemplo ilustrado na **Figura 14**.

Em operações de busca ou salvamento, as aplicações do SVL são as mais variadas e vão desde localização de naufrágios recentes, de embarcações e aeronaves e de corpos de indivíduos afogados, até utilização militar, no auxílio a projetos de mapeamento de detalhe de áreas costeiras para localização de minas enterradas. Os mais recentes exemplos de uso não-geológico do SVL têm sido dados por companhias seguradoras, que se utilizam deste sistema para localização de carros, barcos etc., desaparecidos em operações tidas, em princípio, como fraudulentas. Dezenas de veículos já foram encontrados em operações desta natureza nos EUA e na Austrália.

Excelentes imagens obtidas com estes objetivos podem ser visualizadas nas *homepages* dos fabricantes de sonar de varredura lateral (*L3 Klein*, *Edgetech*, *Marine Sonic*, entre outras).

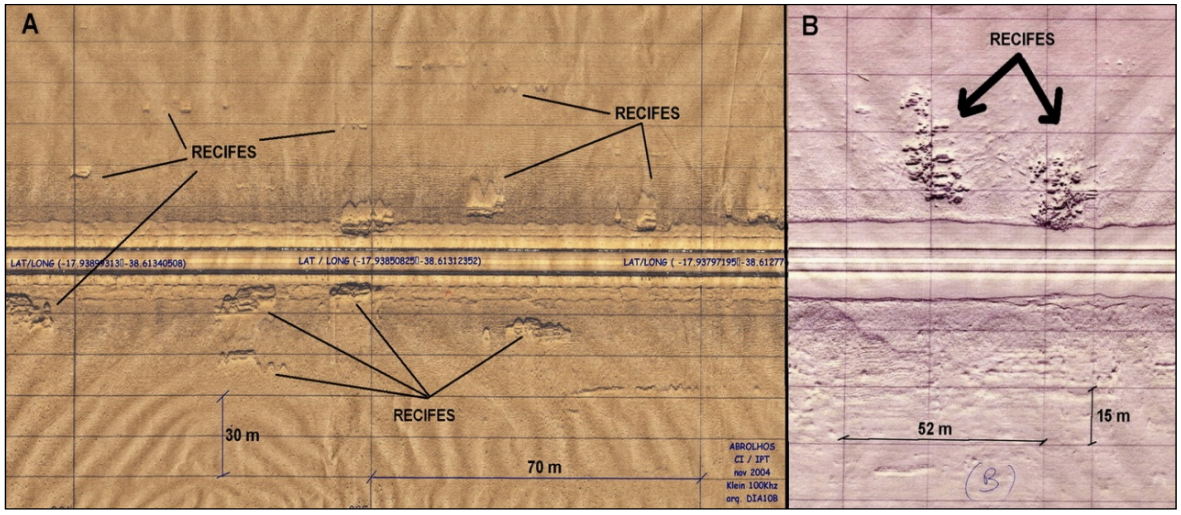


Figura 13: Exemplos de registros obtidos em áreas de recifes: a) recifes de corais em Abrolhos (BA), IPT (2005), Souza & Moura (2005); b) recifes artificiais na costa do Estado do Paraná, IPT (2002).

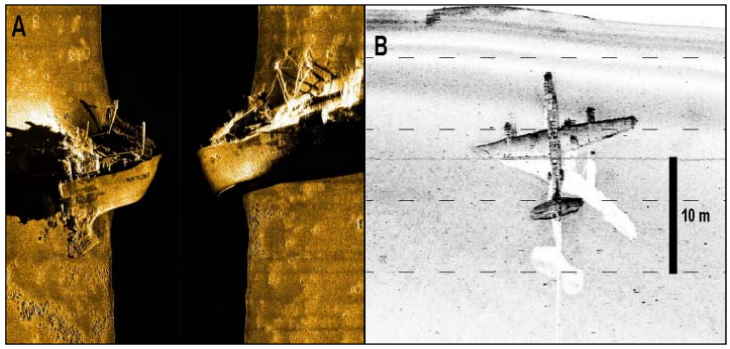


Figura 14: a)imagem obtida com um sonar de 500 kHz (Klein System 3000) mostrando detalhes do navio Empire Knight. Fonte: <http://www.l-3klein. com>; b)imagem obtida com o sonar Marine Sonic 600 kHz, mostrando a evidente aplicação do SVL na investigação de acidentes aéreos (Lago Washington, EUA). Fonte: <http:// www.marine sonic. com>.

