



Universidade Federal Fluminense
Curso de Graduação em Geofísica

MARINA DE ANDRADE IGUATEMY

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE FONTES SÍSMICAS DE ALTA
RESOLUÇÃO QUE UTILIZAM TECNOLOGIA CHIRP E SISTEMAS
PARAMÉTRICOS**

Niterói
2010

MARINA DE ANDRADE IGUATEMY

Estudo comparativo entre fontes sísmicas de alta resolução que utilizam tecnologia "Chirp" e sistemas paramétricos

Projeto Final II apresentado ao curso de Graduação em Geofísica, na Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Arthur Ayres Neto.

Niterói, 22 de fevereiro de 2010.

124

Iguatemy, Marina de Andrade

Estudo comparativo entre fontes sísmicas de alta resolução que utilizam tecnologia "Chirp" e sistemas paramétricos / Marina de Andrade Iguatemy. – Niterói : [s.n.], 2010.

53 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2010.

1.Método de reflexão sísmica. 2.Sísmica de alta resolução. 3.Sistema Chirp. 4.Sistema paramétrico. I.Título.

CDD 622.1592

TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica, em 22 de fevereiro de 2010, examinada por:

Alberto Garcia de Figueiredo Junior

Cláudio Gino Gallea

Niterói
UFF

Agradecimentos

A minha mãe e irmã, pela dedicação e apoio mesmo a distância.

À empresa Petróleo Brasileiro S. A., por conceder o espaço, máquina e disponibilização de diversos artigos científicos.

Aos meus colegas de trabalho, Cláudio Duarte, Glória Cezar, Paola Pellizzari e Sergio Ventura, que me apoiaram e acreditaram que esse trabalho seria possível. Em especial ao Claudio Gallea, que esteve presente em todos os momentos na execução dessa monografia.

Agradeço aos meus amigos Aline de Melo, Felipe Marques, Lucio Flavio, Rodrigo Tasca, Saulo Meirelles e Silas Oliveira, pelo companheirismo, importantes sugestões e valiosos momentos de descontração.

Ao corpo docente do Lagamar, pela transmissão do conhecimento, durante a graduação, em especial ao meu orientador Arthur Ayres, pela troca permanente de idéias; por enriquecedoras discussões e principalmente por ter assumido comigo este desafio.

A funcionária Ana Paula, que me ajudou em diversas situações e dificuldades burocráticas durante a graduação do curso.

A coordenadora Eliane Costa, que me orientou em diversos momentos, mesmo antes do meu ingresso no curso de Geofísica.

Ao meu querido namorado Mauro, por sua solidariedade nos momentos finais, pelo auxílio na formatação do texto e pelo carinho em todas as horas.

À todos que, de um modo ou de outro, ajudaram na realização desta monografia.

RESUMO

Este trabalho se propõe a comparar dois tipos de fontes acústicas: com tecnologia Chirp, a qual consiste em um tipo de onda controlada (FM) com capacidade de varrer uma janela de frequências e possui a característica de se conhecer os pulsos que foram emitidos através do princípio da autocorrelação; e fontes que utilizam sistemas paramétricos, onde duas altas frequências emitidas simultaneamente interagem para gerar uma nova frequência correspondente a diferença das duas anteriores. O sinal gerado pelo sistema paramétrico apresenta elevada diretividade e ausência de lóbulos laterais. Também serão apresentados os resultados de dois levantamentos realizados na região de Barra do Furado, município de Quissamã, onde pode se observar diferenças consideráveis entre esses dois tipos de fontes e suas atuações em região onde o material sedimentar predominante é arenoso e altamente reflexivo.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO	10
3 FUNDAMENTOS	12
3.1 Fontes sísmicas	12
3.1.1 <i>Fontes impulsivas</i>	14
3.1.2 <i>Fontes ressonantes</i>	15
4 METODOLOGIA.....	19
4.1 Arranjos Analisados	19
4.1.1 <i>Sistema Paramétrico</i>	19
4.1.2 <i>Sistema Chirp</i>	26
4.2 Parâmetros Analisados	31
4.2.1 <i>Diretividade</i>	31
4.2.2 <i>Resolução</i>	33
4.2.3 <i>Penetração</i>	37
5 ÁREA DE ESTUDO	39
5.1 Geologia Regional da Bacia de Campos.....	39
5.2 Cobertura sedimentar	40
6 RESULTADOS	42
6.1 Descrição e interpretação dos perfis sísmicos	43
6.1.1 <i>Perfil 1</i>	43
6.1.2 <i>Perfil 2</i>	47
7 CONCLUSÃO	50
8 REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A caracterização das sub-superfícies rasas das áreas submersas (rios, reservatórios, lagos, áreas costeiras e plataforma continental) é extremamente importante, pois contribui tecnicamente para o planejamento das atividades humanas, cada vez mais intensas e concentradas nestes complexos e sensíveis ambientes, que contém muito dos recursos naturais demandados pelo desenvolvimento econômico da sociedade moderna. Algumas destas atividades podem ser destacadas: o estabelecimento de obras civis (barragens, túneis, pontes, portos), de plataformas exploratórias, a instalação de cabos e dutos, de hidrovias, a prospecção de recursos minerais (petróleo, minerais, material de construção), a exploração de recursos pesqueiros e a caracterização de áreas favoráveis à instalação de depósitos de resíduos, entre outras. Oliveira & Brito (1998) discutem detalhadamente aspectos geológicos e geotécnicos relacionados com vários tipos de projetos desenvolvidos em ambientes submersos. A caracterização da cobertura sedimentar nestes ambientes auxilia também estudos sobre a origem dos sedimentos que a constituem (Santos & Dominguez, 2005).

Métodos sísmicos de alta resolução têm sido utilizados intensamente nestas últimas duas ou três décadas no mapeamento do Quaternário, na investigação dos processos sedimentares, na engenharia costeira, na exploração mineral e nos estudos de *habitats* subaquáticos entre outros temas.

A demanda dos métodos sísmicos de alta resolução para a investigação de áreas submersas rasas é distinta da sísmica de reflexão tradicional voltada à exploração de petróleo. Apesar de ambas as técnicas empregarem os mesmos princípios fundamentais da reflexão sísmica, são diferentes os sistemas de aquisição de dados, as fontes acústicas, os espectros de frequências emitidos, os receptores, os sistemas de processamento e até mesmo as formas de apresentação dos dados.

Ao contrário da investigação sísmica convencional, a sísmica de reflexão de alta resolução lida com meios geológicos ou interfaces geológicas que comumente apresentam baixos contrastes de impedância acústica, baixa relação sinal ruído, além da propriedade do meio geológico se constituir em um forte atenuador de sinais de alta frequência. A investigação destes meios exige a utilização de fontes acústicas que emitem sinais com espectros de frequência mais altos, o que torna a rugosidade das superfícies, ou das interfaces, propriedades físicas relevantes, pois que representam papel importante na análise do espalhamento do sinal acústico (*scattering*).

No estudo de áreas submersas, os métodos sísmicos de alta resolução se destacam quando comparados com outros métodos geofísicos. Este destaque tem como base algumas características especiais, dentre as quais podem ser ressaltadas;

- a grande precisão e resolução dos sinais sísmicos;
- o produto obtido em campo, em tempo real, é um perfil contínuo onde se identificam os refletores (contatos geológicos) em subsuperfície, à medida da evolução dos levantamentos, sem a necessidade de complexos processamentos dos dados, que comumente são feitos a *posteriori* com objetivo de obtenção de detalhes adicionais;
- os perfis obtidos em campo, em tempo real, podem ser interpretados praticamente como uma seção geológica sobrelevada, possibilitando que decisões estratégicas possam ser tomadas durante a própria aquisição de dados;
- os levantamentos podem ser conduzidos em embarcações de pequeno e médio porte que se movem a velocidades comumente superiores a 6 km/h, o que possibilita rápida e ampla cobertura da área investigada;

2. OBJETIVO

O foco principal é realizar uma análise teórica e experimental de dois tipos diferentes de fontes sísmicas (baseadas em tecnologia CHIRP e em sistemas paramétricos) e avaliar qual dessas fontes apresenta melhor eficácia quando aplicadas em diferentes abordagens, analisando vantagens, desvantagens, restrições e limitações das fontes sísmicas aplicadas a levantamento de áreas submersas, e então orientar um melhor aproveitamento e a melhor qualidade do produto final da investigação, propondo possíveis critérios de escolha de fontes sísmicas para a solução mais apropriada das questões geológicas envolvidas na área de atuação.

Também serão estudados os diferentes fenômenos físicos que envolvem ambas as fontes de interesse.

Este trabalho revisa alguns aspectos elementares de fontes sísmicas no contexto de alta resolução e resume dois tipos de equipamentos atualmente disponíveis. Também discute a eficiência dos mesmos com um intuito de evoluir na pesquisa e desenvolvimento de idéias e tendências na tecnologia de apoio na área de estudo de alta resolução na região marinha.

3. FUNDAMENTOS

Os fundamentos dos métodos sísmicos estão baseados nos princípios de propagação das ondas acústicas. Na investigação de áreas submersas, estes princípios são aplicados diretamente para a compreensão dos fenômenos referentes à propagação das ondas acústicas na água e nos estratos subjacentes (Urlick, 1983).

A sísmica de reflexão lida com o fenômeno da reflexão do som nas interfaces entre os meios com distintas propriedades físicas, ou seja, com contrastes de impedância acústica.

Impedância acústica (i) constitui-se em fundamental propriedade do meio geológico quando se trata da investigação sísmica. É matematicamente representada pelo produto da velocidade de propagação do som num meio (v_1) pela densidade (d_1), ou seja, a impedância (i) de um meio 1 é igual a: $i_1 = (v_1) \times (d_1)$. O fenômeno físico da reflexão das ondas acústicas só ocorre quando existem contrastes representativos entre os meios atravessados pelo sinal acústico emitido.

Teoricamente, corpos extremamente homogêneos não refletem as ondas acústicas, até que estas encontrem obstáculos ou interfaces acústicas (outro tipo de rocha, por exemplo).

Da mesma forma, a quantidade de energia que é refletida, quando o sinal acústico atinge uma superfície ou uma interface, é função direta do contraste de impedância existente entre os dois meios. A superfície que delinea o contato entre dois meios acusticamente distintos, e que numa seção sísmica é representada por uma linha contínua (eventualmente não), é denominada de refletor sísmico ou simplesmente refletor.

Basicamente, a utilização dos métodos sísmicos de reflexão se dá a partir da emissão de pulsos sonoros por meio de fontes acústicas rebocadas na superfície da água, ou muito próximos dela. Em alguns métodos a fonte sísmica é posicionada na coluna d'água, a certa profundidade.

As frentes de ondas emitidas pela fonte acústica se propagam através da água e dos estratos sedimentares subjacentes em velocidades que variam de acordo com as características físicas de cada um dos meios geológicos atravessados pelo sinal.

Quando da ocorrência de contrastes de velocidade de propagação e de densidade, ou seja, contrastes de impedância acústica entre dois estratos, uma parte da energia das frentes de onda é refletida na interface entre os meios e retorna à superfície e a outra, penetra nas camadas sedimentares inferiores. Os sinais recebidos pelos sensores são conduzidos ao sistema de processamento e gravação, para finalmente serem impressos na forma de uma seção, em papel eletrossensível, ou, no caso dos equipamentos mais modernos, gravados digitalmente.

