

# USO DA SÍSMICA DE REFLEXÃO DE ALTA RESOLUÇÃO E DA SONOGRAFIA NA EXPLORAÇÃO MINERAL SUBMARINA

Arthur Ayres Neto

*Received September 14, 2001 / Accepted December 05, 2001*

Este artigo é uma introdução sobre algumas técnicas geofísicas acústicas que podem ser usadas na pesquisa aplicada a mineração submarina. O sonar de varredura lateral, assim como a perfilagem sísmica de alta resolução são métodos geofísicos acústicos que permitem a investigação da distribuição superficial de sedimentos no fundo do mar e a identificação de estruturas geológicas sub-superficiais e camadas sedimentares com potencial para exploração mineral. Os dois métodos usam a propagação e reflexão de ondas acústicas através da coluna d'água e das camadas sedimentares a medida que estas ondas passam de um meio para o outro. A quantidade de energia que é refletida pela interface depende de diversos fatores tais como ângulo de incidência, impedância acústica e rugosidade do fundo do mar. Através da amplitude do sinal de retorno é possível classificar diferentes tipos de sedimentos correlacionando a intensidade do eco com a dureza da cobertura sedimentar do fundo do mar. É este sinal que carrega informações sobre a geologia do fundo do mar. Estas informações são muito importantes na avaliação do potencial mineral de uma área de interesse.

**Palavras-chave:** Perfilagem sísmica; Sonografia; Classificação de sedimentos; Exploração mineral.

**HIGH RESOLUTION SEISMIC REFLECTION AND SONOGRAPHY IN SUBMARINE MINERAL EXPLORATION** - *This paper gives an introduction about some acoustical geophysical techniques that can be used in the marine mineral exploration. The side scan sonar and reflection seismic are acoustic tools that allow the investigation of the sediment distribution on the seafloor as well as the identification of subsurface geological structures and sedimentary layers that favors mineral concentration. Both methods use the propagation and reflection of acoustic waves through the water column and the sedimentary sequence as the waves pass from one medium to another. The amount of seismic energy that is reflected depends on several different factors such as incidence angle, acoustic impedance and roughness of the seafloor. With the amplitude of the signal it is also possible to classify different kinds of sediments correlating the echo strength with hardness of the seafloor. It is this signal that carries information about the geology of the seafloor. These informations are very important for the evaluation of the mineral potential of a given area.*

**Key words:** *Seismic profiling; Side scan sonar; Mineral exploration.*

Consultor em Geofísica Marinha  
Rua Pereira Nunes, 124 apto. 501, Ingá, Niterói, RJ.  
24210-430, Brasil  
tukione@ajato.com.br

## INTRODUÇÃO

A geofísica estuda o planeta Terra através da medição de suas propriedades físicas. Existem diversos tipos de métodos geofísicos, cada um relacionado à medida de uma propriedade física do nosso planeta tais como a velocidade de propagação e atenuação de ondas P e S, a eletrorresistividade, o potencial induzido, a radioatividade gamma natural, os campos gravitacional e magnético e o fluxo de calor. A medição de cada uma destas propriedades fornece informações valiosas sobre as características geológicas de uma determinada área de interesse.

As ferramentas geofísicas mais importantes para o estudo do fundo dos oceanos se baseiam na propagação de ondas acústicas. Os principais métodos de investigação do fundo e sub-fundo marinho que utilizam a propagação de ondas acústicas são a sísmica, a sonografia e a batimetria. Estes sistemas de aquisição funcionam segundo o mesmo princípio: a emissão, transmissão e reflexão de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas (coluna d'água, camadas sedimentares, etc.). Neste trabalho serão destacadas a utilização da sonografia e a sísmica de alta resolução na prospecção mineral marinha.

A sonografia fornece informações sobre as características morfológicas e sedimentológicas do fundo do oceano. Ela mostra feições expressivas do relevo e a variação da distribuição superficial dos sedimentos. Em certas condições, pode fornecer ainda informações sobre a ação de correntes marinhas sobre estes sedimentos. Os registros sonográficos são capazes de mostrar também a presença de qualquer objeto sobre o fundo do mar como navios naufragados e estruturas de produção *offshore*.

A sísmica por sua vez fornece dados sobre a disposição estrutural das camadas sedimentares abaixo do fundo marinho. Através de um registro sísmico é possível avaliar parâmetros como espessura de camadas, mergulho, presença de falhamentos, ocorrências de acumulações rasas de gás biogênico e deslizamentos submarinos.

A classificação de sedimentos do fundo do mar é a organização de tipos de fundo em unidades distintas de acordo com a característica do sinal de retorno.

O equipamento utilizado para esta tarefa é um ecobatímetro convencional conectado a um conversor analógico / digital que transforma o sinal analógico recebido numa seqüência de bits de informação. Todo o sistema é ligado em tempo real a um computador que identifica e categoriza cada eco recebido de acordo com diferentes algoritmos que descrevem o sinal através de características como amplitude, comprimento de onda e fase.

A grande vantagem desses métodos está na alta taxa de aquisição de dados em um curto período de tempo. Os dados, após serem devidamente processados, fornecem valiosas informações sobre a área investigada, permitindo assim que o número e localização de amostras sejam determinados do modo mais eficiente, reduzindo os custos finais do projeto. Por esta razão, a sísmica de reflexão e sonografia vêm sendo amplamente utilizados na exploração de recursos minerais em águas rasas e profundas.

## PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS: CONCEITUAÇÃO

O sensoriamento remoto acústico é o principal meio de investigação do fundo do mar, visto que os métodos de sensoriamento remoto convencionais, óticos e radar, são pouco eficientes devido a alta atenuação das ondas eletromagnéticas pela água do mar. As ondas acústicas são geradas com facilidade e pouco absorvidas pela água do mar permitindo a realização de levantamentos nas regiões mais profundas dos oceanos assim como investigar camadas geológicas até alguns quilômetros abaixo do fundo submarino.

A velocidade de propagação de ondas acústicas em um meio qualquer é função de suas constantes elásticas como módulo de Young (E), módulo de Poisson ( $\nu$ ), módulo de rigidez ( $\mu$ ) e módulo de compressão (k). Estas constantes variam de acordo com o material e relacionam a quantidade de deformação sofrida por um material em função da força exercida sobre ele. A velocidades de propagação das ondas P (ondas longitudinais) e S (ondas transversais) são definidas pelas equações (Schön, 1996):

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

onde  $r$  é a densidade do meio em que a onda se propaga. Como o módulo de rigidez da água é igual a zero, as ondas do tipo S não conseguem se propagar neste meio.

Na água do mar as ondas acústicas se propagam com uma velocidade em torno de 1500 m/s. A variação da velocidade na água do mar depende basicamente da salinidade não sofrendo muita influência da pressão e da temperatura. A velocidade de propagação nos sedimentos, por sua vez, depende basicamente de duas das constantes relacionadas acima, os módulos de compressão e rigidez. De acordo com Woods (1991), os fatores que controlam estes parâmetros em sedimentos marinhos são porosidade, pressão de confinamento, grau de saturação e temperatura. Os sedimentos marinhos inconsolidados são materiais com mais de uma fase (sólida = grãos, líquida = fluido intersticial). Em alguns casos pode ocorrer a presença de gás biogênico ou mesmo ar fazendo com que o sedimento seja constituído por três fases. Por isso suas propriedades elásticas medidas são um valor resultante das propriedades elásticas de seus componentes, relativo a sua presença e volume. Tao et al. (1995) mostrou que a propagação de ondas P em sedimentos marinhos está ligada ao módulo de compressão do fluido intersticial. Este fato é claramente observado ao compararmos a velocidade de propagação em um sedimento saturado com água e outro, com o mesmo conteúdo de sólidos mas contendo gás. Devido ao módulo de compressão muito baixo do gás quando comparado ao da água, a sua presença, mesmo em pequenas proporções, domina o módulo de compressão final do sistema, reduzindo a velocidade de propagação das ondas acústicas nos sedimentos. A velocidade de ondas P pode variar entre 800 m/s em sedimentos marinhos superficiais saturados com gás e 4000 m/s em rochas sedimentares depositadas nas partes mais profundas de uma bacia.