Em projetos de busca com objetivos muito específicos, o sonar de varredura lateral pode até mesmo ser utilizado de modo múltiplo. Um dos clássicos exemplos deste modo de operação ocorreu em 1987, quando a Sociedade Internacional de Criptozoologia, coordenou o projeto denominado "*Operação Sondagem Profunda*", em que 24 embarcações executaram simultânea e paralelamente perfis com sonar de varredura lateral no lago Ness, na Escócia (**Figura 15**).

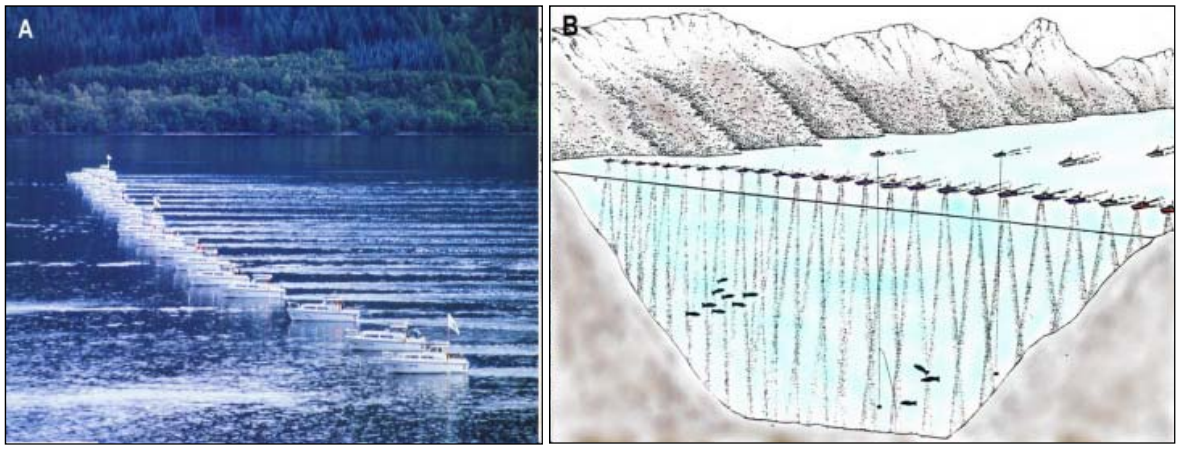


Figura 15: Exemplo do emprego de múltiplos sistemas de sonar de varredura lateral, visando a cobertura total (100%), e em tempo real, da largura (1.5 km) do lago Ness, Escócia: a) vista das 24 embarcações navegando paralela e simultaneamente; b) geometria (cobertura) do arranjo de sonares. Modificado de Abril Coleções (1996).

EMISSÁRIOS SUBMARINOS

Aspectos gerais

Emissário submarino é uma tubulação que se estende por alguns quilômetros, do continente para o mar e é disposto na superfície de fundo ou enterrado a alguns poucos metros de profundidade. Tem por objetivo lançar esgotos sanitários ou industriais no mar aproveitando-se da grande capacidade da água do mar de promover a diluição, a dispersão e o decaimento de cargas poluentes. Os emissários submarinos estão comumente integrados a sistemas de tratamento e disposição de esgotos sanitários instalados em terra. A construção de emissários é regulamentada pelo protocolo de Annapolis. O sistema de emissários submarinos é normalmente precedido por um interceptor de esgotos e por um emissário terrestre. Emissários submarinos longos (1-5km) são, comprovadamente, alternativas viáveis para assegurar uma baixa probabilidade (baixo risco) da pluma da mistura esgotos e águas marinhas atingir as zonas locais de balneabilidade.