O primeiro sinal que retorna aos sensores é normalmente oriundo da superfície do fundo e, portanto, sua interpretação possibilita identificar a espessura da coluna de água; os sinais que atingem o sensor subsequentemente, são aqueles que penetraram na coluna sedimentar e, portanto, possibilitam a identificação da espessura dos estratos sedimentares sub-supeficiais. Em ambos os casos, as medidas efetuadas têm como base os tempos de percurso de ida e volta dos sinais acústicos, ou seja, o tempo duplo de percurso, termo conhecido no meio geofísico como TWT (*two way time*).

A energia refletida nas interfaces entre os meios com distintas impedâncias acústicas é proporcional à amplitude do sinal emitido pela fonte e a magnitude do contraste propriamente dito entre os meios. A detecção do sinal refletido depende também da geometria do arranjo fonte-sensor.

3. 1 Fontes sísmicas:

Uma fonte sísmica ideal é aquela que produz um pulso num tempo mínimo, com amplo espectro de frequências (todas) com alta energia. Como fisicamente esta configuração

não é possível, já que a energia armazenada numa fonte acústica não pode ser transferida de maneira instantânea para o meio geológico, a maioria das fontes acústicas são basicamente de dois tipos: aquelas que tentam se aproximar do ideal, emitindo um amplo espectro de frequências num menor tempo possível (p.ex. sparkers, air-guns), e aquelas que emitem um determinado espectro de frequências ao longo de um intervalo de tempo pré-definido (p.ex. chirp, vibradores).

A figura 01 mostra um exemplo típico dos dados que serão obtidos utilizando uma fonte acústica. Cada linha vertical representa o sinal recebido para um único pulso emitido.

Faixas escuras representam seções do traço que são maiores do que zero. O eixo horizontal representa o número do traço sísmico que pode estar relacionado a uma posição usando dados de navegação. Esta seção apresenta várias reflexões fortes que ocorrem quando o pulso sísmico emitido encontra um limite entre dois meios de diferentes impedâncias acústicas. Tanto a reflexão do fundo do mar e subsuperfície, que ocorrem nas fronteiras entre as camadas de sedimentos, são aparentes. A primeira reflexão múltipla do fundo do mar também está marcada.

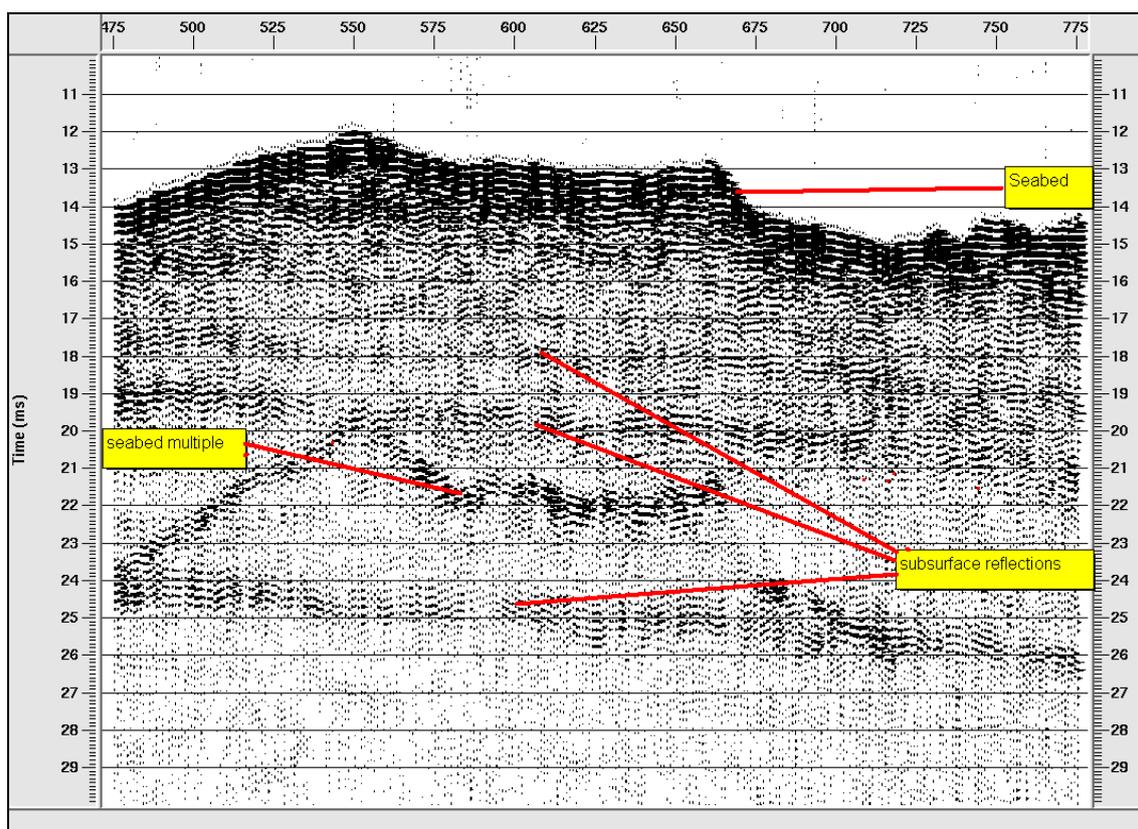


Figura 01: Secção sísmica típica (CDPs 475-775 do conjunto de dados coletados de Bouldnor Cliff, Ilha de Wight). Estão marcados o fundo marinho, camadas de sub-superfície adicionais, e múltiplas. Fonte: Robb *et al.*, (2002)

3.1.1 Fontes impulsivas

As fontes acústicas impulsivas classificadas por McGee (1995) são aquelas que liberam grande quantidade de energia num intervalo de tempo que idealmente é próximo de zero. Mosher & Simpkin (1999) desenvolveram classificação análoga para fontes desta natureza, subdividindo este tipo de fonte de aceleração de massa, implosivas e explosivas.

O princípio deste tipo de fonte está relacionado com o deslocamento da massa d'água quando a energia elétrica armazenada em um capacitor é descarregada sobre uma mola plana conectada a uma placa vibradora. Ao contrário das fontes do tipo forma de onda controlada, estas fontes podem absorver até 1000 J de energia e, portanto, tornarem viável a emissão de sinais de um amplo espectro de frequências (p.ex. 500 a 20.000 Hz) com alta potência,

possibilitando a obtenção de excelentes registros sísmicos com grande penetração no substrato.

3.1.2 Fontes ressonantes

Sob a classificação de fontes ressonantes, tanto McGee (1995) quanto Mosher & Simpkin (1999) incluem desde fontes usadas na batimetria convencional (ecobatímetros) até fontes mais modernas que possuem capacidade de penetração, ou seja, agem como perfiladores de sub-fundo propriamente ditos (*chirp* p.ex.). Este tipo de fonte produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitivo, e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas (cristais) piezelétricas. A figura 02 ilustra as formas de onda originadas deste tipo de fonte acústica.

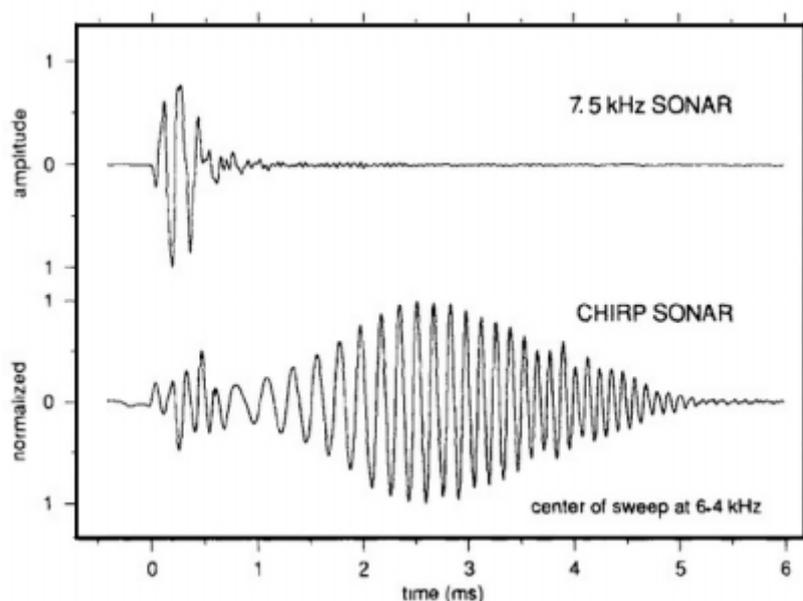


Figura 02: Exemplos de forma dos sinais emitidos por fontes acústicas ressonantes ou de forma de onda controlada. Fonte: McGee,(1995).

Este tipo de fonte acústica é a mais comumente empregado na investigação de áreas submersas. Utilizam este sistema desde ecobatímetros de alta frequência, que emitem frequências específicas em intervalos de tempo mínimos (p.ex. 50 kHz, 200 kHz), até as

modernas fontes denominadas *chirp* (fig. 04), que emitem amplos espectros de frequências num determinado intervalo de tempo (p.ex. 2 a 8 kHz em 5-6 ms).

Qualquer destes sistemas opera com base no princípio de que um campo elétrico aplicado sobre uma pastilha piezelétrica resulta na produção de um trabalho mecânico proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado (fig. 03).

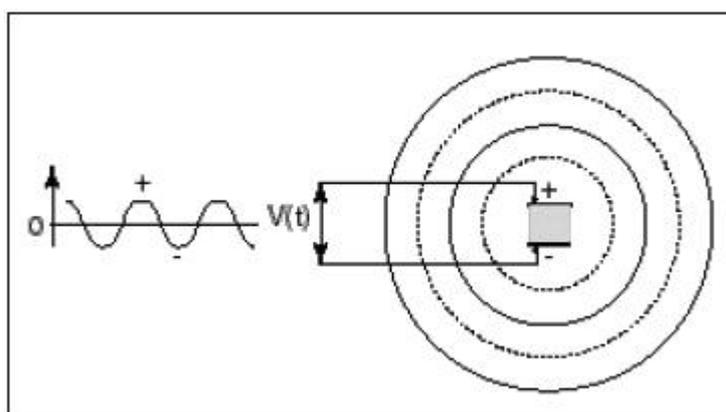


Figura 03: Ondas de pressão criada por um cristal piezelétrico de submetido a uma oscilação no campo elétrico.

Se a frequência do campo elétrico aplicado é próxima da frequência de ressonância do material do transdutor, a energia elétrica é facilmente convertida em energia mecânica e, por conseguinte, em movimento de vibração da pastilha, que é facilmente transmitido à massa de água existente ao redor da fonte.

A pressão da água sobre o transdutor gera um sinal elétrico que no receptor indica o retorno do sinal emitido. Os perfiladores do tipo 3.5 kHz são bons exemplos deste tipo de fonte.