A impedância acústica ( $I$ ) é definida como sendo o produto entre a velocidade do som ( $V$ ) e a

densidade ( $r$ ) de um determinado meio segundo a equação. A velocidade do som na água do mar é relativamente constante em todos os lugares do mundo pois suas propriedades variam muito pouco dadas a mesma temperatura, pressão e varias salinidades esperadas. Por outro lado, a densidade dos sedimentos de fundo é função basicamente da mineralogia, da porosidade e do teor de água. Estes fatores variam localmente em maior escala, controlando portanto de maneira mais intensa a impedância dos sedimentos. O coeficiente de reflexão é função da diferença de impedância acústica entre dois meios (neste caso a água do mar e os sedimentos do fundo). Quanto maior for esta diferença, maior será a quantidade de energia refletida. Um sedimento mais compacto, menos poroso e com um teor de água menor será mais denso e refletirá uma quantidade maior de energia. Afloramentos rochosos também apresentam alta refletividade acústica (as mais altas). Por outro lado, sedimentos porosos e saturados, com densidade pouco maior que a água do mar serão pouco refletivos.

É justamente esta variação nas propriedades de materiais que permite a aplicação dos métodos acústicos: quando uma frente de ondas se desloca e encontra uma interface entre dois meios físicos com propriedades elásticas diferentes parte da energia será transmitida para o segundo meio, parte será refletida de volta para cima e parte será absorvida. A quantidade de energia refletida e transmitida, assim como o grau de absorção é resultado de uma série de fatores que atuam simultaneamente e de maneira complexa. No entanto, é este eco que carrega as informações necessárias para interpretação da geologia do fundo marinho. Este eco pode ser registrado a partir de sistemas como o sonar de varredura lateral e sistemas sísmicos, cuja aplicação na exploração mineral do fundo submarino será discutida a seguir.

## SONOGRAFIA

O sonar de varredura lateral é um equipamento rebocado por uma embarcação que emite um feixe lateral de ondas acústicas produzindo uma imagem acústica do fundo do mar cujo resultado final em muito

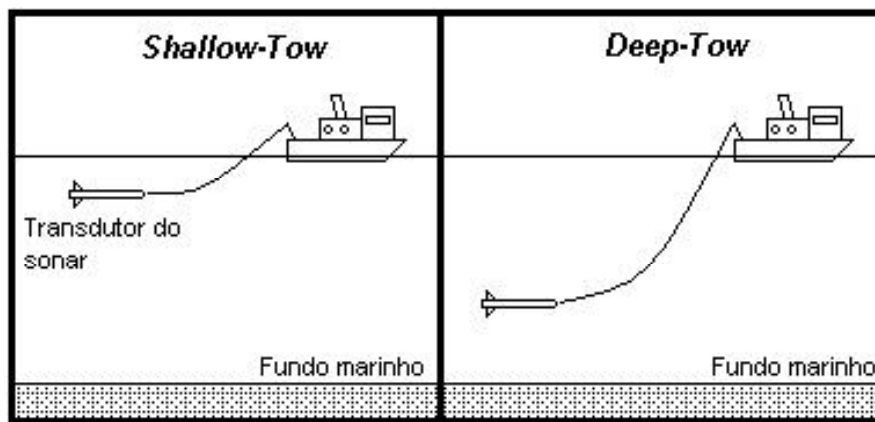


Figura 1 - Tipos de sonar de varredura lateral.

se assemelha a uma fotografia aérea. Os sistemas de sonares de varredura podem ser divididos em 2 grupos: a) rebocados próximo a superfície do mar (*shallow-tow*) e, b) rebocados próximo ao fundo (*deep-tow*). A figura 1 mostra os diferentes sistemas de sonar de varredura lateral.

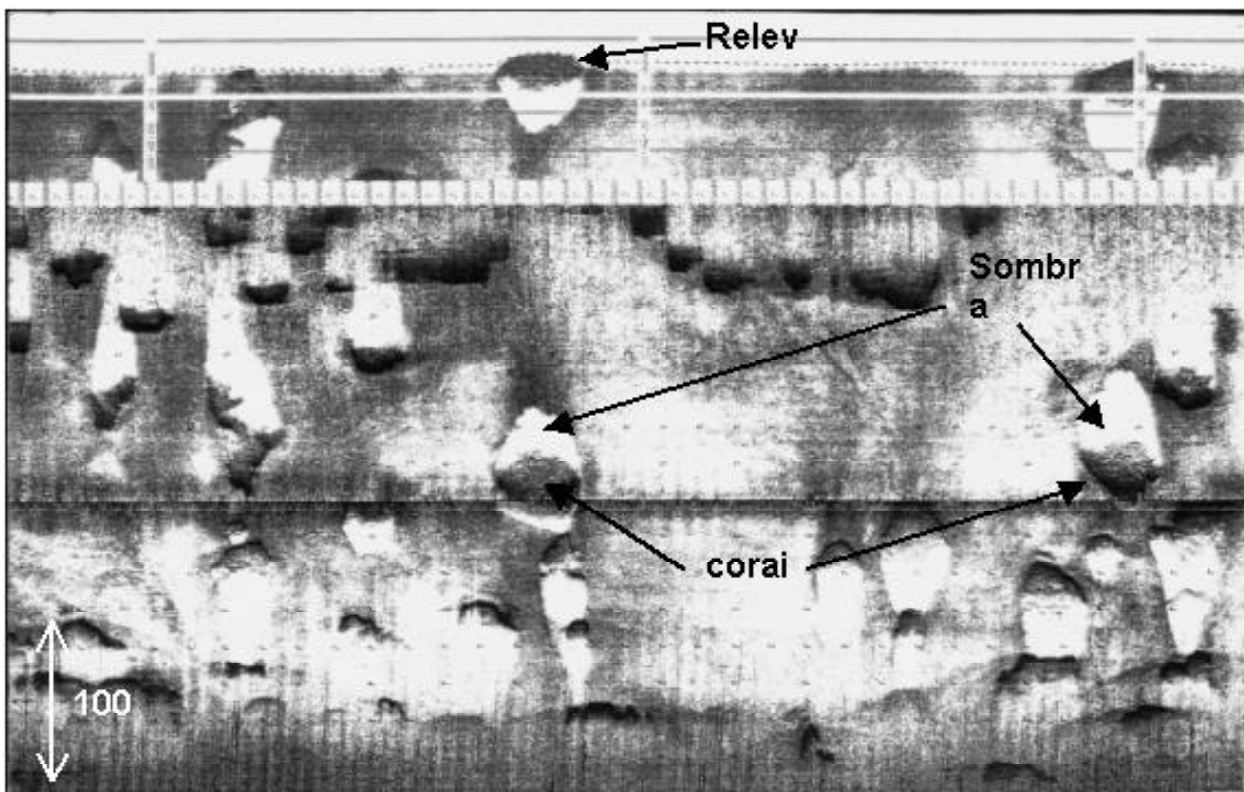
Os equipamentos do tipo shallow-tow operam em um intervalo de frequência mais baixo (6 a 12 kHz) e servem para mapeamentos em grande escala, como para o reconhecimento de grandes feições do fundo submarino como zonas de fratura e vulcões submarinos. Os mais famosos sistemas shallow-tow são o *GLORIA*, operado pelo Centro Oceanográfico de *Southampton* e pelo Serviço Geológico Americano (*USGS*), e o sistema *SeaMARC II*, da Universidade do Havá. Estes sistemas têm a capacidade de sondarem áreas de até 20 mil km<sup>2</sup> em um único dia, imageando uma faixa de 60 km (30 km para cada lado do equipamento). Os sistemas deep-tow são menores e mais baratos e são utilizados por

empresas privadas e agências governamentais. Estes sistemas operam em um intervalo de frequências entre 100 a 500 kHz, dependendo do modelo, e possuem uma capacidade de varredura máxima da ordem de 2 mil metros (mil metros para cada lado). São sistemas de maior resolução e usados para levantamentos ambientais e ligados a projeto de engenharia offshore. O tipo de equipamento a ser utilizado vai depender da escala do levantamento e do nível de resolução que se pretende. Quanto maior a definição desejada maior deve ser a frequência utilizada. No entanto, devido à atenuação do sinal pela água do mar a faixa do fundo do mar a ser estudada vai ser bem mais estreita. A tabela 1 mostra as características dos principais sistemas de sonar de varredura utilizados.