No Brasil, existem pouco mais de duas dezenas de emissários submarinos e sub-fluviais, distribuídos nas áreas costeiras das grandes cidades. O primeiro emissário submarino projetado no Brasil foi o da praia de Ipanema, no Rio de Janeiro, em 1970. Existem também emissários sub-fluviais, e, Manaus e Belém são dois exemplos de cidades que contam com emissários desta natureza para lançamento de esgotos.

PROJETOS DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS

Um primeiro aspecto de relevância num projeto de instalação de um emissário submarino diz respeito à caracterização da superfície submersa de forma a garantir uma rota de implantação segura. A localização de afloramentos rochosos e de feições sedimentares ou estruturais são alguns dos aspectos identificados em estudos desta natureza, e que se constituem em informações de extrema relevância no estabelecimento do traçado final da rota de um emissário.

Com vistas à caracterização de superfícies submersas os principais métodos geofísicos utilizados são ecobatímetros de altas frequências (feixe único ou multifeixes), o sonar de varredura lateral e perfiladores sísmicos, que utilizam fontes acústicas que visam penetrar na superfície de forma a definir a espessura da cobertura sedimentar, característica importante pra definir o volume de material a ser dragado e a natureza do mesmo. A imagem ilustrada na **Figura 16** constitui-se num excelente exemplo de aplicação do sonar de varredura lateral. Nesta figura observa-se nitidamente o contato entre dois tipos de fundo: afloramento rochoso de um lado e, a cobertura sedimentar do outro. Outros exemplos da importância da caracterização das superfícies submersas visando a escolha de rotas para instalação de emissários submarinos pode ser visto em IPT (2002, 2005) e Souza (1988).

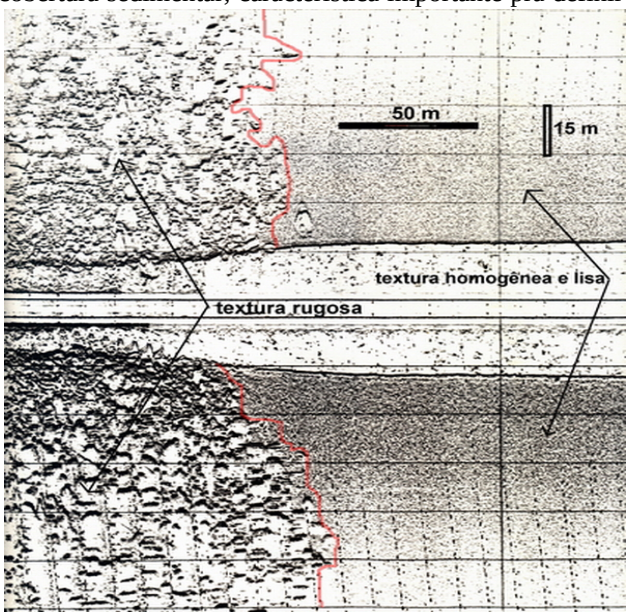


Figura 16: Imagem obtida no canal de São Sebastião (SP) por meio do sonar de varredura lateral, ilustrando, o nítido contato entre, de um lado, o fundo com textura lisa e homogênea interpretado como cobertura sedimentar, e do outro, um fundo com textura rugosa, característicos da ocorrência de afloramentos de rochosos. (Furtado, 2000; Souza, 2006).

MONITORAMENTO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS

Embora os procedimentos de investigação que precedem o estabelecimento de rotas seguras para um emissário submarino sejam bastante semelhantes a aqueles utilizados para o monitoramento dos mesmos, o foco da discussão deste artigo concentra-se no papel de extrema relevância exercido pelo método geofísico denominado de sonar de varredura lateral na fase do monitoramento do empreendimento.

A rota estabelecida para a instalação de um emissário submarino pode sofrer alterações durante a própria implantação ou durante a existência do emissário. Áreas costeiras e a plataforma continental interna constituem-se ambientes geológicos extremamente dinâmicos e estão sob constante ação dos ventos, correntes marinhas e marés, que se constituem agentes com grande energia e com poder para transportar/remover

sedimentos da superfície onde os dutos estão implantados, ou até mesmo remover os dutos da sua posição original.