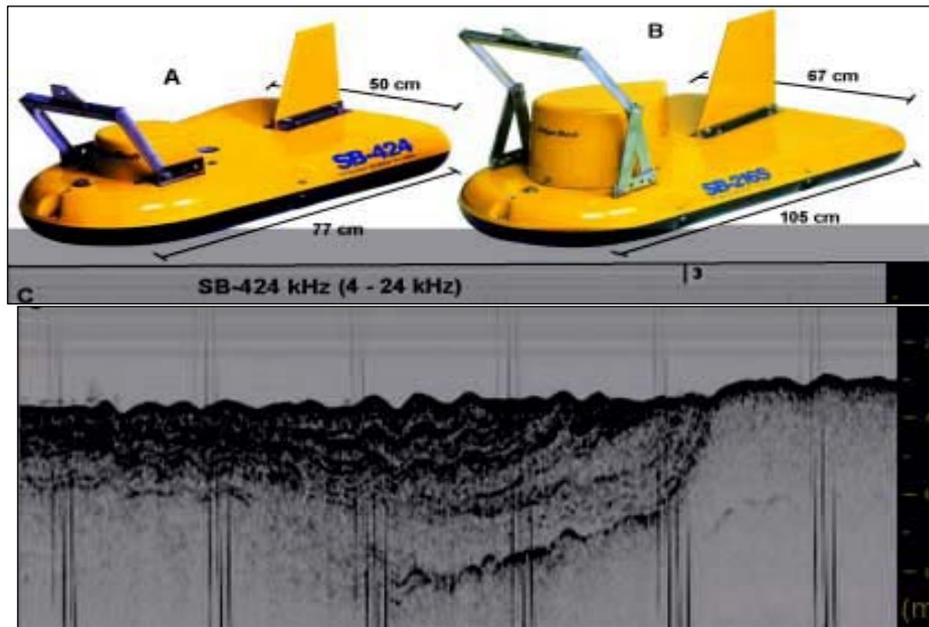


Figura 04: Dois modelos de fontes acústicas do tipo *chirp* da Edgetech: **a)** SB216S (2-16 kHz); **b)** SB- 424 (4-24 kHz); **c)** exemplo de registro sísmico obtido com o *chirp* modelo SB 424. Fonte: <<http://www.edgetech.com>>.

Ainda com relação às fontes ressonantes, é importante ressaltar que a frequência do sinal emitido determina o tamanho e o peso dos transdutores que geram os sinais. De maneira geral, transdutores que geram frequências mais baixas são maiores e mais pesados, e o feixe principal de sinais tem largura (*beam angle*) maior que aqueles que geram sinais de frequências mais altas. Importante lembrar neste contexto que a largura do feixe principal de sinais constitui-se num item essencial na caracterização de uma fonte, pois contém a grande parte da energia emitida. Além disso, quando muito grandes (120°, p.ex.), permitem a reflexão de sinais fora da área de interesse, como ecos laterais, possibilitando a geração de ruídos indesejáveis (fig. 05).

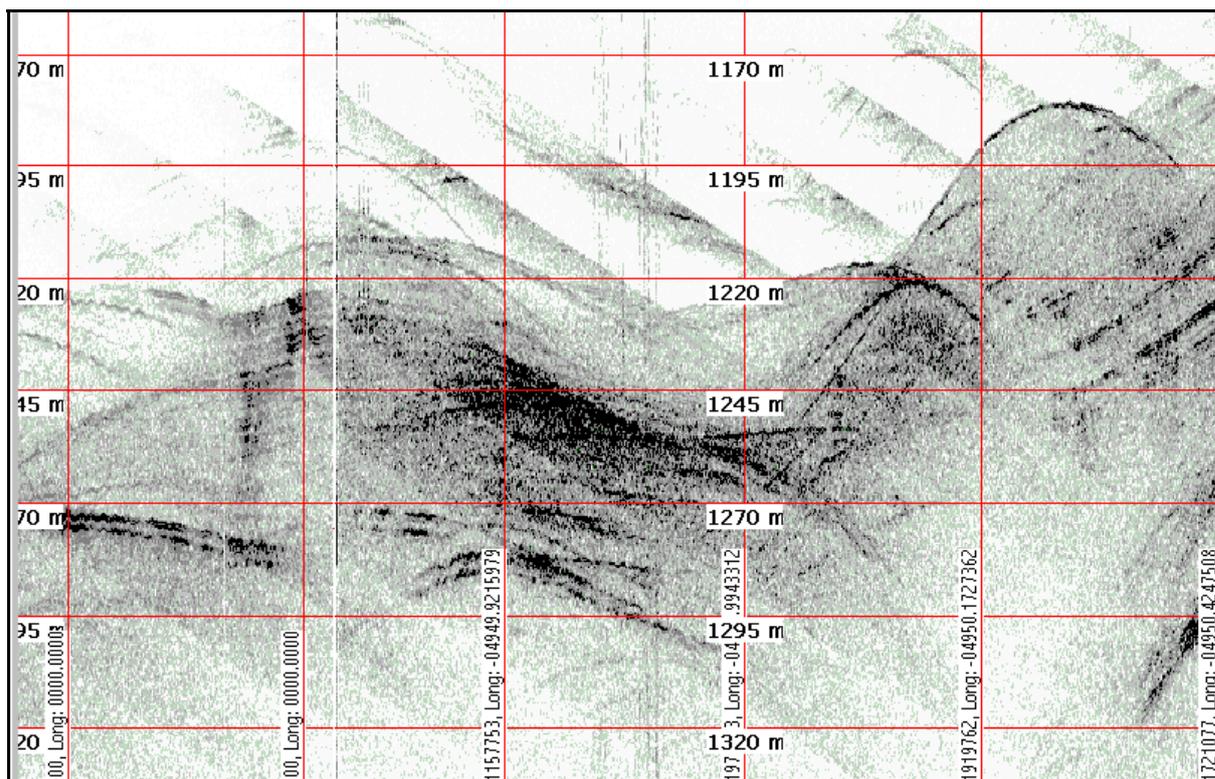


Figura 05: Seção sísmica apresentando variação de relevo onde feixes laterais geram ruídos indesejáveis.

Assim, o tamanho da fonte acústica tem influência direta na logística de um levantamento geofísico. Na execução de estudos em áreas marinhas, são poucas as limitações com relação ao tamanho das fontes acústicas ou ao tamanho dos equipamentos geofísicos de um modo geral, pois comumente são utilizadas embarcações de porte médio a grande para a navegação no mar. Porém, quando do levantamento de áreas restritas (baías, rios etc.), este item torna-se importante aspecto a ser considerado. Os estudos realizados por Placzek & Haeni (1994), por exemplo, desenvolveram-se em área restrita próxima aos *piers* de uma ponte, com pequena coluna d'água variando desde 1 m de profundidade, fatores que oferecem uma série de limitações operacionais.

4 METODOLOGIA

4.1 Arranjos Analisados

4.1.1 Sistema Paramétrico

O sistema paramétrico oferece novas possibilidades em perfilagens de fundo (Grant & Scheireber, 1990) e foram desenvolvidas com a finalidade de minimizar algumas das desvantagens das fontes ressonantes.

Transdutores acústicos que se utilizam do princípio paramétrico (Grant & Schreiber, 1990; Wunderlich, 2003) são aqueles que produzem sinais de baixa frequência a partir da emissão de dois sinais simultâneos de frequências ligeiramente diferentes. Devido a não-linearidades na propagação do som em altas pressões a interferência entre os dois sinais emitidos gera uma frequência secundária. A frequência secundária é gerada no centro do feixe incidente, que possui um estreito ângulo quando comparado com o feixe das frequências primárias, devido a ausência de ecos laterais (fig. 06).

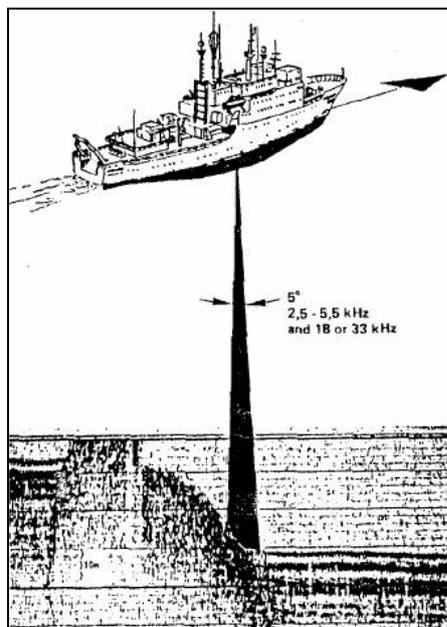


Figura 06: A fonte sísmica é acoplada ao casco do navio e a frequência secundária (2,5 a 5,5 kHz) é gerada no centro do feixe incidente
Fonte:Graham, J.A. and Schreiber, R. (1990)

A frequência chamada secundária (diferença das frequências transmitidas) é relativamente baixa e apresenta penetração no fundo marinho. A frequência primária pode ser utilizada para a determinação exata da profundidade da água, mesmo em situações difíceis. A diretividade para a diferença de frequência é semelhante à frequência primária. Portanto feixes estreitos de baixas frequências podem ser transmitidas por transdutores de relativo pequeno porte.

A emissão de um sinal acústico equivalente a 3.5 kHz, por exemplo, a partir de um único transdutor, exigiria um sistema de maior porte, o que evidentemente demandaria maior complexidade operacional. Este tipo de fonte acústica tem sido amplamente utilizada na Europa em questões relacionadas com a batimetria de precisão, a projetos de dragagem. A figura 07 exibe um sistema alemão (Innomar Technologie) que se utiliza do efeito paramétrico, lidando com frequências primárias ao redor de 100 kHz.

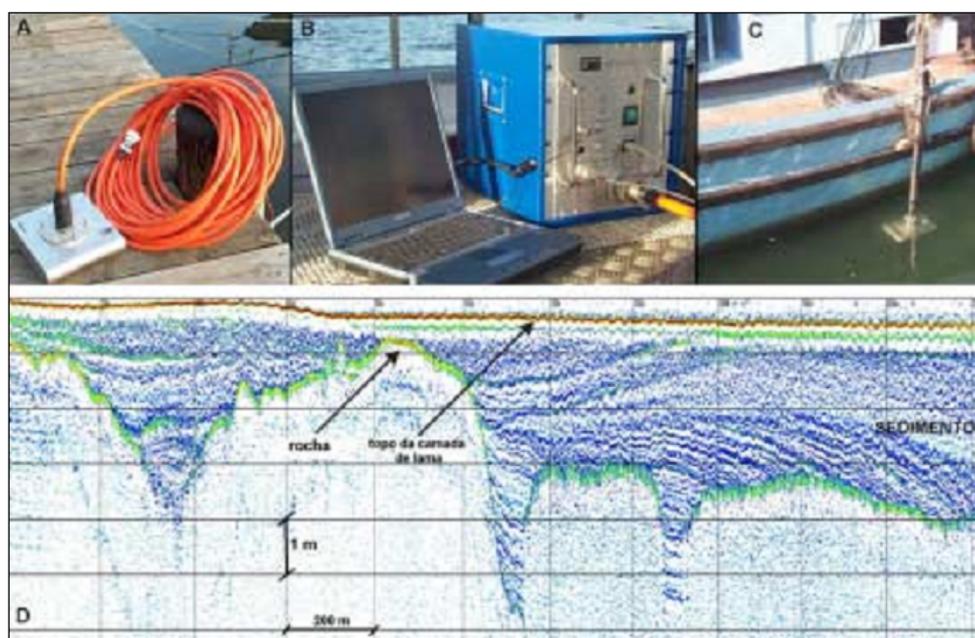


Figura 07: A) exemplo de transdutor acústico que utiliza o sistema paramétrico (modelo SES-96/2000- Standard fabricado pela Innomar Technologie Alemanha); B) unidade de registro e processamento dos dados; C) posicionamento do transdutor na embarcação; D) exemplo de perfil ilustrando os nítidos contatos entre os diferentes estratos geológicos obtido em levantamento executado em bancos de areia do Rio Gâmbia. Fonte: Souza, (2006).

A alta largura de banda de um sistema paramétrico permite que sinais de estreitos de *footprint* sejam transmitidos sem reverberação. Isto faz os sistemas paramétricos especialmente úteis no que diz respeito a pesquisas em áreas de águas rasas.