A imagem sonográfica é formada pelo eco do sinal emitido que retorna ao equipamento com intensidades distintas de acordo com uma série de fatores. Os principais são o tipo de sedimento do fundo, o ângulo de incidência, a micromorfologia do fundo marinho e

	GLORIA	TOBI	[TAMU] <sup>2</sup>	Edge Tech DF1000	Klein 520
<b>Operador</b>	SOC, USGS	SOC	Texas A&M	Empresas / Universidades	Empresas / Universidades
<b>Tipo</b>	Shallow-tow	Deep-Tow	Shallow-tow	Deep-Tow	Deep-Tow
<b>Varredura</b>	Até 60 km	6 km	100 m – 30 km	50 a 2.000 m	25 a 600 m
<b>Cobertura</b>	20.000 km <sup>2</sup>	470 km <sup>2</sup>	< 13.000 km <sup>2</sup>	Função da velocidade	Função da velocidade
<b>Frequência</b>	6,3 / 6,7 kHz	30 / 32 kHz	11/12 kHz	100 / 500 kHz	500 kHz
<b>Resolução</b>	175 x 45 m	8 x 3,5 m	-	< 1 m	< 1 m

Tabela 1. - Características dos principais sistemas de sonar de varredura lateral.



**Figura 2** - Exemplo de um registro de sonar de varredura lateral. O registro mostra um banco de coral com lama ao redor. (Cortesia Gilberto Dias - UFF/ Lagemar).

a atenuação das ondas acústicas (Blondel & Murton, 1997).

O ângulo de incidência é definido como o ângulo entre o feixe incidente e a tangente do fundo oceânico no ponto de incidência. Este ângulo depende da distância do transdutor em relação ao fundo marinho e da inclinação do fundo. De uma maneira geral, a quantidade de energia refletida é maior para os feixes mais internos e menor para os feixes mais externos. Como regra geral, a distância entre o fundo marinho e o transdutor correspondente a 10% da varredura.

Se o fundo do mar fosse inteiramente plano (em todas as escalas) a quantidade de energia refletida obedeceria unicamente a Lei de *Snell* (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), e seria bem pequena para ângulos de incidência muito grandes. Mas o fundo do mar é irregular em micro-escala. Esta micro-topografia é responsável pela dispersão de parte da energia acústica e localmente pelo aumento da energia refletida: por exemplo, as cristas de ondas de areia de pequena escala causam um incremento da energia refletida em um flanco e grande dispersão em outro flanco.

De maneira geral, quanto mais grosseiro for o sedimento maior será a quantidade de energia refletida. Assim sendo uma areia grossa refletirá mais energia do que um sedimento lamoso. Isso acontece porque a irregularidade e a área de incidência causada por grãos maiores permite que a energia incidente em determinados pontos seja preferencialmente refletida. No entanto, o registro final é o resultado relativo das energias refletidas. Uma região com areia muito grossa e areia fina apresentará um padrão de reflexão muito semelhante a uma área coberta por areia fina e lama.

A figura 2 mostra um exemplo típico de registro de sonar de varredura lateral. Neste registro é possível observar o contraste entre feições associadas a bancos de corais e o fundo marinho.

## SÍSMICA

O método sísmico utiliza o fato de que ondas elásticas (também chamadas de ondas sísmicas) viajam com diferentes velocidades em diferentes tipos de rochas. Através da geração de ondas sísmicas, e observando-se o tempo de chegada destas ondas em diferentes pontos, é possível determinar a distribuição

de velocidade e localizar interfaces onde as ondas são refletidas e refratadas. O sinal é refletido sempre que o sinal sísmico encontra um material com impedância acústica diferente daquele onde está se propagando. A amplitude do sinal refletido é função de uma complexa interação entre diversos fatores. No entanto, uma simplificação desta relação é definida para ângulos de incidência normal à superfície refletora. Neste caso o coeficiente de reflexão ( $R$ ), definido como a razão entre a amplitude do sinal refletido e a amplitude da onda incidente é dada pela equação (Sharma, 1997)

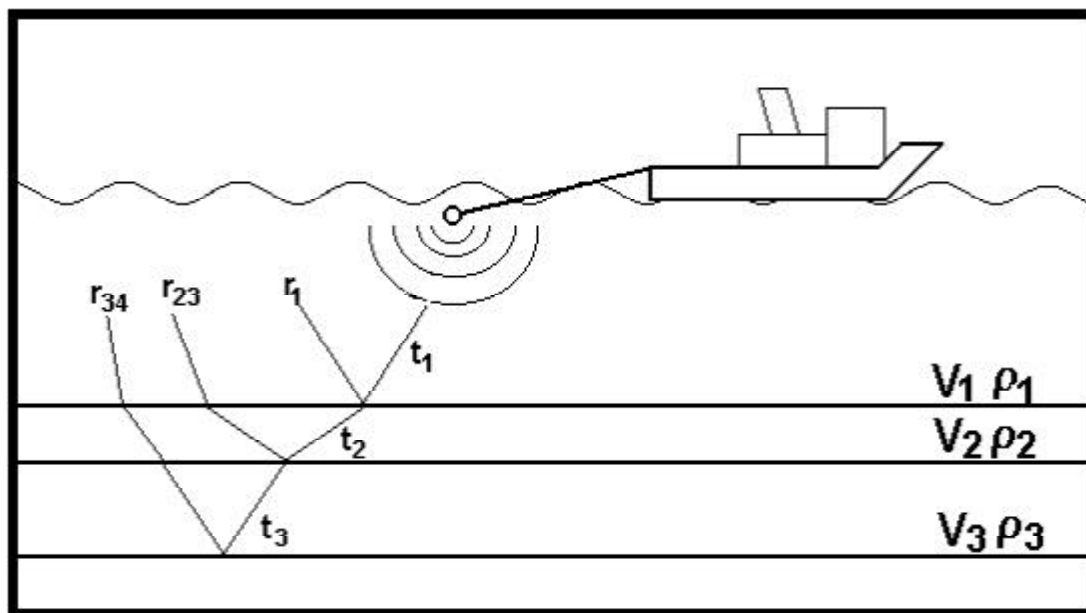
$$R_c = \frac{A_r}{A_i} = \frac{(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1)}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)}$$

Portanto o coeficiente de reflexão depende do contraste de impedância acústica (produto da velocidade pela densidade) entre dois meios físicos. Estas interfaces aparecem nos registros sísmicos como horizontes refletores ou simplesmente refletos sísmicos. De uma maneira geral cada refletor representa uma camada geológica (Fig. 3).

Existem vários tipos de fontes sísmicas utilizadas na aquisição sísmica marinha, cada uma emitindo um sinal dentro de um determinado espectro de frequência e com uma assinatura característica conforme o tipo

de aplicação desejada. Por isso cada tipo de fonte é utilizado para uma finalidade. De uma maneira geral quanto mais alto for o espectro de frequência de uma fonte sísmica maior será a sua atenuação e, por conseguinte menor sua capacidade de penetração abaixo do fundo marinho.