Assim, monitorar a evolução do posicionamento dos emissários submarinos ao longo da existência dos mesmos constitui-se atividade fundamental para se garantir a efetivo cumprimento da missão para a qual foram construídos. Sob este ponto de vista, o sonar de varredura lateral constitui-se ferramenta extremamente importante, já que possibilita a obtenção de imagens de alta resolução, que nem sempre são possíveis de serem obtidas pelos métodos convencionais de investigação, tais como, mergulhos, fotografia, vídeos etc, tendo em vista a eventual ausência de luz a partir de determinadas profundidades. A Figura 17 ilustra uma imagem de alta resolução obtida com o sonar de varredura lateral onde é possível observar três dutos dispostos numa superfície de fundo. A **Figura 18** mostra imagem, também de alta resolução, do emissário submarino da Praia Grande, SP. Nesta imagem pode ser observado, com detalhes, o estado das conexões entre as partes dos dutos bem como do suporte do emissário. A **Figura 19** mostra um duto deslocado de sua posição original indicando a necessidade de reposicionamento do mesmo. A **Figura 20** mostra uma situação ainda mais crítica, pois o duto (linha negra contínua) projeta uma sombra (faixa branca, ora próxima do duto, ora afastada) que indica, quando afastada da do duto, que o mesmo está alçado da posição original, conseqüência provavelmente de forte ação erosiva que removeu os sedimentos da sua base.

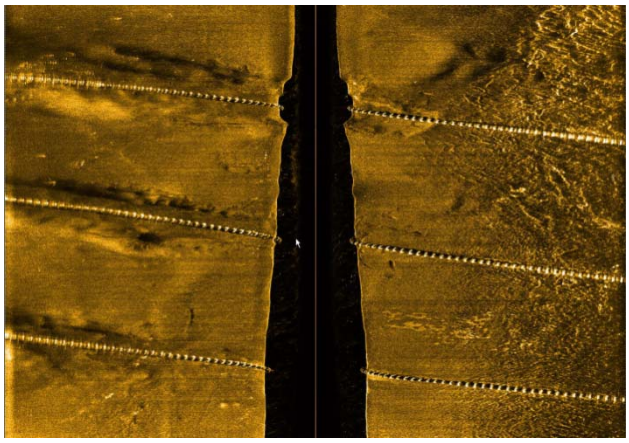


Figura 17: Imagem do sonar de varredura lateral mostrando três dutos dispostos na superfície de fundo em área costeira dos EUA. Imagem cedida pelo Dr. Garry Kozak, da L3 Klein Associates Inc.

Além da posição real e atual, e do estado de conservação das ligações entre as partes que compõe o duto, as imagens do sonar de varredura lateral permitem ainda observar se os mesmos estão enterrados ou parcialmente enterrados. O projeto inicial de um emissário submarino pode prever que o mesmo permaneça enterrado ao longo da sua vida útil, e, portanto protegido da ação de correntes, por exemplo. Este fato pode não ser verdadeiro, já que as condições ambientais originais ao projeto podem não ser as mesmas nos dias atuais, e, neste caso, existe a possibilidade de ter ocorrido remoção da cobertura sedimentar original, expondo os emissários a ações intempéricas não previstas no projeto original. A imagem ilustrada na **Figura 21** mostra um trecho do emissário submarino da Praia Grande, SP onde ele se encontra parcialmente enterrado na superfície de fundo, ao contrario da imagem ilustrada na **Figura 18** onde o emissário está completamente exposto na superfície de fundo.