Em função da pequena largura do feixe e a banda de frequência mais alta, os ecos de sistemas paramétricos apresentam um gradiente mais acentuado do que os ecos de sistemas lineares. Esses sinais são detectados com mais facilidade em condições de baixa relação sinal / ruído, como por exemplo, em áreas com atividades de dragagem. Portanto, é possível detectar pequenas variações na impedância acústica e assim atingir melhor resolução das camadas em sub-superfície (Wunderlich & Müller, 2003).

Pulsos curtos com raios estreitos e ausência de lóbulos laterais apresentam menores volumes de reverberação em subsuperfície em comparação com sistemas lineares. Isso resulta em uma melhor relação sinal-ruído, especialmente em áreas com assoreamento, onde o fundo marinho apresenta-se bastante alterado (Wunderlich & Müller, 2003).

A figura 08 mostra diferentes frequências associadas ao seu comportamento em sistemas lineares e não lineares.

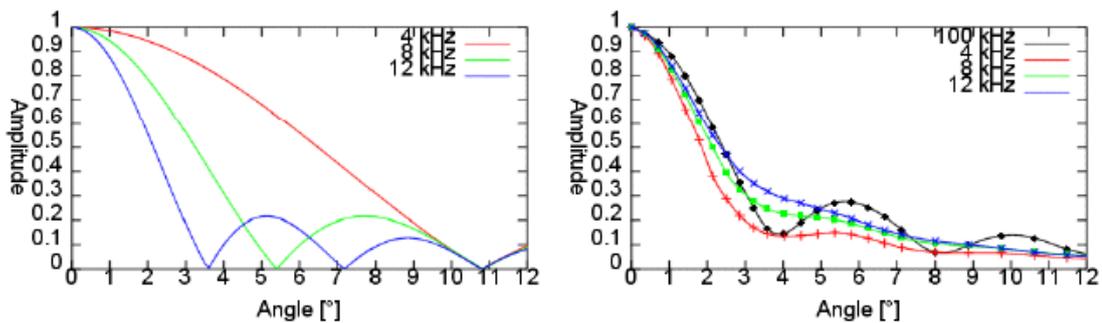


Figura 08: Padrão de diretividade para sistemas lineares (direita) e não lineares (esquerda) Fonte: Wunderlich & Müller, (2003).

Os transdutores apresentam excelente diretividade e com alta energia e, portanto, grande poder de penetração (Mosher & Simpkin, 1999). A figura 09 ilustra o resultado do efeito paramétrico. No exemplo, observa-se o baixo poder de penetração do sinal acústico de

18 kHz (perfil A) bastante melhorado (perfil B) quando da emissão simultânea de um sinal acústico de 21.5 kHz, resultando na emissão da frequência de 3.5 kHz (Grant & Schreiber, 1990).

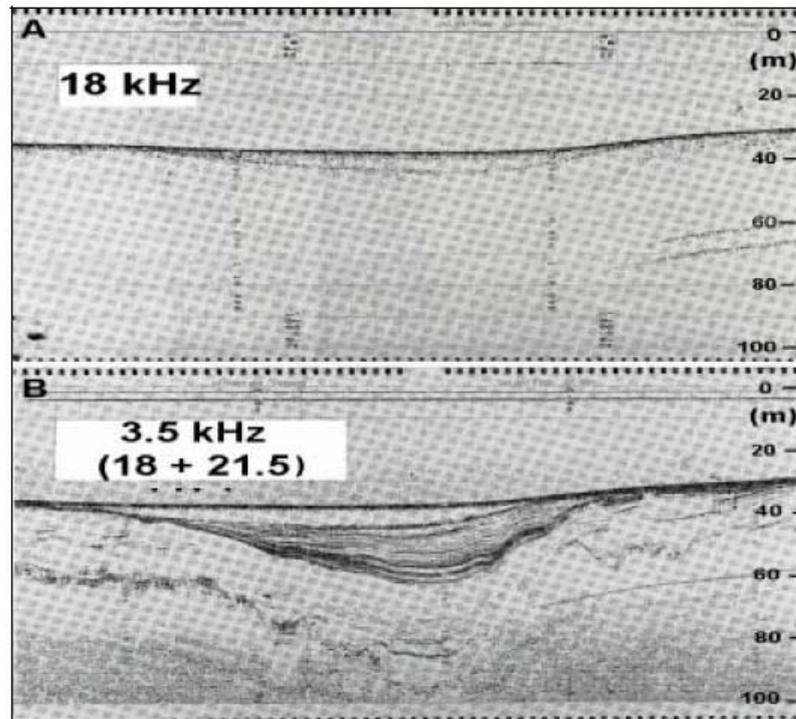


Figura 09: A) Seção sísmica obtida com um sinal de 18kHz; B) Seção sísmica obtida com sinais simultâneos de 18kHz e 21,5kHz. Fonte: Souza (2006).

Por uma simples descrição da ação não-linear, considere que diferenças de frequências podem ser geradas num ponto de uma onda contínua atravessada por dois pulsos de frequências diferentes. Suponha ondas planas contínuas com frequências primárias ω_1 e ω_2 , descritas por:

$$p_1(t) = P_1 \cos(\omega_1 t) \quad (1)$$

$$p_2(t) = P_2 \cos(\omega_2 t) \quad (2)$$

Suponha que essas duas ondas primárias estão viajando na mesma direção e que ambas são muito intensas. Cada feixe será modulado pelo outro. Por exemplo, a amplitude da

onda p_1 será modulada pela presença de p_2 e se tornará $P_1 (1 + m \cos (\omega_2 t))$, onde $m = P_2 / P_1$ é a modulação em amplitude. Quando a modulada p_1 é adicionada à equação 2, obtemos a soma:

$$p(t) = P_1 \cos (\omega_1 t) + P_2 \cos (\omega_2 t) + P_1 m \cos (\omega_1 t) \cos (\omega_2 t) \quad (3)$$

O terceiro termo é a interação não-linear e $m (P_1, P_2)$ é uma medida de sua intensidade. Reconhecer que a diferença de frequências foi gerada, reorganizando o produto dos cossenos, utilizando a relação trigonométrica:

$$2 \cos x \cos y = \cos (x + y) + \cos (x - y) \quad (4)$$

Assim p torna-se:

$$p(t) = P_1 \cos (\omega_1 t) + P_2 \cos (\omega_2 t) + \frac{P_1 m}{2} [\cos(\omega_\Sigma t) + \cos(\omega_\Delta t)] \quad (5)$$

O terceiro termo é uma função de soma ou diferenças de frequências;

$$\omega_\Sigma = \omega_1 + \omega_2$$

(6)

$$\omega_\Delta = \omega_1 - \omega_2$$

Somas e diferenças de frequências como essas seriam geradas em todos os pontos de interação ao longo dos feixes e constituiriam uma distribuição volumétrica de fontes secundárias.

Para descrever e avaliar as fontes de distribuição secundária, utilizaremos a derivada primeira da equação da onda não-homogênea por Westervelt. É uma equação de onda em que o quadrado das pressões primárias atua como fontes primárias "espalhadas" ao longo da onda propagante. Inserindo na equação os parâmetros de não linearidade do meio β e os termos de atenuação das pressões primárias, α_1 e α_2 , sendo ela:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p_s}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_s}{\partial t^2} = & -\frac{\beta}{\rho_A c^4} [-2\omega_1^2 P_1^2 \cos\{2(\omega_1 t - k_1 x)\} \exp(-2\alpha_1 x) \\ & - 2\omega_2^2 P_2^2 \cos\{2(\omega_2 t - k_2 x)\} \exp(-2\alpha_2 x) \\ & - 2\omega_\Sigma^2 P_1 P_2 \cos(\omega_\Sigma t - k_\Sigma x) \exp[-(-\alpha_1 + \alpha_2)x] \quad (7) \\ & - 2\omega_\Delta^2 P_1 P_2 \cos(\omega_\Delta t - k_\Delta x) \exp[-(\alpha_1 + \alpha_2)x] \end{aligned}$$

O quarto termo da equação 7 descreve a diferença de frequências. Assim a diferença de frequência pode ser explorada. Para mostrar isso, Westervelt usou o cálculo de Huygens para determinar a diretividade da componente da frequência secundária ω_Δ .

Suponha que uma seção volumétrica transversal seja pequena quando comparada com o comprimento de onda do pulso gerado pela diferença dos sinais primários. O elemento de volume da seção será $S_0 dx$, onde S_0 é a área transversal do feixe primário de alta frequência. As wavelets secundárias divergem esfericamente com relativas pressões acústicas menos acentuadas. A figura 10 demonstra a geometria para a geração de uma diferença de frequência, onde a pressão do feixe secundário é "sentida" no ponto Q na região coaxial dos feixes primários. A nova frequência surge como uma distribuição contínua de fontes "virtuais" em todo o feixe, de acordo com o princípio de Huygens.

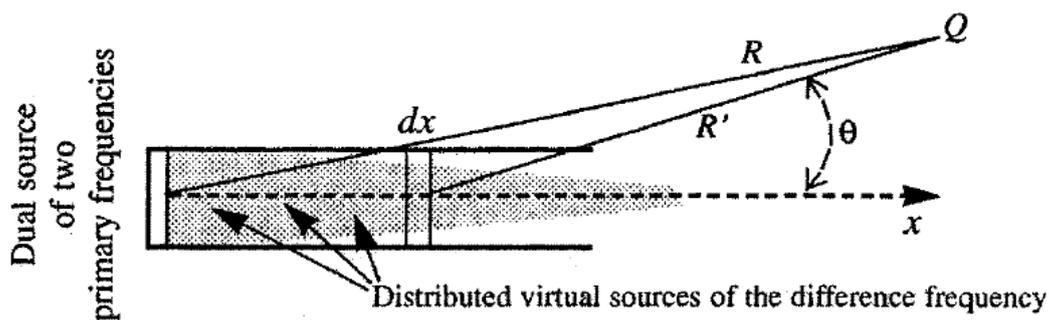


Figura 10: Configuração para a geração da frequência secundária, R e R' representam os raios dos feixes primários, dx é a diferença de distância entre os dois transdutores. Fonte: Medwin H. & Clay C. S, (1997).

A pressão secundária exercida sobre o ponto Q será proporcional ao produto das pressões primárias. Como as pressões primárias são rapidamente atenuadas, a região próxima aos transdutores torna-se a mais importante para a geração do feixe secundária.

Uma vez que o feixe secundário é gerado sua atenuação se dá de forma mais lenta que a atenuação dos feixes primários.

No entanto, seu feixe é muito estreito. A pressão de resposta direcional dependerá de k_{Δ} , α_1 , α_2 e θ_{Δ} . Como α_1 e α_2 , são atenuados rapidamente a largura do feixe dependerá somente de θ_{Δ} :

$$\text{beam width} = (2 \theta_{\Delta})$$

Fonte: Westervelt (1963)

Com isso o feixe secundário será praticamente livre de lóbulos laterais, pois os lóbulos laterais gerados pelas fontes primárias se matematicamente anularam entre si.