Os canhões de ar de grande volume emitem um sinal de baixa frequência, em torno de 60 Hz, e são usados para investigação geológica até profundidades da ordem de 4 a 5 quilômetros abaixo do fundo marinho. É utilizado principalmente pela indústria do petróleo em arranjos de vários canhões que são disparados de forma a melhorar a forma do pulso acústico transmitido. A medida que a capacidade dos canhões de ar vai diminuindo mais alta será a banda do seu espectro de frequência. Canhões de ar com 10 polegadas cúbicas produzem um sinal na faixa de 300 – 400 Hz, possibilitando uma penetração de ordem de 700 metros abaixo do fundo marinho. Os *boomers* e *sparkers* trabalham com frequências da ordem de 500 a 1500 Hz e chegam a penetrar até 400 metros abaixo do fundo marinho. O sistema *sparker* também utiliza uma bolha de ar como fonte do sinal acústico. O *sparker* é constituído por uma série de centelhadores que ao receberem uma corrente elétrica de alta voltagem geram uma descarga elétrica dentro da água do mar. Esta descarga elétrica ioniza as moléculas de água criando uma bolha que ao



**Figura 3** - Transmissão e reflexão do sinal sísmico de acordo com a variação da impedância acústica das camadas sedimentares abaixo do fundo.

colapsar devido a pressão hidrostática exercida pela água ao redor gera um sinal acústico característico. O sistema *boomer* também é um sistema elétrico como o *sparker*, mas utiliza um outro sistema de geração de sinal. O *boomer* consiste em um sistema de bobinas que ao receberem uma corrente elétrica de alta voltagem geram um campo magnético que irá impulsionar uma placa coberta por uma membrana de borracha. O deslocamento brusco desta membrana, semelhante à batida de um tambor, gera o sinal acústico mais bem definido do que o sinal gerado pelo *sparker*.

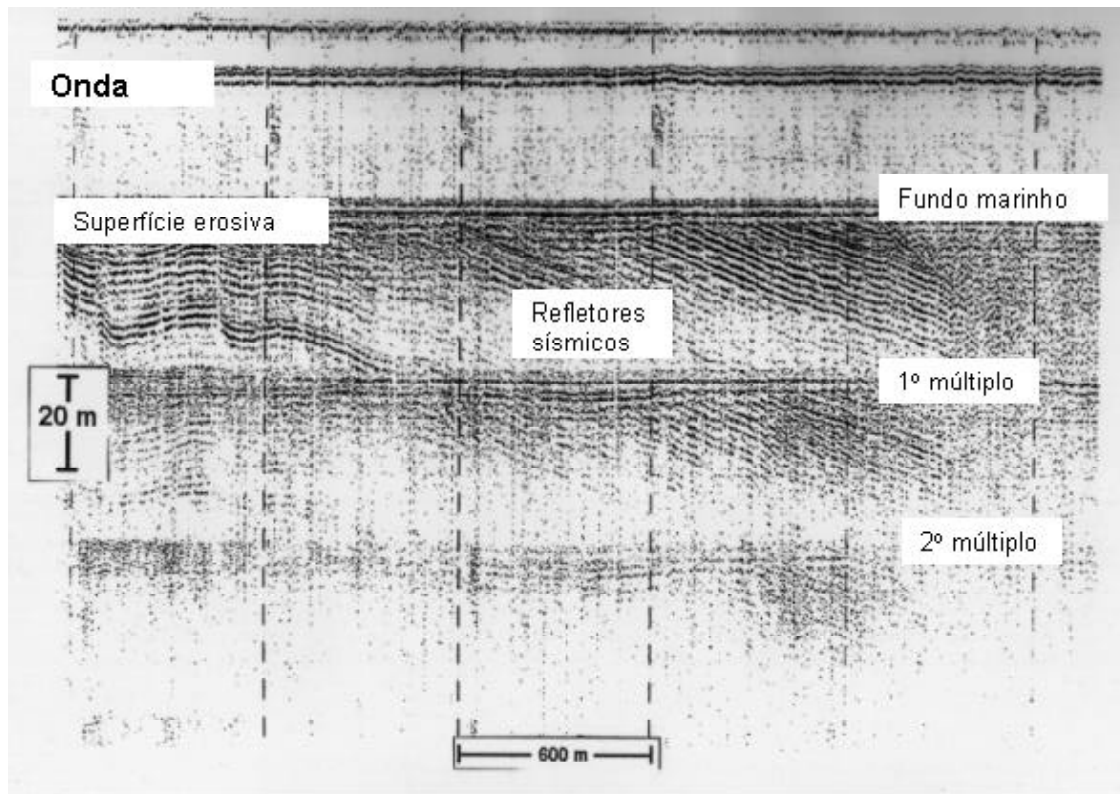
As fontes com frequências mais altas produzem um registro com maior resolução: em outras palavras, permitem uma maior definição das camadas geológicas logo abaixo do fundo marinho. Para esta finalidade foram desenvolvidos alguns tipos de fontes especiais que emitem um sinal na faixa de 3 a 7 kHz. Estas fontes, denominadas fontes ressonantes, utilizam as propriedades piezo-elétricos de alguns cristais para geração do sinal acústico. Diferentemente dos sistemas que utilizam *boomers* e *sparkers* como

fontes sísmicas, que necessitam de um receptor (hidrofonos), as fontes ressonantes são ao mesmo tempo emissores e receptores do sinal sísmico. As principais características destas fontes são a melhor repetibilidade do sinal emitido e a baixa potência necessária para geração dos sinais. São equipamentos mais simples e compactos permitindo a operação em embarcações de pequeno porte. A capacidade de penetração destas fontes pode chegar a 50 metros abaixo do fundo dependendo do tipo de sedimento. A tabela 2 mostra as características de algumas fontes sísmicas.

As figuras 4 e 5 mostram exemplos de registros de sísmica de alta resolução. O primeiro mostra um registro de *boomer* enquanto o segundo um registro de perfilador de sub-fundo (*sub-bottom-profiler*) que opera na frequência de 3,5 kHz. Os registros mostram a diferença na resolução vertical em subsuperfície em função da frequência de operação. A figura 4 mostra uma superfície erosiva bem nítida próximo ao fundo marinho. A figura 5 mostra a ocorrência de falhas e a presença de gás nos sedimentos.

<b>Tipo da Fonte</b>	<b>Profundidade de reboque</b>	<b>Frequência de Pico</b>	<b>Diretividade</b>
<i>Bommer</i> 105 J 280 J 350 J	5 m 5 m 5 m	10 kHz 6.5 kHz 5.7	Forte
<i>Sparker</i> 100 J 200 J 300 J	15 m 15 m 15 m	0.9 kHz 0.8 kHz 1.6 kHz	Média / Forte
<i>Airgun</i> 10 in <sup>3</sup>	25 m	0.5 kHz	Fraca
<i>Transdutores</i> 14 kHz 7 kHz 3,5 kHz	15 m 15 m 15 m	13.9 kHz 5.7 kHz 4.0 kHz	-
<i>Chirp sonar</i> 5 ms 10 ms 20 ms	15 m 15 m 15 m	6.5 kHz 6.5 kHz 6.5 kHz	Fraca

**Tabela 2.** - Características de algumas fontes sísmicas.



**Figura 4** - Registro de sísmica de alta resolução (*boomer*). O registro mostra uma superfície erosional próxima ao fundo.

## SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS

Em um ecobatímetro, a forma do sinal do eco é uma medida da energia acústica que retorna ao transdutor. Essa energia é influenciada pelas características físicas do fundo do mar tais como tamanho do grão e grau de compactação. O microrelevo do fundo do mar também é uma característica importante. Estruturas como ondas de areia irão influenciar as características do sinal de retorno. O sinal proveniente de um fundo mais heterogêneo e rugoso irá mostrar uma dispersão muito maior do que o sinal de um fundo liso e homogêneo (Fig. 6).