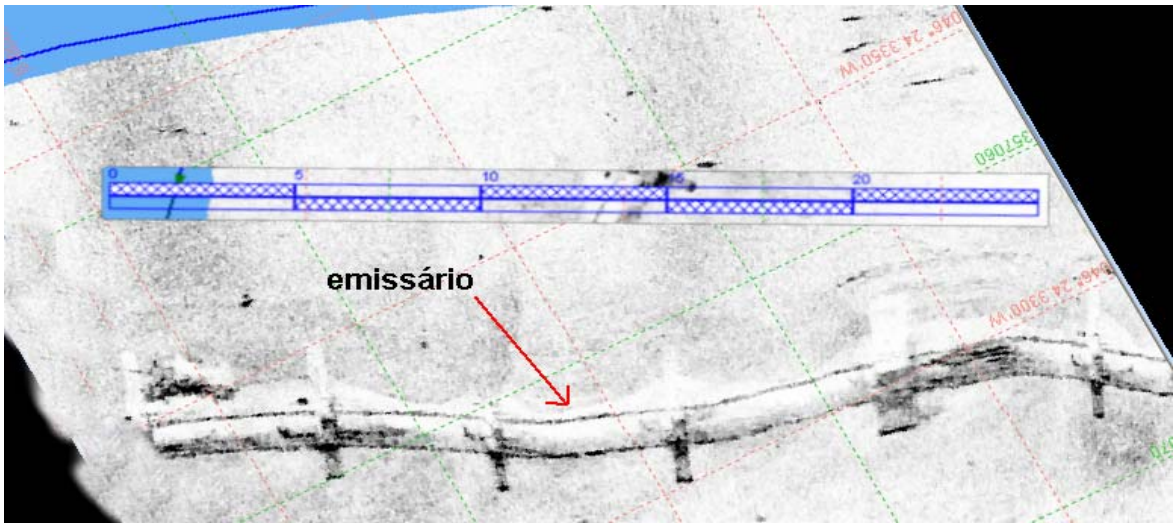


Figura 18: Imagem do sonar de varredura lateral de alta resolução obtido com um Sonar Klein 3000 de dupla frequencia pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Nesta imagem observa-se ainda, e com detalhes, a estrutura de suporte do emissário. Fonte IPT/ASA, 2011.

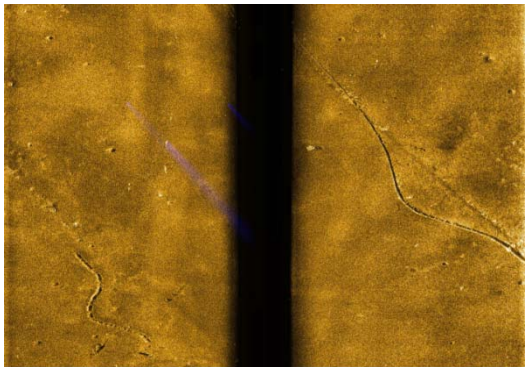


Figura 19: imagem do sonar de varredura lateral mostrando um duto na superfície de fundo deslocado de sua posição original, provavelmente em consequencia da passagem de alguma embarcação pesqueira. Imagem cedida pelo Dr. Garry Kozak, da L3 Klein Associates Inc.

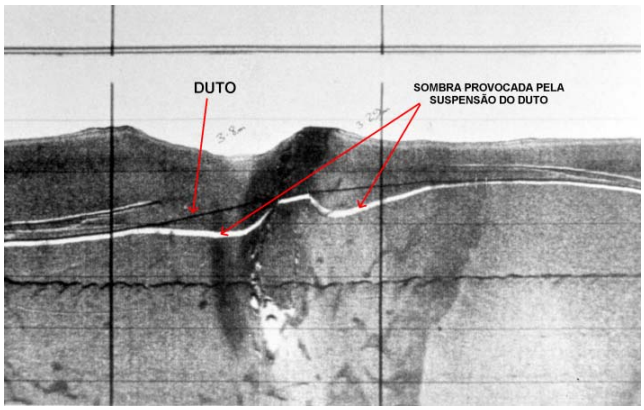


Figura 20: Imagem do sonar de varredura lateral (vista de um canal apenas) mostrando dois trechos nos quais o duto se encontra suspenso, provavelmente em consequencia da forte ação erosiva de correntes marinhas mobilizando os sedimentos que suportavam as estruturas, indicando, portanto locais críticos para manutenção. Imagem cedida pelo Dr. Garry Kozak, da L3 Klein Associates Inc.