A utilização do efeito paramétrico possui muitas vantagens, entre elas:

- O pequeno diâmetro aumenta a resolução espacial verticalmente e lateralmente e reduz os padrões de difração dos ecogramas, aumentando a resolução do dado adquirido (Kuhn & Weber, 1993);

- Devido às altas frequências primárias, um pulso de curto comprimento pode ser irradiado. Este combinado com a baixa frequência secundária, proporciona uma maior resolução vertical, mesmo em águas mais profundas (Kuhn & Weber, 1993);

- Devido a possibilidade de variação da segunda frequência primária e do comprimento do pulso, o operador pode selecionar uma penetração ou uma resolução máxima de profundidade (Kuhn & Weber, 1993);

- O sinal refletido digitalizado pode ser comparado com propriedades físicas medidas em perfilagens de testemunhos (velocidade, densidade, porosidade, susceptibilidade magnética) e com sismogramas confeccionados destes dados (Kuhn & Weber, 1993);

4.1.2 Sistema Chirp

Chirp, que em inglês significa gorjeio, é um sinal que os pássaros utilizam para comunicação, e sua característica principal consiste na variação da frequência com o tempo e é amplamente utilizado em sonares e radares. No Chirp linear a frequência aumenta linearmente com o tempo.

$$f(t) = f_0 + kt$$

Onde: f_0 é a frequência no instante t_0

k é a razão de aumento da frequência ou razão chirp.

Em um sinal chirp, as mudanças de frequência ocorrem linearmente com o tempo desde o início até ao final do o pulso (fig. 11).

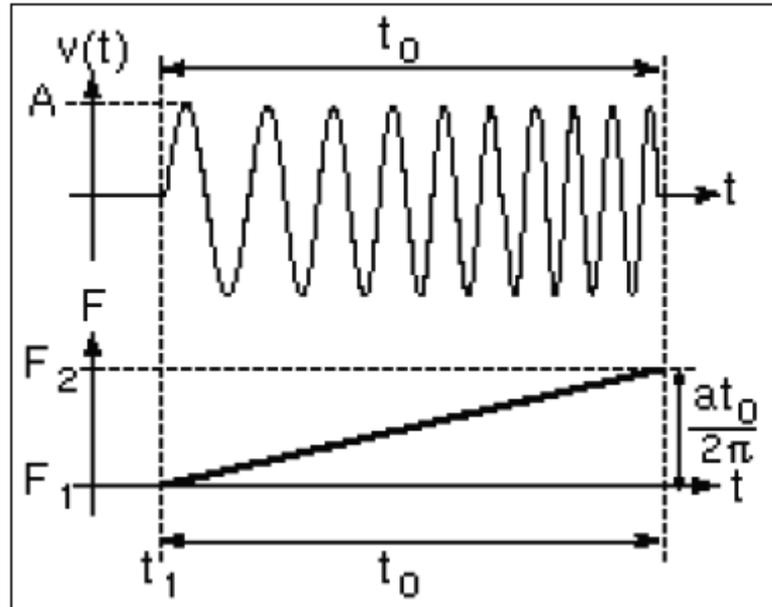


Figura 11: Ilustração da variação linear da frequência do pulso Chirp. Fonte: Moustier C.(2009)

A largura de banda W do sinal é a diferença entre as frequências de F_2 e F_1 :

$$W = F_2 - F_1 = \frac{at_0}{2\pi},$$

Onde: $\frac{a}{2\pi}$ é a inclinação da rampa de frequência.

A fonte de alta resolução que utiliza tecnologia chirp, apresenta frequência modulada (FM). Ele emite um pulso que varre uma janela de frequências, que podem incorporar uma variedade de leis FM (por exemplo, linear, quadrática e logarítmica) e abrangem diversas faixas de frequência.

Para ter uma idéia das características de frequência de um sinal chirp, multiplicaremos uma onda cuja frequência muda linearmente com o tempo por uma janela retangular. A transformada de Fourier da janela retangular é a função sinc. Para o

sinal cuja frequência varia com o tempo, podemos aproximar a sua transformada de Fourier como a transformação de uma série de pequenos tons puros nas frequências diferentes presentes no sinal. A convolução das funções delta correspondente com os rendimentos da função sinc aproximam-se a formas trapezoidais mostradas no espectro de amplitude $|V(F)|$ da figura 12.

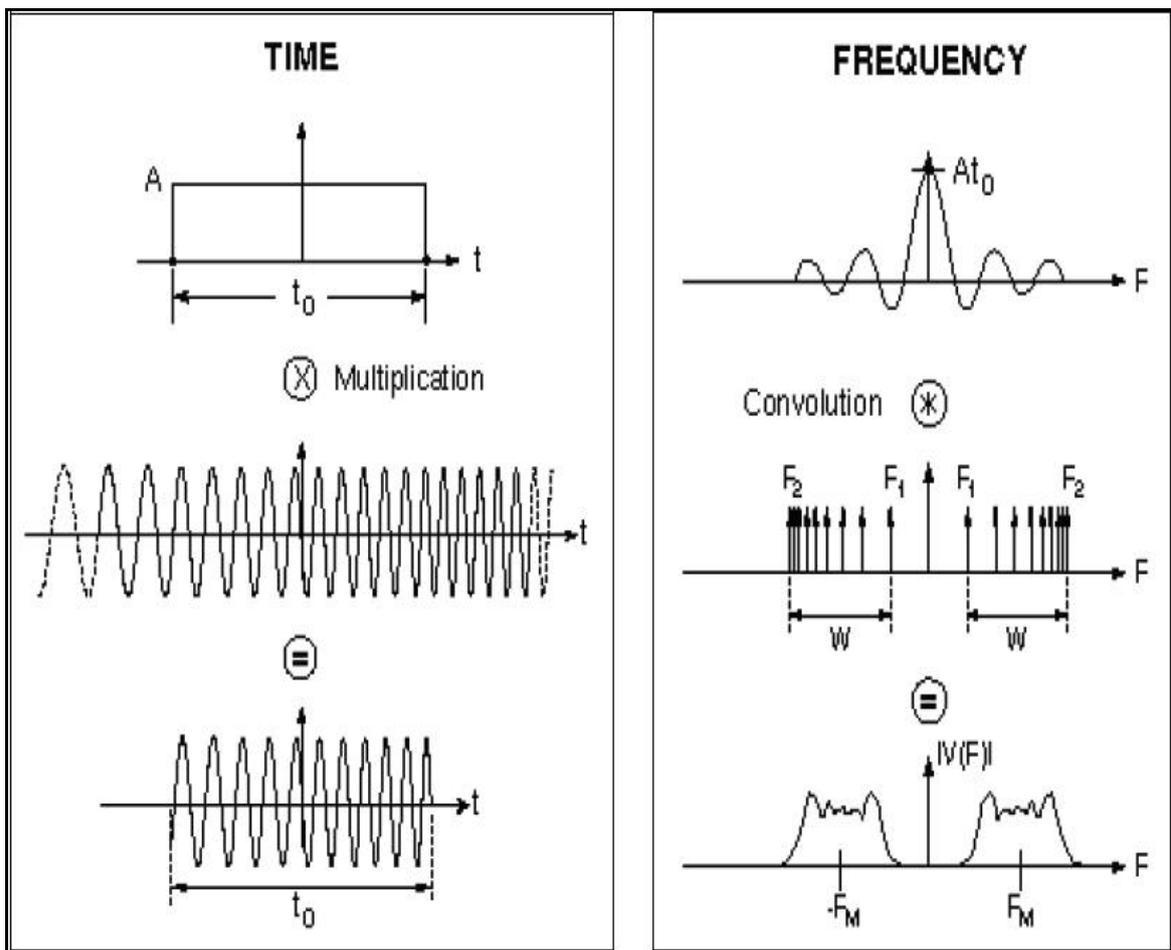


Figura 12: Representação de aproximações de transformadas de Fourier Fonte: Moustier C.(2009)

Uma das vantagens do sinal Chirp reside nas características da sua função de autocorrelação. Tomando a transformada de Fourier do espectro de densidade de potência $|V(F)|^2$, temos uma forma de onda cosseno de FM frequência dentro de um envelope correspondente ao sinc. O espectro FT apresenta forma retangular de cada lado do eixo de

freqüência. A autocorrelação tem um pico acentuado em zero e sua largura no primeiro nulo do envelope sinc é o inverso da largura de banda W do chirp (fig. 13).

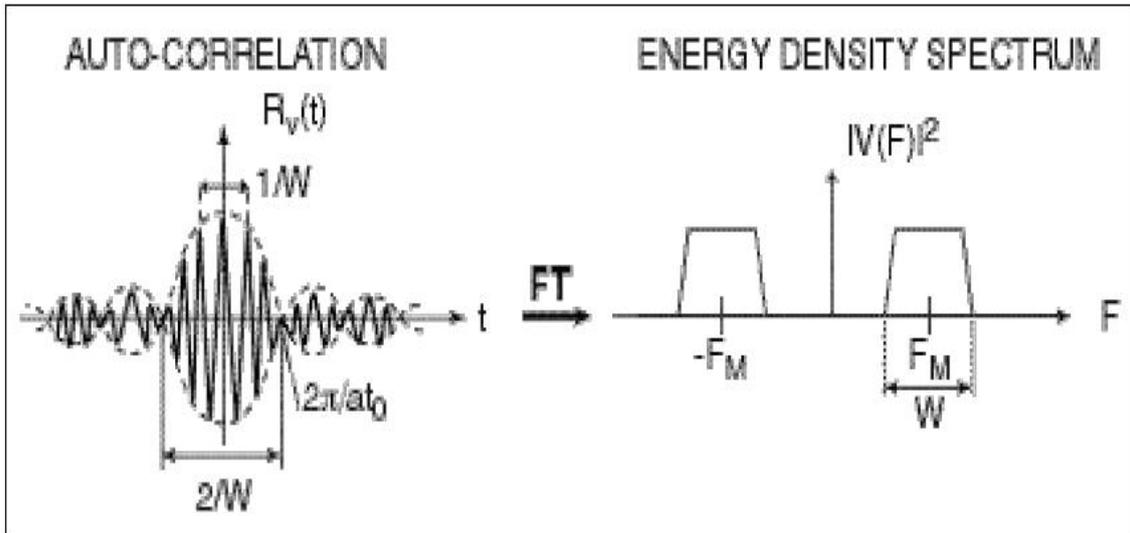


Figura 13: Representação aproximada FFT da autocorrelação de um sinal Chirp. Fonte: Moustier C.(2009)

A banda efetiva W_e do sinal chirp é essencialmente igual à largura de banda W do sinal:

$$W_e \approx W = \frac{at_0}{2\pi},$$

e da duração efetiva do sinal chirp é, portanto:

$$\tau_e = \frac{1}{W_e} \approx \frac{2\pi}{at_0},$$

que normalmente é menor do que a duração do pulso reais. Portanto sinais que possuem um conteúdo de potência distribuído em um amplo espectro de frequência, cuja autocorrelação é calculado através de um filtro que maximiza a relação sinal/ruído tem uma melhor resolução do tempo do que um pulso real com a mesma duração t_0 .

A razão $\frac{t_0}{\tau_e}$ dá uma medida da compressão de pulso obtida através do processo de

filtragem:

$$\frac{t_0}{\tau_e} \approx W t_0$$

Como o processo de correlação quadrados das amplitudes espectrais, o pulso de auto-correlação possui um espectro mais acentuado do que o pulso de "saída", uma vantagem adicional dessa correlação é que ele consegue um ganho de processamento de sinal sobre o ruído de fundo. A pesquisa de LeBlanc et al (1992) constatou que, de modo a igualar o desempenho de pulsos do sinal chirp, pulsos convencionais teriam que usar um pulso com uma potência de pico de 100 vezes maior.

Os sistemas sísmicos com fontes acústicas do tipo chirp hoje disponíveis são digitais e disponibilizam várias alternativas operacionais que permitem, por exemplo, o controle total do espectro de frequências e das características dos pulsos emitidos, propriedades estas que estão diretamente relacionadas com a resolução e penetração do sistema.