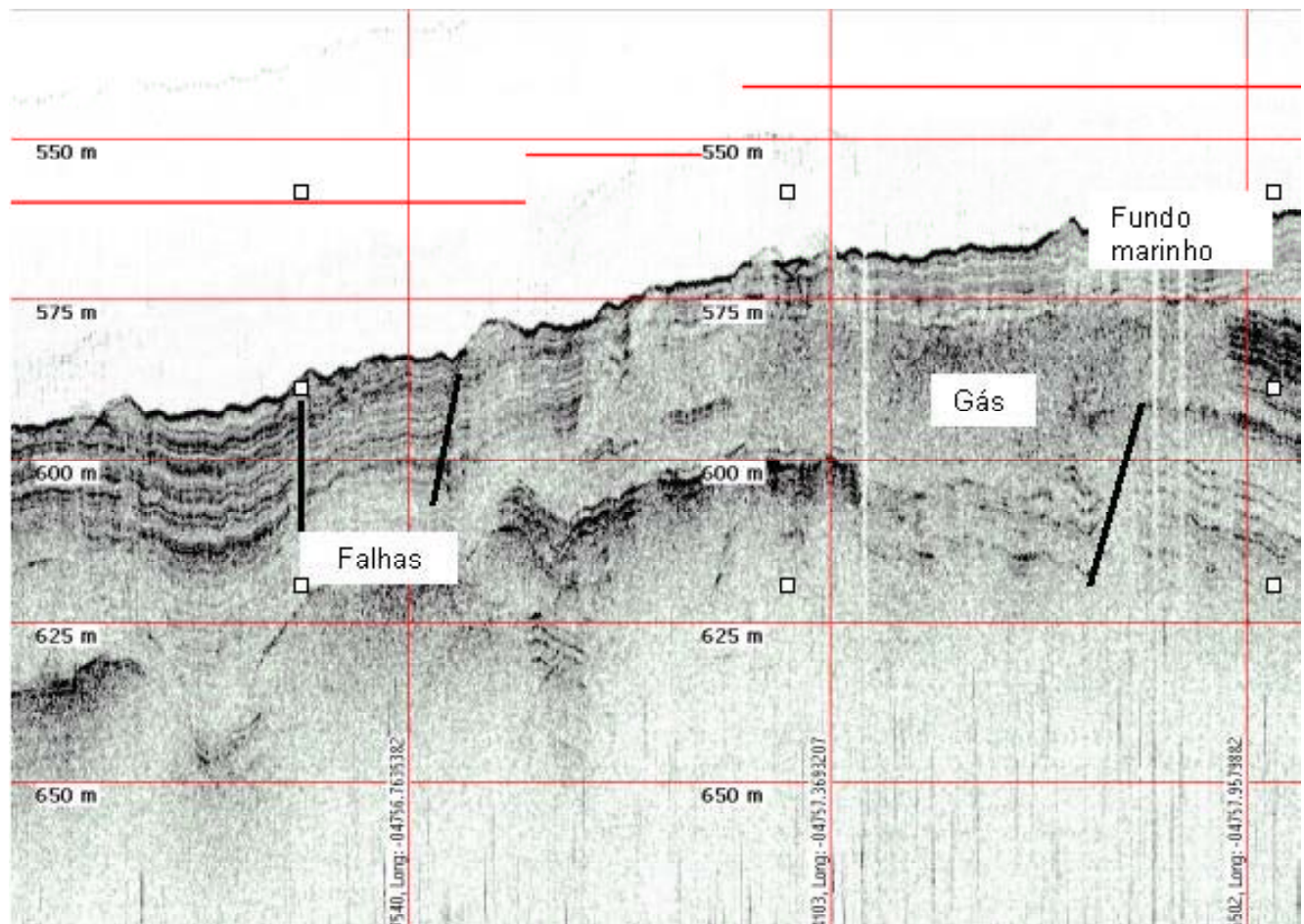
Os sistemas de classificação acústica de sedimentos utilizam pulsos gerados por ecobatímetros que viajam pela coluna d'água, são refletidos pelo fundo submarino e ao retornarem ao transdutor, são convertidos em impulsos elétricos e gravados como marcas de cores diferentes de acordo com a intensidade do eco. Técnicas de processamento de sinal são aplicadas ao sinal digitalizado separando-o

em seus componentes fundamentais (energia, frequência, etc.).

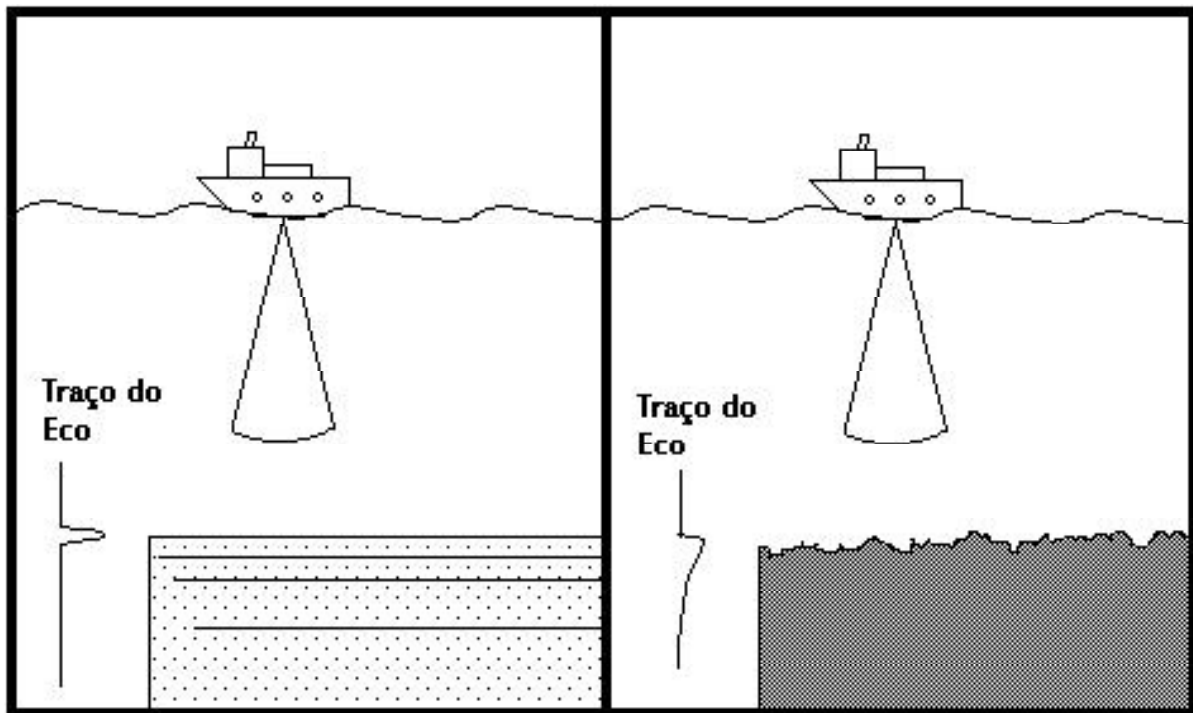
A classificação dos sedimentos se baseia no fato de que estas características serão diferentes dependendo da litologia do fundo submarino. Ecos similares são agrupados em diferentes classes que são calibradas de acordo com as características físicas da cobertura sedimentar marinha através de processos de calibragem. Cada sistema utiliza técnicas próprias de calibragem.

Dois itens são críticos para a acuracidade destes sistemas. Primeiramente, a base da classificação é a diferença relativa entre os ecos, fazendo com que o tipo de equipamento utilizado não seja crucial para o levantamento. No entanto, para que alterações nos parâmetros de aquisição não influenciem os resultados finais deve-se usar o mesmo equipamento em todo levantamento. Segundo, a classificação dos sedimentos é tão boa quanto for a descrição dos parâmetros físicos de cada tipo de sedimento associado a uma classe de ecos. Como em todos os outros sistemas, a frequência, a duração do pulso emitido, a potência de transmissão, velocidade do





**Figura 5.** - Registro de 3,5 kHz obtido no talude continental. O registro mostra a presença de falhas e gás nos sedimentos superficiais (Cortesia PEG- *Petroleum and Environmental Geo-services*).