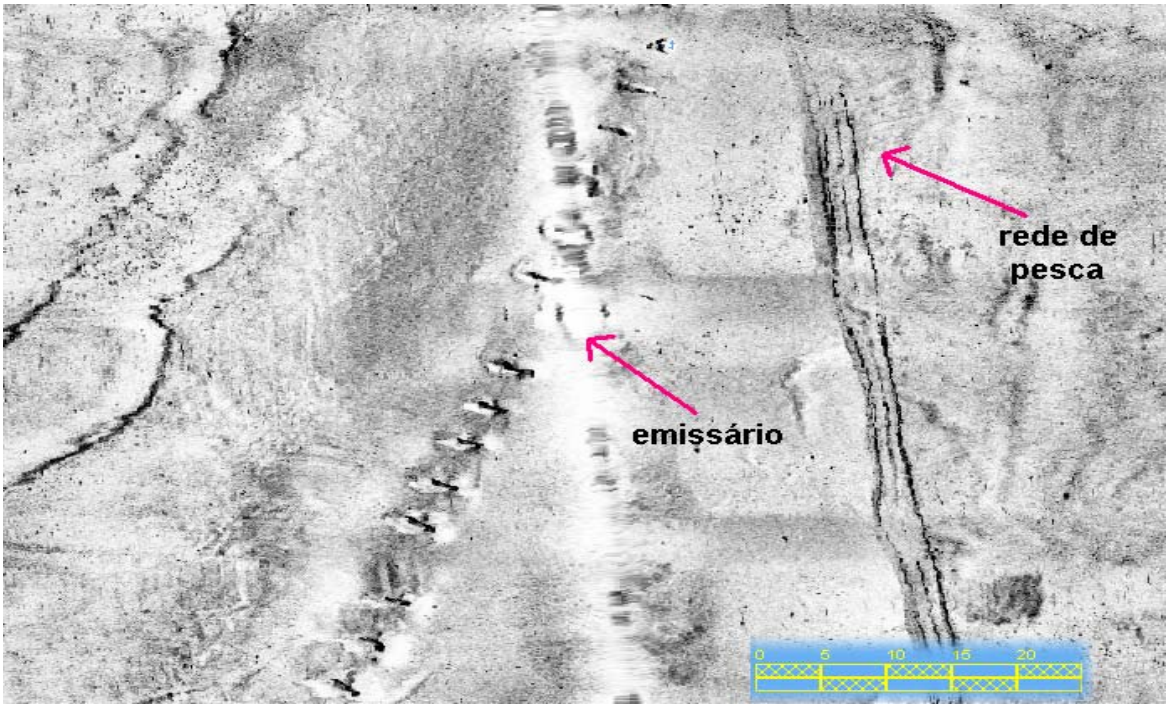


Figura 21: Imagem do sonar de varredura lateral Klein 3000 (100/500 kHz) mostrando o emissário submarino da Praia Grande, SP parcialmente enterrado, já que se observam apenas as estruturas de suporte do mesmo, distanciadas de cerca de 5m uma da outra. Fonte IPT/ASA, 2011.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os exemplos ilustrados neste artigo mostram claramente a importância do uso da ferramenta geofísica denominada sonar de varredura lateral não só na fase do planejamento das rotas dos emissários submarinos, mas também nas fases posteriores, em especial naquelas relativas ao monitoramento dos emissários. As

imagens apresentadas neste artigo mostram exemplos com nítidas evidências de alterações das condições originais do projeto de emissários.

A ação de correntes costeiras, marés, frentes frias entre outros fenômenos meteorológicos podem atuar de forma a alterar a posição original do emissário, prejudicar as conexões entre as unidades do duto, além de provocarem eventual remoção dos sedimentos, base de apoio das estruturas de suporte do duto, colocando-o em risco, conforme ilustrado na **Figura 20**. Vazamentos ao longo dos emissários poderão também ser evidenciados nas imagens do sonar de varredura lateral, já que ocorrências desta natureza provocam anomalias nas feições superficiais ao redor dos pontos críticos, facilmente notáveis nas imagens do sonar.

Assim, tais ferramentas de investigação tornam-se imprescindíveis em projetos de emissários submarinos, não só na fase de criação do projeto, mas principalmente na fase de monitoramento dos emissários, de forma a garantir o do empreendimento em qualquer destas fases.