A tabela 01 mostra as características de três modelos de fontes tipo Chirp fabricados pela empresa americana Edgetech. Podemos notar que a resolução vertical é inversamente proporcional o espectro da frequência de operação que por sua vez esta relacionada com ao tamanho do transdutor .

Modelo da fonte		SB-512i	SB-216 S	SB-424
Espectro de frequencias		500 Hz – 12Khz	2 – 16 Khz	4-24 Khz
Pulsos(selecionado pelo operador)		2-12Khz,2-8Khz,1,5-7,5Khz,1-6Khz,1-5Khz,0,5-5Khz	2-16Khz,2-12Khz,2-10Khz	4-24Khz,4-20Khz,4-16Khz
Resolução vertical (dependente do pulso selecionado)		8 – 20 cm	6 – 10 cm	4 – 8 cm
Penetração (m)	Areia grossa	20	6	2
	argilas	200	80	40
Largura do feixe		16° 32°	17° 24°	16° 23°
Tamanho		160L x 124W x 47H	105L x 67W x 40H	77L x 50W x 34H
Peso		190 Kg	76Kg	22Kg
Calibração		Sistemas calibráveis para medidas de coef. De reflexão		
Cabos		3 pares de cabos blindados		
Máxima prof. De operação		300 m		
Altura ideal do peixe		3 – 5 (metros acima da sup. do fundo)		
Velocidade de navegação		3 – 4 nós (ideal) / 7 nós (máxima veloc. com segurança)		
Opções adicionais		Integrated Depth Sensor, 4kW Amplifier, USBL Acoustic Tracking System		

Tabela 01: Ilustração de exemplos de configurações de arranjos de fontes do tipo chirp da marca Edgetech. Modificado de <<http://www.edgetech.com>>. Acesso: dez/2005.

4.2 Parâmetros Analisados

Para entender o comportamento das respostas obtidas pelas duas fontes que estão sendo analisadas é necessário o estudo de uma série de variáveis físicas presentes em ambas as fontes ao ter seu sinal interagindo com o meio.

Um dos aspectos fundamentais no estudo de um sinal em contato com o meio está relacionado com a compreensão da detectabilidade de um determinado método investigativo.

Existem alguns parâmetros importantes para analisar no estudo de fontes ressonantes que deve ser discutido brevemente.

4.2.1 Diretividade

A diretividade do feixe de som transmitido depende das dimensões do transdutor relacionado à frequência do som. Existe um lóbulo central que armazena aproximadamente a metade da potência do feixe emitido e a restante encontra-se distribuída nos lóbulos laterais (fig. 14).

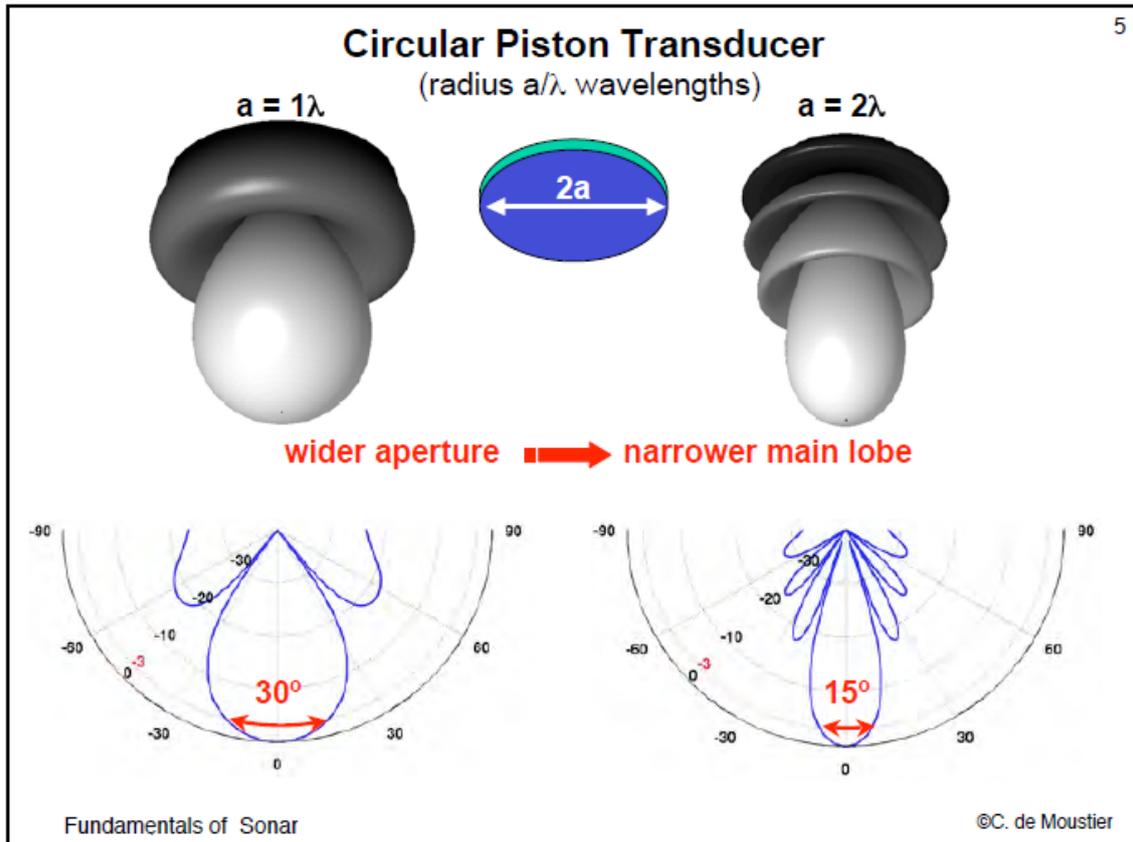


Figura 14: Ilustração de diferentes diretividades, de acordo com as dimensões dos transdutores. Fonte: C. de Moustier.(2009)

O som refletido a partir das bordas do *footprint* tem um tempo de viagem maior do que o som no centro do feixe devido ao percurso de viagem (fig. 15). A resolução horizontal depende, principalmente, da área que é atingida pelo feixe emitido. Particularmente em áreas profundas são observadas diversas refrações devido às mudanças da velocidade do som na coluna d'água e ao aumento o ângulo correspondente ao *footprint*, ampliando assim a área de ensonificação no fundo prejudicando a resolução horizontal e acarretando a presença de hipérboles de difração geradas por pequenas estruturas geológicas.

Feixes que apresentam elevados *footprints* geram um elevado volume de reverberação. Para se obter ecos sem estes efeitos e necessário um feixe estreito sem lobos laterais.

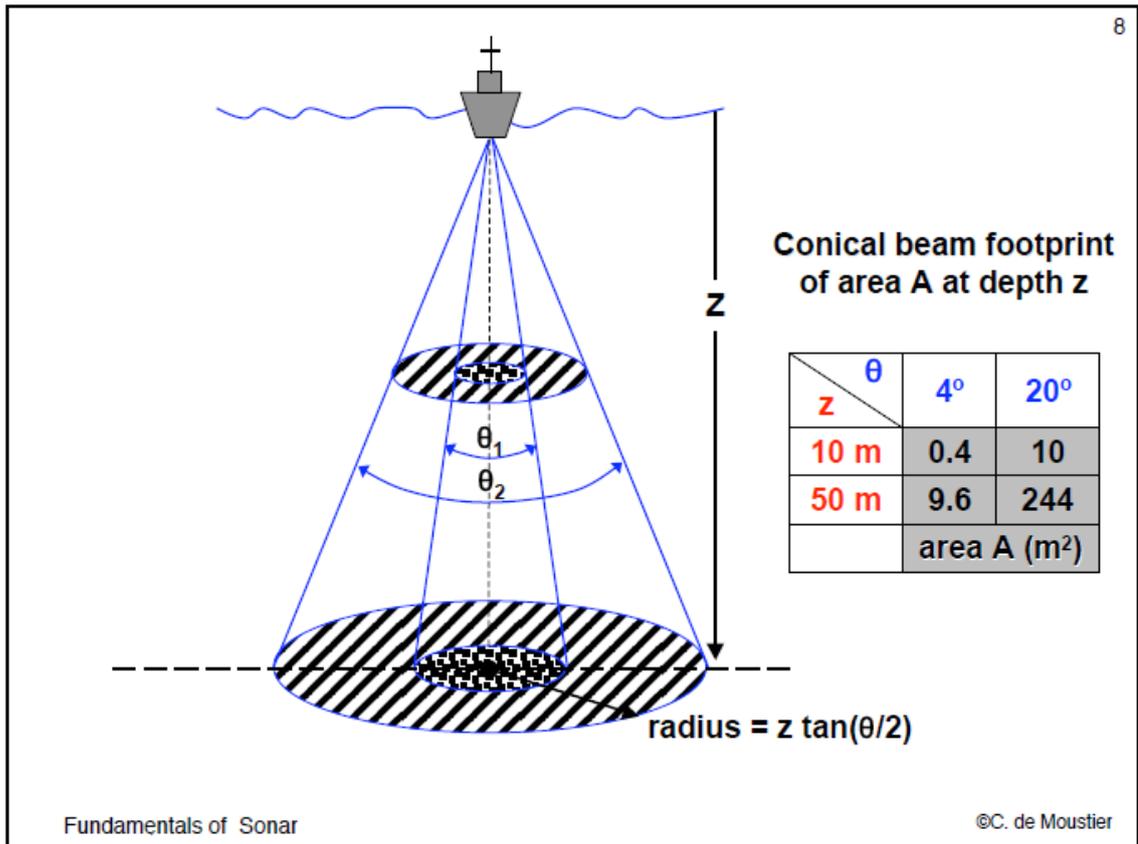


Figura 15: Relação entre o ângulo do feixe cônico e a área ensonificada em diferentes profundidades. Note que o tempo de retorno do sinal nas bordas do cone é maior que no centro. Fonte: C. de Moustier.(2009)

4.2.2 Resolução

Por resolução, entende-se a capacidade de um método geofísico detectar dois objetos distintos na superfície (resolução horizontal) ou em subsuperfície (resolução vertical) e está diretamente relacionada com o espectro de frequências emitido pela fonte acústica: frequências altas oferecem boa resolução; frequências baixas, boa penetração, mas, pobre resolução. Optar pela utilização de um ou de outro sistema está diretamente relacionada com os objetivos do projeto de investigação.

Equipamentos que emitem espectros de frequência mais baixos possuem maior energia e alcançam maiores profundidades de investigação. Por outro lado, considerando-se que o feixe principal de sinais emitidos pelo transdutor de um ecobatímetro tem formato de um cone, a geometria do sistema constitui-se num fator de extrema relevância no controle da

resolução do sistema adotado. Cones de sinais com ângulos mais amplos amostram grandes áreas da superfície de fundo e afetam negativamente a resolução do sistema. O contrário ocorre quando se utilizam sistemas que emitem feixes de sinais estreitos.

Numa investigação batimétrica, em uma área com coluna de água de 5000 m, por exemplo, utilizando-se de um sistema cujo cone principal de sinais tem ângulo de abertura de 40° , a projeção dos sinais emitidos na superfície de fundo atinge uma área de 3,6 km de diâmetro. O sinal que retorna desta enorme área amostrada na superfície de fundo vai ser interpretado pelo sistema como um único ponto e conforme ilustrado nas figuras 16 e 17, perde-se resolução, pois feições topográficas importantes da superfície de fundo certamente não serão detectadas.