**Figura 6.** - Variação nas características do sinal de retorno em função da micro-topografia do fundo marinho.

barco e a taxa de disparo são fatores importantes na avaliação dos resultados finais.

Esta técnica vem sendo amplamente utilizada no reconhecimento remoto do fundo do mar com numerosas aplicações em ciências geológicas, biológicas, engenharia submarina, dragagem e com fins militares. A vantagem deste sistema sobre os sistemas de sonar de varredura lateral convencionais é a facilidade de instalação e operação. No entanto, a informação fornecida por estes sistemas não permite uma avaliação lateral do fundo do mar.

### Metodologia de aplicação

Como a maioria das concentrações minerais estão associadas à topografia do fundo marinho, cuidadosos levantamentos são necessários a fim de corretamente

se mapear estas ocorrências assim como medir seu conteúdo mineral.

Variações na velocidade e direção das correntes litorâneas, na distribuição da energia das ondas e nos movimentos associados a marés contribuem para variações locais e regionais na distribuição da ocorrência de *placers*. De uma maneira geral ocorrências minerais na margem continental resultam da interação entre os processos erosivos ocorridos no continente, os mecanismos de transporte deste material erodido do continente para o oceano e os processos de deposição *offshore*.

Quando o material erodido no continente, composto por minerais de granulometria, densidades e resistência ao intemperismo diferentes, chega ao oceano, ele é retrabalhado pela ação das correntes marinhas. Esse processo faz com que os minerais mais

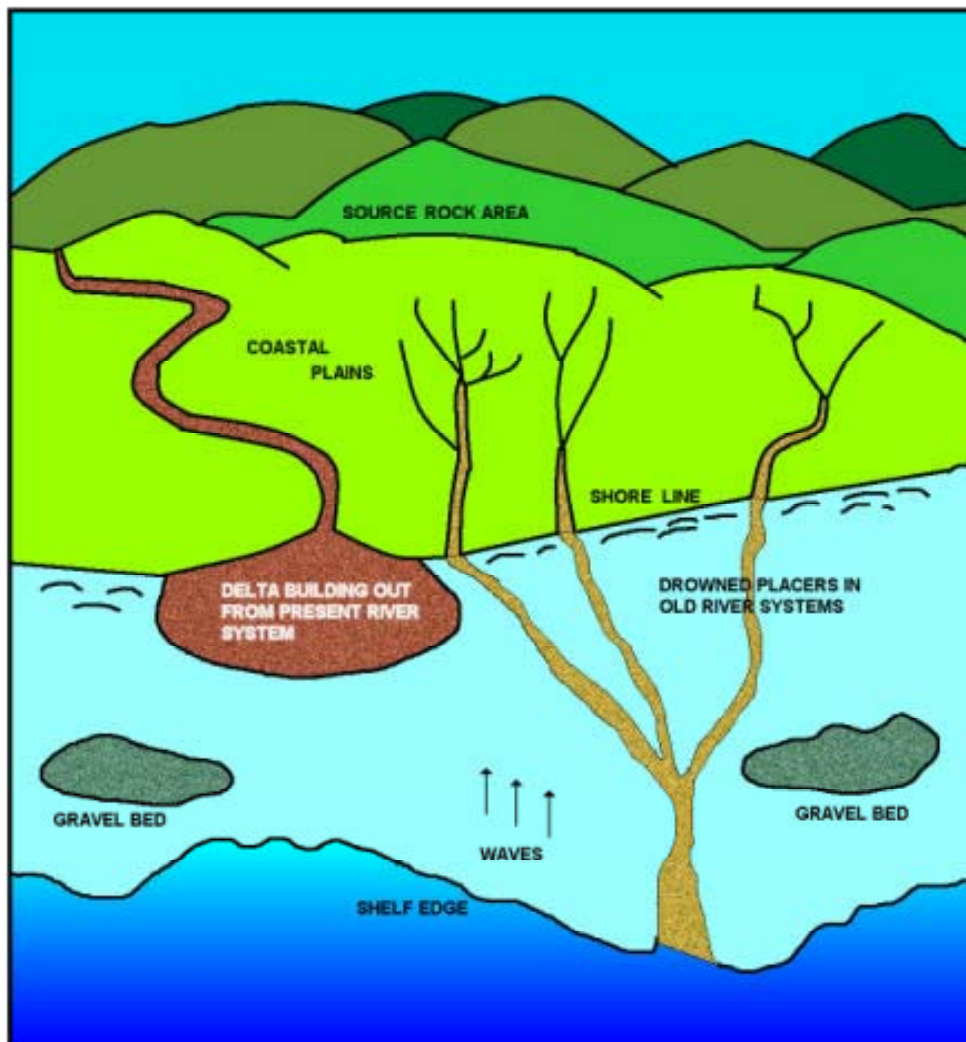


Figura 7. - Representação esquemática da localização de *placers*. (modificado de Earney, F.C.F).

densos e mais resistentes ao intemperismo, se concentram formando *placers*. Os locais mais freqüentes para que esta concentração ocorra são praias, deltas e em canais associados a rios, inclusive paleo-canais ( Fig. 7 ). No entanto, uma freqüente falta de uniformidade entre os depósitos de *placers* requer uma estratégia de amostragem apropriada.

Um projeto de pesquisa que visa determinar uma concentração econômica de um bem mineral de interesse possui duas fases básicas: em uma primeira fase, é necessário se fazer um reconhecimento regional a fim de se identificar estruturas e feições sedimentares superficiais e sub-superficiais, que possam dar indícios da ocorrência de concentrações minerais. Em seguida, identificado uma área de interesse, é necessário um levantamento mais detalhado a fim de se cubar a jazida.

Portanto, partindo-se de uma área de interesse onde dados anteriores sugerissem a ocorrência de concentrações minerais, seriam realizados perfis com ecobatímetro, sonar de varredura e sísmica de alta resolução. A principal finalidade seria localizar feições associadas a antigas linhas de costa como degraus erosivos, *beach-rocks*, mapear a variação na distribuição superficial dos sedimentos, e localizar feições sub-superficiais que possam estar associadas a áreas de deposição pretéritas. Outros perfis paralelos à linha de costa seriam realizados com sísmica de alta resolução a fim de se localizar e mapear paleo-canais, áreas de deposição quando o mar estava a níveis inferiores aos atuais. A tabela 3 mostra o resumo da aplicação de cada equipamento.

A malha amostral a ser utilizada em cada etapa do levantamento está associada às dimensões de cada ocorrência de interesse. Depósitos de agregados de construção ou areia industrial tem dimensões típicas de 5 km<sup>2</sup> ao passo que *placers* de minerais pesados apresentam dimensões mais reduzidas. No primeiro caso, a principal ferramenta a ser utilizada é o sonar de varredura lateral e a malha amostral para o levantamento geofísico deve ser da ordem de 100 x 100 metros. A varredura mínima a ser utilizada no levantamento sonográfico deve ser de 75 metros para cada canal. Esta configuração de levantamento (linhas espaçadas de 100 metros e varredura de 75 m) permite um recobrimento de 100 % do fundo marinho com uma superposição de 50% (Fig. 8). A

superposição é necessária para assegurar que não haja falhas na cobertura em função das manobras efetuadas pela embarcação. Além disso, os dados contidos na borda externa do registro, onde a resolução é menor, podem ser corroborados por mais de uma passagem do equipamento.