Sonares de varredura lateral que lidam com frequências maiores que 300 kHz certamente fornecerão resultados ainda mais interessantes ao projeto, tendo em vista a alta resolução das imagens adquiridas quando produzidas por sistemas acústicos que lidam com frequências desta ordem de grandeza.

Cumpre salientar que o uso do sonar de varredura lateral em projetos, ou no monitoramento, de emissários submarinos, não elimina a utilização dos métodos convencionais de observação do assoalho marinho, como por exemplo, operações de mergulho, mas certamente aperfeiçoa estas operações, tendo em vista a possibilidade oferecida por este método de observação contínua de um emissário ao longo de toda a sua extensão sob uma velocidade relativamente rápida (cerca 5 -7 km/h) promovendo uma excelente relação custo – benefício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRIL COLEÇÕES. Criaturas Misteriosas. Mistérios do Desconhecido. Abril Livros Ltda. Rio de Janeiro. 3ª Edição. 144p. 1996.
2. BIANCHI, C.N.; R. PRONZATO; R. CATTANEO-VIETTI; L.B. CECCHI; C. MORRI; M. PANSINI; R. CHEMELLO; M. MILAZZO; S. FRASCHETTI; A.TERLIZZI; A. PEIRANO; E. SALVATI; F. BENZONI; B.CALCINAI; C. CERRANO & G BAVESTRELLO. Hard bottoms. Biol. Mar. Medit. 11(suppl. 1): 185-215. 2004.
3. DIAS, G.T.M.; M.A. GORINI; C.G. GALLEA; C.R.S. ESPINDOLA; S.M. MELLO; H. DELLAPIAZZA & J.R.J.C. CASTRO. Bancos de arenito de praia (beachrocks) submersos na plataforma continental SE brasileira. In: Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, 32. Salvador, BA, p.1540-1546, set. 1982.
4. DIAS, GILBERTO T. M. Granulados bioclásticos: algas calcárias. *Rev. Bras. Geof*vol.18, no.3, p.307-318. 2000.
5. FURTADO V.V.; L.A. CONTI & M. RODRIGUES. 2000. Bottom Topography, sedimentation and origin aspects of São Sebastião Channel, SP, Brazil. In: International Geological Congress, 31. Rio de Janeiro, RJ, 6 a 17 de agosto de 2000. General Proceedings. Boletim de Resumos. CD-ROM.
6. GARCÍA-GARCÍA, A.; F. VILAS & S. GARCÍA-GIL 1999. A seeping sea-floor in a Ría environment: Ría de Vigo (NW Spain). Environmental Geology, 38(4):296-300.
7. GARCÍA-GARCÍA, A.; S. GARCÍA-GIL & F. VILAS. Quaternary evolution of the Ría de Vigo, Spain. Marine Geology, 220(1-4): 153-179. 2005.
8. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Ensaios geofísicos em lâmina d'água - rio Paranapanema, SP. CESP. Relatório Técnico IPT no. 27225. 2v. 150p. 1990a.
9. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Ensaios geofísicos complementares em lâmina d'água - rio Paranapanema, SP. CESP. Relatório Técnico IPT no. 28899. 228p. 1990b.
10. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Ensaio Geofísico com radar de penetração aplicado à engenharia no barracão de manutenção da ferrovia atlântico sul - Curitiba, PR. Ambiente Engenharia Sanitária e Ambiental. Relatório Técnico IPT no. 37452. 1998.
11. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento geofísico com o sonar de varredura lateral para mapeamento de recifes artificiais na plataforma continental rasa do litoral sul do Estado do Paraná. IPT / Instituto Ecoplan. Relatório Técnico IPT no. 58707. 75p. 2002.
12. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento geofísico para mapeamento de recifes na plataforma continental rasa do litoral sul do Estado da Bahia.. Conservation International do Brasil – CI. Relatório Técnico IPT no. 74072-205. 41p. 2005.

13. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Aspectos geológicos e geotécnicos da Hidrovia Tietê-Paraná a jusante da eclusa de Barra Bonita, no canal de Igaraçu (SP). Secretaria de Estado dos Transportes – Departamento Hidroviário – DH. Relatório Técnico 86.544-205. 2006.
14. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento sonográfico-batimétrico da margem direita do reservatório Porto Primavera (trecho Cateto - Três Barras). CESP. Relatório Técnico IPT nº. 113961-205, 74p. 2009.
15. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento Sonográfico do Berço 1 do Porto de São Sebastião, Litoral Norte do Estado de São Paulo. DTA-Engenharia. Relatório Técnico IPT nº. 115567-205, 44p. 2010a.
16. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento geofísico (sonar de varredura lateral e perfilagem sísmica contínua) em São João da Barra (RJ). ASA South America. Relatório Técnico IPT nº. 118188-205, 118p, 2010b.
17. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Levantamento geofísico (sonar de varredura lateral e perfilagem sísmica contínua) do canal de Santos (SP). Consórcio DragaBrasil. Relatório Técnico IPT nº. 118066-205, 74p, 2010c.
18. LANCKER, V.; J. LANCKNEUS; S. HEARN; P. HOEKSTRA; F. LEVOY; J. MILES; G. MOERKERKE; O. MONFORT & R. WHITEHOUSE. Coastal and nearshore morphology, bedforms and sediment transport pathways at Teignmouth (UK). Continental Shelf Research 24:1171-1202. 2004.
19. LOPES, A.L.M; C.G. SILVA & G. T. M. DIAS. 2003. Caracterização sonográfica das feições arenosas de fundo da plataforma continental interna e média a sul da Bacia de Campos. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf, 8. Rio de Janeiro, RJ, 14 a 18 de setembro de 2003. Boletim de Resumos Expandidos. CD-ROM. 1985.
20. MCQUILLIN, R. & D.A. ARDUS. 1977. Exploring the geology of shelf seas. London, Grahan & Trotman Limited. 230p.
21. Mosher, D.C. & R.G. Currie. 1997. Monitoring of ocean disposal using side-scan mosaicing. Lead. Edge, p.1667-1670.
22. ROGACHESKI, C. E. 2011. A Dinâmica Sedimentar e a Caracterização de Zonas de Erosão Acentuada (ZEA) ao Longo do Arco Praial de Massaguaçu, SP. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 168p.
23. SOUZA, L.A.P. ; MOURA, R. L. . Aplicações do sonar de varredura lateral para planejamento ambiental em áreas recifais: o exemplo do Banco de Abrolhos, Ba. In: 9 Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2005, Salvador. Anais do evento em CD-ROOM, 2005
24. SOUZA, L.A.P. 1984. Side Scan Sea floor mapping on Tanegashima Western offshore area. Technical Reports Group Training Course in Offshore Prospecting. Japan International Cooperation Agency. Publicação Interna do Serviço Geológico do Japão - GSJ. V.1, p.13-35.
25. SOUZA, L.A.P. 1988. As técnicas geofísicas de Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e Sonografia aplicada ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, PA, 6 a 13 de novembro de 1988. Anais, 4: 1551-1564.
26. SOUZA, L.A.P. A planície costeira Cananéia-Iguape, litoral sul do Estado de São Paulo: um exemplo de utilização de métodos geofísicos no estudo de áreas costeiras. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da USP. 201p. 1995.
27. SOUZA, L.A. P. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas.. Tese de doutorado apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 311p. 2006.
28. TESSLER, M.G. & L.A.P. SOUZA. Dinâmica sedimentar e feições sedimentares identificadas na superfície de fundo do sistema Cananéia-Iguape, SP. Rev. Bras. Oceanograf., 46(1): 69-83. 1998.
29. TESSLER, M.G. & L.A.P. SOUZA. Feições sedimentares identificadas na superfície de fundo do canal do Mar Pequeno, sistema Cananéia-Iguape, SP. III Simpósio sobre Oceanografia, 3. São Paulo, SP, 2 a 6 de dezembro de 1996. Boletim de resumos, 1: 357. 1996.
30. WOODRUFF, J.D.; W.R. GEYER; C.K. SOMMERFIELD & N.W. DRISCOLL. Seasonal variation of sediment deposition in the Hudson River estuary. Marine Geology, 179: 105-119. 2001.