Utilizando, neste mesmo exemplo, um sistema com o cone de sinais de ângulo de abertura de apenas 1° , a projeção do sinal na superfície de fundo vai definir uma área com diâmetro de apenas 0,087 km, possibilitando a detecção de detalhes da superfície de fundo e desta forma, maior resolução.

De acordo com o exemplo abaixo é fácil perceber que o sistema paramétrico se enquadra melhor nessas condições por apresentar um estreito ângulo de incidência.

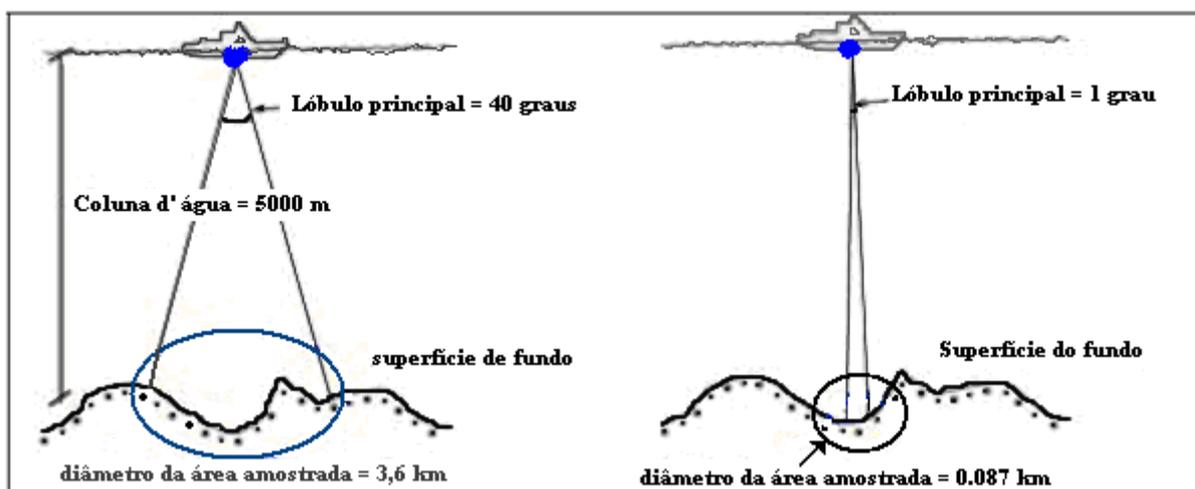


Figura 16: Padrões de ângulos de abertura dos feixes de sinais emitidos por ecobatímetros. À esquerda, ilustra-se um feixe de sinais de ângulo maior, que projeta o sinal acústico sobre grande área na superfície de fundo, tornando pobre a resolução do sistema; à direita, feixe de sinais com ângulo pequeno, o que possibilita maior resolução na informação adquirida, já que menor área da superfície de fundo é amostrada em cada pulso emitido. Modificado de Jones (1999) apud Souza, (2006) .

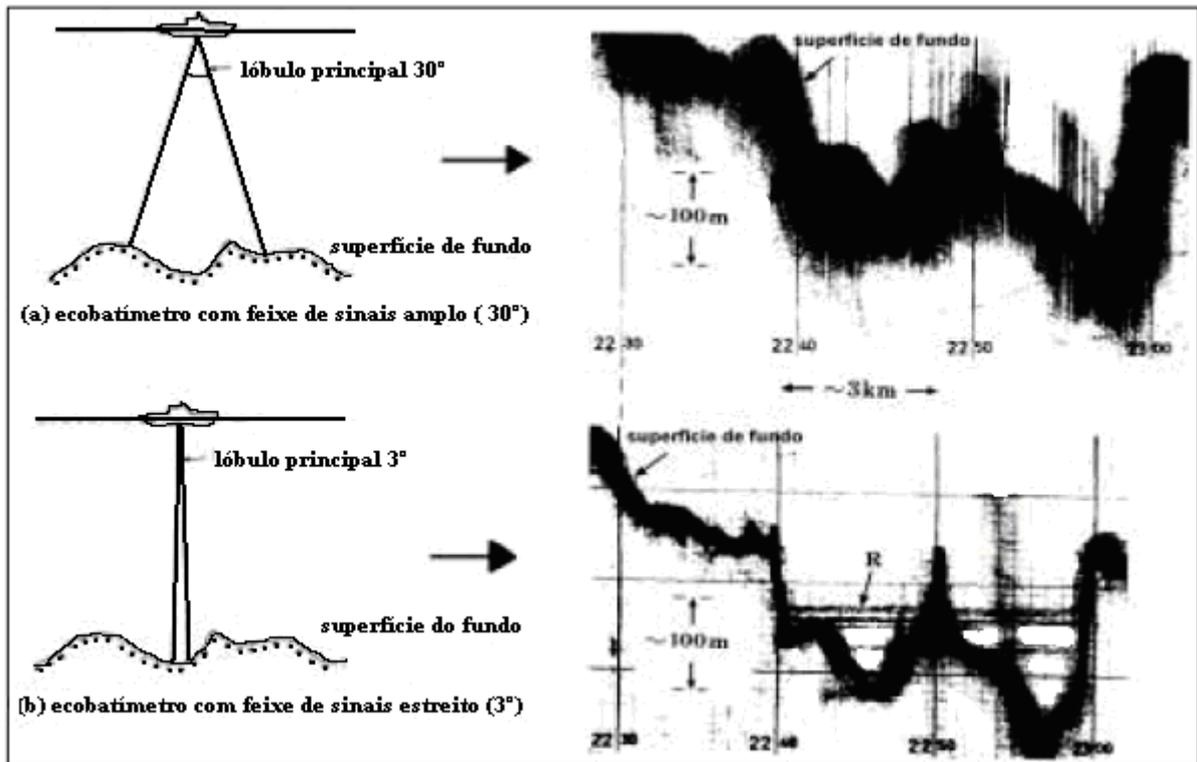


Figura 17: a) ecobatímetro com feixe de sinais amplo (18 kHz/30°) e, à direita, o perfil obtido; b) ecobatímetro com feixe de sinais estreito (30 kHz/1,3°) e à direita o perfil obtido. Notar a melhor definição da superfície de fundo no perfil obtido com o ecobatímetro com feixe de sinal estreito. Neste perfil inclusive identifica-se um zona de reflexão (R) na coluna de água provavelmente relacionada com a zona de atividade hidrotermal. Modificado de Jones (1999) apud Souza (2006).

A resolução vertical constitui-se num dos principais aspectos a ser considerado em estudos estratigráficos, pois é definida como a capacidade do sistema acústico de identificar ou distinguir estratos sedimentares, e está diretamente relacionada com a duração do pulso emitido: quanto mais curto o pulso emitido, maior a capacidade de discriminação ou maior a resolução vertical do sistema.

Como para a resolução vertical o parâmetro mais importante é o comprimento de onda dominante, que é a velocidade da onda dividida pela frequência dominante, o processo de deconvolução tenta aumentar a resolução vertical alargando o espectro e conseqüentemente comprimindo a wavelet.

Outra forma de abordagem do tema resolução vertical é do ponto de vista do conteúdo de frequências dos sinais emitidos tendo em mente as seguintes questões: a) qual a espessura mínima de um pacote sedimentar para que as reflexões oriundas da base e do topo do estrato

não interfiram uma na outra? b) qual a menor espessura de uma camada sedimentar para que possa ser detectada?

Todos esses questionamentos estão relacionados diretamente com a fonte que irá ser empregada para um determinado levantamento.

A figura 18 mostra que os sinais refletidos no topo e na base de uma camada sedimentar, serão identificados como tal desde que a camada sedimentar tenha espessura maior ou igual à metade do comprimento de onda do sinal emitido, caso contrário, o topo e a base das camadas não serão individualizados (Badley, 1985). Assim, conforme ilustra a tabela contida na figura 18, que utiliza como exemplo, sinais acústicos com frequência principal de 50 Hz (típico de investigação profunda) e 1000 Hz (típico de investigação rasa), as espessuras mínimas detectadas por estes sistemas, são, 50 m e 1m, respectivamente.

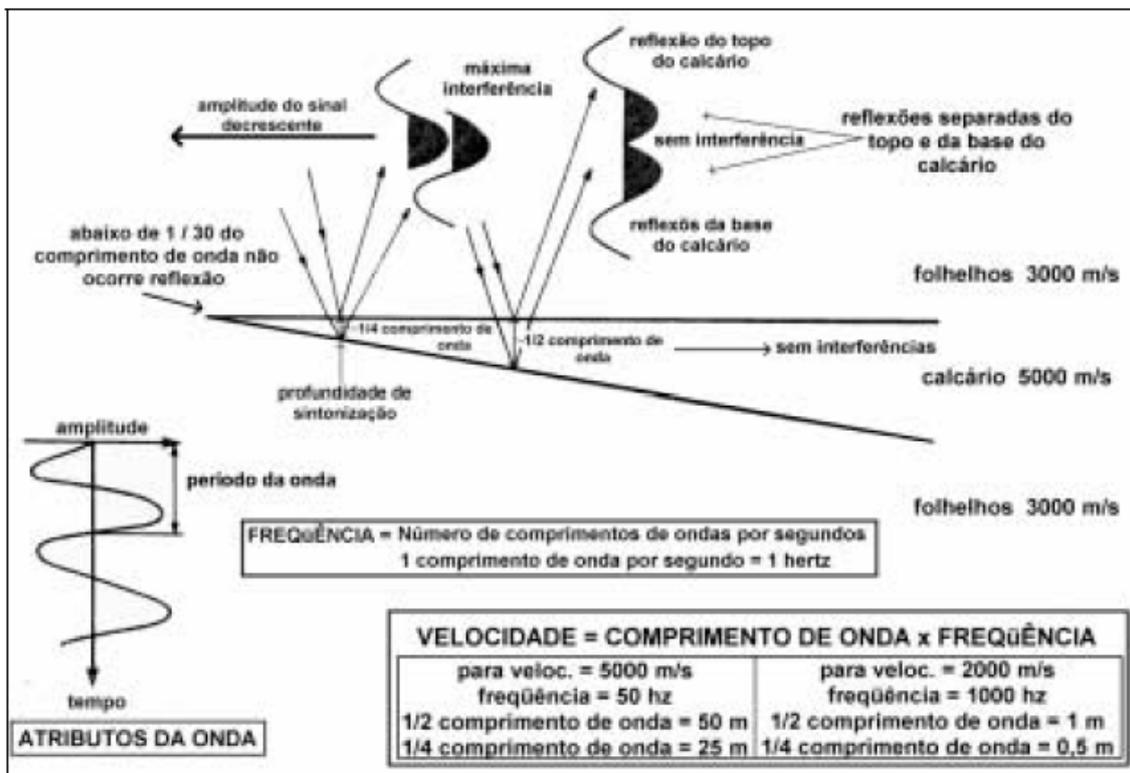


Figura 18: Interferências entre os sinais acústicos que condicionam a identificação das espessuras das camadas sedimentares e dos correspondentes, topo e base. Observa-se nesta figura que a espessura de um estrato será identificada se ela for maior que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda do sinal acústico emitido; topo e base das camadas só serão identificados se a espessura do pacote sedimentar for maior que $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda do sinal acústico emitido. Modificado de Badley (1985).

De acordo com a figura 18, ambas as fontes analisadas no presente estudo (Chirp e Paramétrica) utilizam frequências mais elevadas que 1000Hz, assim ambas apresentam boa resolução da acordo com a tamanho do comprimento de onda.

A figura 19 ilustra o conceito de resolução horizontal referente ao espaçamento mínimo resolvível entre respostas pontuais (A e B), mas é frequentemente definida como a largura de uma resposta.