No caso de estruturas geológicas de menor porte a malha amostral do levantamento geofísico deve ser reduzida de modo que a estrutura possa ser mapeada com precisão. Por exemplo, para se mapear *placers* de ouro e diamante, que com freqüência estão associados a paleo-canais, o espaçamento entre as linhas pode chegar em alguns casos a 10 metros. Paleo-canais são estruturas que se encontram abaixo do fundo marinho e por isso a principal ferramenta para sua localização é a sísmica de alta resolução. Neste caso a freqüência a ser utilizada deve ser compatível com o tipo de sedimento do fundo, a penetração do sinal e a resolução vertical desejada. A resolução vertical é a habilidade de diferenciar dois refletores sísmicos verticalmente próximos e é um aspecto crucial na avaliação de uma jazida submarina tanto na marcação dos seus limites como na sua cubagem. Um erro de 10 cm na definição vertical de uma camada implica em um erro de 1 m<sup>3</sup> para cada 10 m<sup>2</sup> de área levantada. Para uma área explorada de 0,5 km<sup>2</sup>, um erro de 10 cm na resolução vertical implicaria em um erro de 50.000 m<sup>3</sup> no volume de sedimento de uma jazida. Assumindo um teor médio de 2g de um mineral (e.g. ouro) por m<sup>3</sup> de sedimento teríamos um erro de avaliação na cubagem da jazida da ordem de 100 kg do mineral. Erros deste tipo podem ser fatais para o sucesso do empreendimento. Como trabalhar este problema?

O ponto de partida é a escolha do tipo de equipamento a ser utilizado no levantamento. A resolução vertical é função basicamente da freqüência do sinal sísmico. Quanto menor a freqüência maior o comprimento de onda do sinal e, portanto menor a capacidade de diferenciar duas camadas muito próximas. A escolha de um equipamento do tipo SBP (*sub-bottom profiler*) implica na utilização de um sinal sísmico com freqüência da ordem de 2 a 5 kHz. Este tipo sinal, permite uma boa resolução das camadas mas o registro final terá pouca penetração impossibilitando a identificação de estruturas que estejam a mais de 10 metros abaixo do fundo

(dependendo do tipo de cobertura sedimentar). Por outro lado, fontes como *boomer* e *sparker*, que operam em um range de frequências entre 500 e 1500 Hz, terá maior capacidade de penetração no fundo marinho, mas será incapaz de diferenciar refletores (camadas) que estejam verticalmente a menos de 1 metro uma da outra. A definição do tipo de equipamento a ser utilizado deve ser feita antes do início do levantamento de acordo com os objetivos da pesquisa.

Atualmente, com a aquisição de dados digitais (formato *seg-y*), é possível se melhorar a resolução vertical através de técnicas de processamento relativamente simples mesmo em dados mono-canais. Cobo et al. (2002), mostram como a resolução vertical de dados sísmicos convencionais de alta resolução pode ser melhorada utilizando-se a técnica de equalização paramétrica.

No entanto todo este cuidado não tem nenhuma importância se a precisão do posicionamento, da embarcação e dos equipamentos rebocados, não for compatível com a finalidade do levantamento.

Os dados obtidos através do levantamento geofísico servirão de base na escolha de pontos de coleta de testemunhos e/ou amostras superficiais que forneceriam informações mais detalhadas sobre a geologia da área de interesse. Os testemunhos e/ou amostras são então correlacionadas com os dados geofísicos permitindo uma correlação lateral entre as amostras resultando em um mapa de detalhe da geologia da área mapeada.

No caso da identificação de uma área de potencial econômico, um segundo levantamento, em uma escala mais detalhada e com perfis mais próximos, pode ser planejado. Malhas de levantamento mais densas permitem a determinação tridimensional de uma

Equipamento	Finalidade	Aplicação
Sonar de varredura	Mapear feições superficiais associadas distribuição superficial dos sedimentos; Localizar estruturas associadas a antigas linhas de costa; Identificar estruturas superficiais nos sedimentos indicativas da ação de correntes marinhas sobre os sedimentos de fundo.	Mapeamento de areias e cascalhos; Identificação de cabeças de corais; Localização de "beach-rocks" Identificação de placers
Sísmica de alta resolução	Mapear estruturas sub-superficiais associadas a antigos canais fluviais na plataforma continental; Identificar através de eco-carater diferentes tipos de sedimentos; Fornecer informações sobre a distribuição estrutural das camadas geológicas abaixo do fundo do mar; Mapear em caráter tridimensional estruturas e camadas geológicas de interesse.	Localização de corais em sub-superfície; Cubagem de camadas geológicas; Localização de bolsões de gás em sub-superfície;
Classificação de sedimentos	Mapear variações na cobertura sedimentar do fundo do mar; Identificar variações na micro-topografia do fundo marinho; Verificar as características físicas dos sedimentos do fundo marinho	Mapear diferentes tipos de sedimento no fundo do mar; Identificação de placers

**Tabela 3.** - Equipamento e suas aplicações.

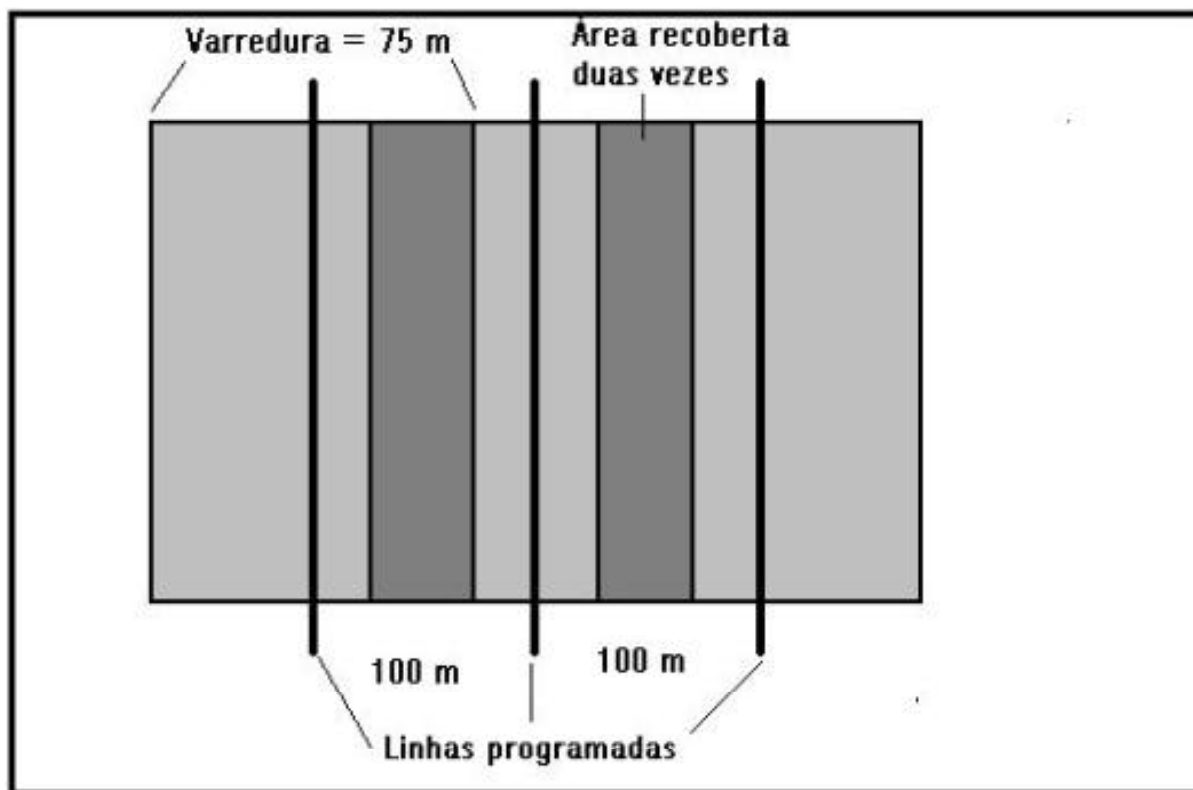


Figura 8. - Esquema da cobertura para sonar de varredura lateral.

camada geológica ou de uma estrutura de interesse. Para isso podem ser usados programas de interpretação sísmica comerciais.

## ESTIMATIVAS DE CUSTO NA EXPLORAÇÃO

Uma das fases em um projeto de mineração submarina consiste em um levantamento sísmico, sonográfico e batimétrico que servirá de base para escolha dos pontos de amostragem. O custo final de um levantamento geofísico marinho está basicamente ligado a cinco fatores principais: 1) distância da costa; 2) profundidade da área; 3) embarcação a ser utilizada no trabalho; 4) equipamentos; e 5) malha amostral.

- 1) **Distância da costa:** este fator, assim como a distância entre a área de trabalho e um porto de apoio vai ser importante na definição da logística do projeto. Para áreas muito longe da costa a utilização de barcos pequenos (pesqueiros) pode acarretar em uma perda de tempo diária de deslocamento entre a área

e o porto de apoio. De uma maneira geral o tamanho destas embarcações não permite a instalação de equipamentos e acomodação de pessoal suficiente para uma operação de 24 horas. Isso faz com que as horas efetivamente trabalhadas por dia sejam da ordem de cinco a seis horas dependendo da distância do porto de apoio. Outro fator a ser considerado quando se trabalha com pequenas embarcações é que as operações estão sujeitas a interrupção por condições de tempo ruim e podem atrasar o levantamento em dias.

- 2) **Profundidade da área:** de uma maneira geral a profundidade da área está ligada à distância da costa. Com exceção de áreas onde a plataforma continental é estreita, profundidades da ordem de 50 metros já estão a dezenas de milhas da costa. A profundidade da área também influencia na escolha de alguns tipos de equipamentos. Por exemplo, para profundidades superiores a 70-80

metros ecobatímetros de mais baixa frequência (24 kHz) são necessários. Este tipo de equipamento possui transdutores maiores e de instalação mais complexa. Outro exemplo é a necessidade de cabos de reboque para o sensor do sonar de varredura. O equipamento geralmente é vendido com cabo leve de reboque com 100 metros de comprimento que permite a operação até profundidades de 30-40 metros. Para operação em áreas mais profundas cabos maiores e mais resistentes são necessários.

- 3) **Custo da embarcação:** o custo da embarcação está ligado ao seu tamanho e capacidade de operação. Maiores embarcações exigem uma tripulação maior e mais preparada do que pequenos barcos onde geralmente o marinheiro não possui nenhum treinamento especial a não ser a prática do dia-a-dia. Embarcações maiores permitem a mobilização de vários equipamentos ao mesmo tempo e de uma equipe técnica maior. Isto faz com que o levantamento possa ser realizado durante 24 horas reduzindo bastante o tempo total de levantamento. Para se ter uma idéia uma embarcação equipada para realizar levantamentos geofísicos, totalmente equipada e tripulada, com laboratórios a bordo e capacidade para uma equipe técnica de até 10 pessoas pode custar até US\$ 18.000 / dia. Pesqueiros de pequeno porte que tem custo variável, dependendo da época do ano, tamanho e disponibilidade, podem chegar a US\$ 500 / dia.
- 4) **Equipamentos:** este item implica na decisão final de se fazer um levantamento com equipamentos mais modernos, que adquirem o dado de forma digital ou com equipamentos mais antigos, analógicos. Os equipamentos mais modernos hoje custam na faixa de US\$ 40.000 a US\$ 120.000. Alguns equipamentos especiais para operação em águas profundas podem chegar a casa dos US\$ 250.000. No

entanto estes equipamentos além de fornecerem um dado de melhor qualidade são menores e de mais fácil operação. No entanto nem todas as empresas estão dispostas ou tem capacidade de investir em equipamentos de última geração. Equipamentos mais antigos não irão fornecer dados com a mesma qualidade, mas podem ser suficientes para as necessidades de um determinado projeto.

- 5) **Malha amostral:** o tamanho da malha amostral do projeto vai determinar o tempo de disponibilização dos equipamentos e de pessoal técnico necessário para realização do levantamento. Quanto mais detalhada for esta malha mais tempo será necessário para completar o levantamento. Para levantamentos muito grandes, uma embarcação de grande porte pode representar um ganho importante mesmo em águas rasas. Cálculos básicos para duração de um levantamento consideram uma velocidade média de operação da ordem de 3 a 4 nós (1 nó = 1 mn/hora), mais tempo de manobra e dias de *stand-by* por condições de mar que podem variar de acordo com a área em se está trabalhando.

## CONCLUSÃO

A utilização de equipamentos geofísicos na avaliação do potencial mineral de uma determinada área é uma atividade comum. Em um projeto de mineração submarina, não é diferente. Métodos específicos para serem utilizados no mar como sísmica de alta resolução e sonar de varredura lateral, ajudam no mapeamento de feições e estruturas geológicas que favorecem a concentração de algum bem mineral de interesse. Através de levantamentos sísmicos, sonográficos e batimétricos é possível identificar a distribuição superficial de sedimentos, a morfologia do fundo assim como identificar estruturas sub-superficiais ao fundo marinho. Estas informações podem ser úteis na determinação dos pontos de amostragem e na escolha do tipo de amostrador. Em comparação com os custos associados a amostragem,

triagem de material e análise das amostras, o custo de um levantamento geofísico, associado ao ganho de tempo no projeto, representam uma grande economia para os custos finais do projeto como um todo.

## REFERÊNCIAS

- AYRES, A. & AGUIAR, A. C. K. V., 1993.** Interpretação de reflexões de Side Scan Sonar: Uma proposta de nomenclatura e padronização de métodos. 3<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil
- BLONDEL, P. & MURTON, B.J., 1997.** Handbook of Seafloor Sonar Imagery. John Wiley & Sons Ltd. 314 pp.
- COBO, P., RANZ, C. & CERVERA, M., 2002.** Increasing the vertical resolution of conventional sub-bottom profilers by parametric equalization. Geophysical Prospecting, Vol. 50. P: 139-149
- EARNEY, F.C.F., 1994.** Marine Mineral Resources. Routledge, 387 pp.
- SCHÖN, J. H., 1996.** Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics. Handbook of Geophysical Exploration. Section I, Seismic Exploration, V.18. Pergamon Press. 583 pp.
- SHARMA, P.V., 1997.** Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press. 475 pp.
- TAO, G., KING, .S., & NABI-BIDHEDI, M., 1995.** Ultrasonic Wave propagation in dry and Brine-Saturated Sandstones as Function of Effective Stress: Laboratory measurements and Modeling. Geophysical Prospecting, Vol. 43. P: 299-327
- WOODS R.D., 1991.** Soil Properties for Shear wave Propagation. In Hoven, J.M. et al. (Eds), Shear Wave in Marine Sediments. P: 29-39

## NOTE ABOUT THE AUTHOR

### ARTHUR AYRESNETO

O autor é formado em geologia pela UFRJ, com mestrado em geologia marinha pela Universidade Federal Fluminense e doutorado em geofísica marinha pela Universidade de *Kiel* na Alemanha. O autor vem

atuando desde 1987 em projetos de geologia e geofísica marinha aplicada à engenharia e meio ambiente. Atualmente está trabalhando como geofísico independente para o setor de engenharia da Petrobrás.

## PUBLICAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES

Para a publicação de Teses e Dissertações na Revista Brasileira de Geofísica, favor enviar uma cópia em papel e em disquete, com os títulos e resumos em português ou espanhol, e em inglês, ambos contendo um máximo de 500 palavras.

Incluir nome do autor(a), orientador(a), departamento e universidade, título obtido e data da defesa. Não incluir referências ou ilustrações.



**UFF**

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA  
MESTRADO E DOUTORADO**



- Oceanografia Geológica
- Geofísica Aplicada
- Geologia do Petróleo
- Meio Ambiente

Telefone/Fax (55)(21) 2719-4241    [lagemar@igeo.uff.br](mailto:lagemar@igeo.uff.br)    [www.igeo.uff.br/lagemar/](http://www.igeo.uff.br/lagemar/)