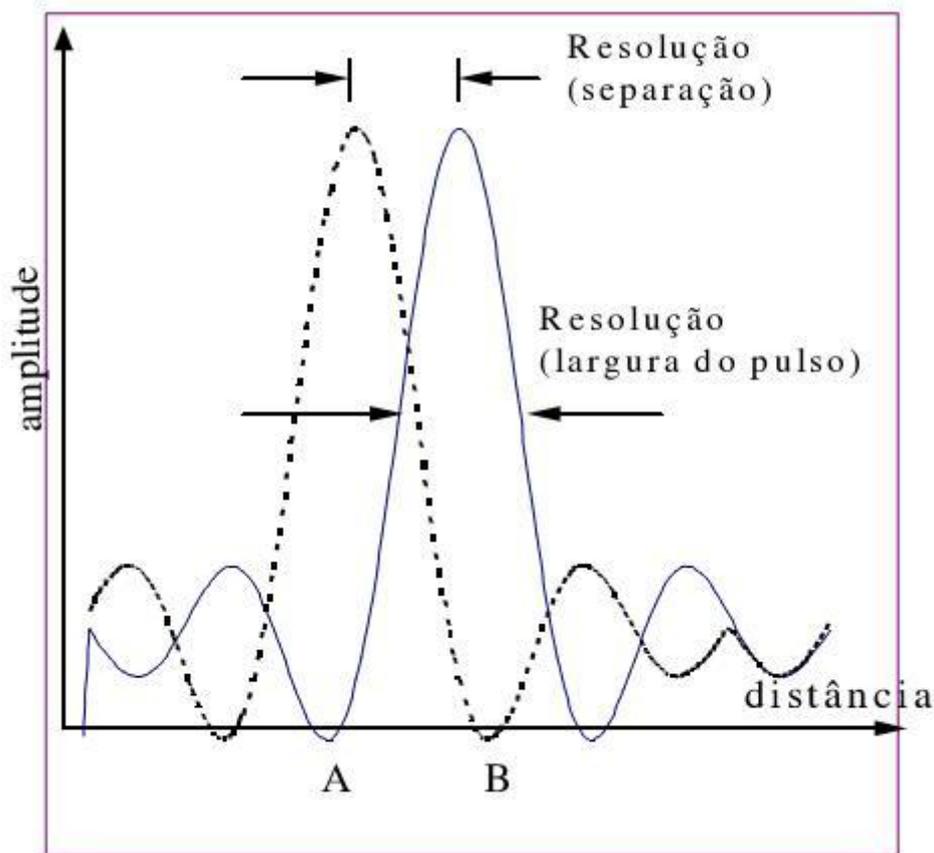


Figura 19: Referente a dois objetos distintos (A e B) na superfície (resolução horizontal)

4.2.3 Penetração

A penetração, por outro lado, relaciona-se com o espectro de frequências emitidas pela fonte, de maneira inversa, ou seja, com espectro de frequências mais baixas ocorre maior penetração.

Assim, na investigação para petróleo, por exemplo, cujo objetivo é a investigação profunda, as frequências dos sinais acústicos utilizados são comumente inferiores a 300 Hz. Emitindo-se espectro de frequências desta natureza, fontes sísmicas de alta energia são empregadas e grandes profundidades são alcançadas (milhares de metros), com prejuízo da resolução, pois neste caso camadas sedimentares finas (de algumas dezenas de metros) não são identificadas tampouco distinguidas uma das outras.

Ao contrário, quando se utilizam fontes sísmicas que emitem altas frequências, camadas decimétricas podem ser identificadas, mas com prejuízo da penetração do sinal, que comumente não ultrapassa algumas dezenas de metros. Daí a aplicação distinta para cada tipo de fonte acústica.

5. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na plataforma interna do litoral do estado do rio de janeiro ao largo da localidade de barra do furado, município de Quissamã, a uma distância de aproximadamente 1,4 km da costa (fig. 20).

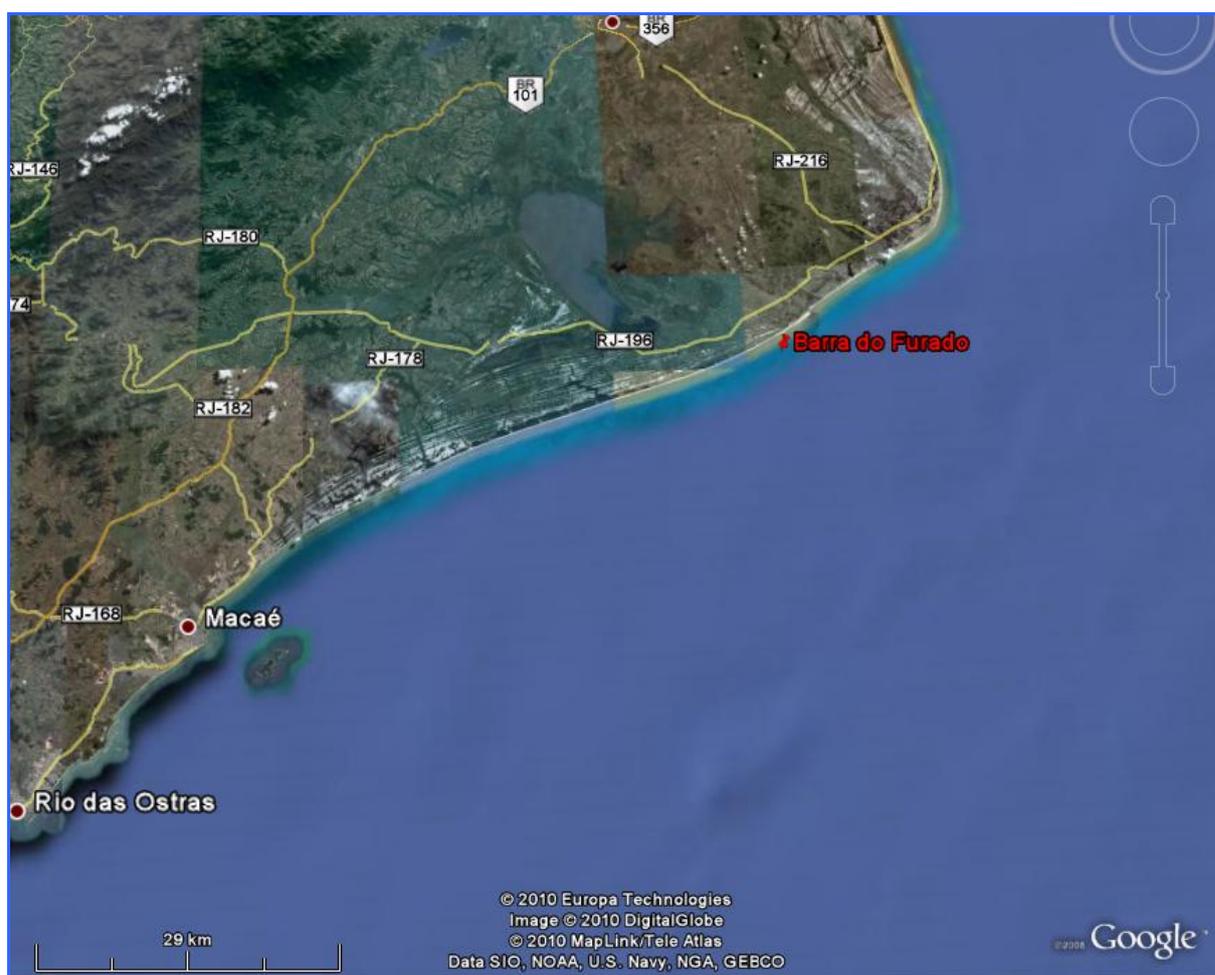


Figura 20: Área onde foi realizado o levantamento utilizando os sistemas chirp e paramétricos.

5.1 Geologia Regional da Bacia de Campos

A Bacia de Campos está situada entre o Alto Estrutural de Vitoria, no estado de Espírito Santo e o Alto Estrutural de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro.

A Plataforma Continental na Bacia de Campos tem a sua largura variando de 46 milhas náuticas, a este de Vitória, e 65 milhas náuticas no paralelo de Cabo Frio.

Fisiograficamente, o relevo da Plataforma Continental apresenta-se relativamente suave e monótono, com contornos batimétricos acompanhando a configuração da linha da costa e sendo modelada pelo Complexo deltaico do Rio Paraíba do Sul. Os gradientes batimétricos variam de 1:491 (0.116°) ao largo do Cabo de São Tomé a 1:660 (0.85°) ao largo de Macaé.

Ao sul do Cabo de São Tomé, na área de estudo, a plataforma interna entre barra do Furado e Macaé – até 38 m de profundidade – apresenta inclinação de 1:560 ao largo do trecho entre Barra do Furado e Macaé, enquanto a partir da plataforma média as isóbatas denotam um lobo voltado para SO com declividade de 1:2900 (Silva, 1987). Em frente à Barra do Furado, o autor identificou um escarpamento com gradiente de 1:400 entre as isóbatas de 66 e 88m relacionando-o a uma face de praia pretérita. No trecho compreendido entre barra do Furado e Macaé, o fundo do mar apresenta caráter lobado voltado para sudoeste e limitado a leste por um canal submarino entre as isóbatas de 56 e 74m (Silva, 1987).

5.2 Cobertura sedimentar

A cobertura sedimentar da plataforma interna e média da região de Barra do Furado é predominantemente siliciclástica, enquanto a partir da transição entre a plataforma média e externa predominam sedimentos carbonáticos (Kowsman e Costa, 1979). De acordo com Dias *et al.* (1982) no trecho de predomínio siliciclásticos o teor de carbonato de Cálcio é inferior a 29%, enquanto na porção mais distal da plataforma são encontrados teores superiores a 80%. Imediatamente ao sul do Cabo de São Tomé estes sedimentos são constituídos por areias

grosseiras subangulosas a subarredondadas que se misturam com areias finas e polidas ao largo de Macaé e após essa área de transição ao largo de Cabo Frio ocorrem areias muito finas com ampla distribuição na plataforma (Alves e Ponzi, 1984).

È muito comum a presença de biodetrítos e concreções espalhadas de forma aleatória sobre as diversas unidades de sedimentação. A maior parte do material clástico encontrado na região de Barra do Furado são quartzosos e apresentam graus de arredondamentos que vão de angulosos a subarredondados, sendo normalmente imaturos, isto indica uma origem fluvial próxima (Rio Paraíba do Sul).

Segundo Alves e Ponzi, 1984 e Dias (2000), foi constatado que na área estudada ocorrem duas unidades de sedimentação distintas, a primeira constituída por sedimentos finos a médios e a segunda por sedimentos finos com concreções. O material concrecional ocorre espalhado de forma aleatória sobre sedimentos finos e devem estar associados ao produto da destruição e retrabalhamento de bioconstruções de idades mais antigas, já que a atual influência dos sedimentos terrígenos provenientes do Rio Paraíba do Sul e a constante movimentação de sedimentos promovidos por correntes internas, impedem a colonização biogênica da área.

6. RESULTADOS

Foram analisados 2 linhas de levantamento paramétrico e 3 linhas de chirp, onde ocorrem à interseção dos dois equipamentos, Chirp e Paramétrico, com o objetivo de observar suas atuações em um meio predominantemente arenoso (fig. 21).

Foram utilizados diferentes padrões de visualização dos perfis, devido a possíveis variações de ganho durante a aquisição dos levantamentos. As tonalidades foram ajustados para a melhor apreciação dos refletores. O software utilizado foi o Kingdon 8.4.

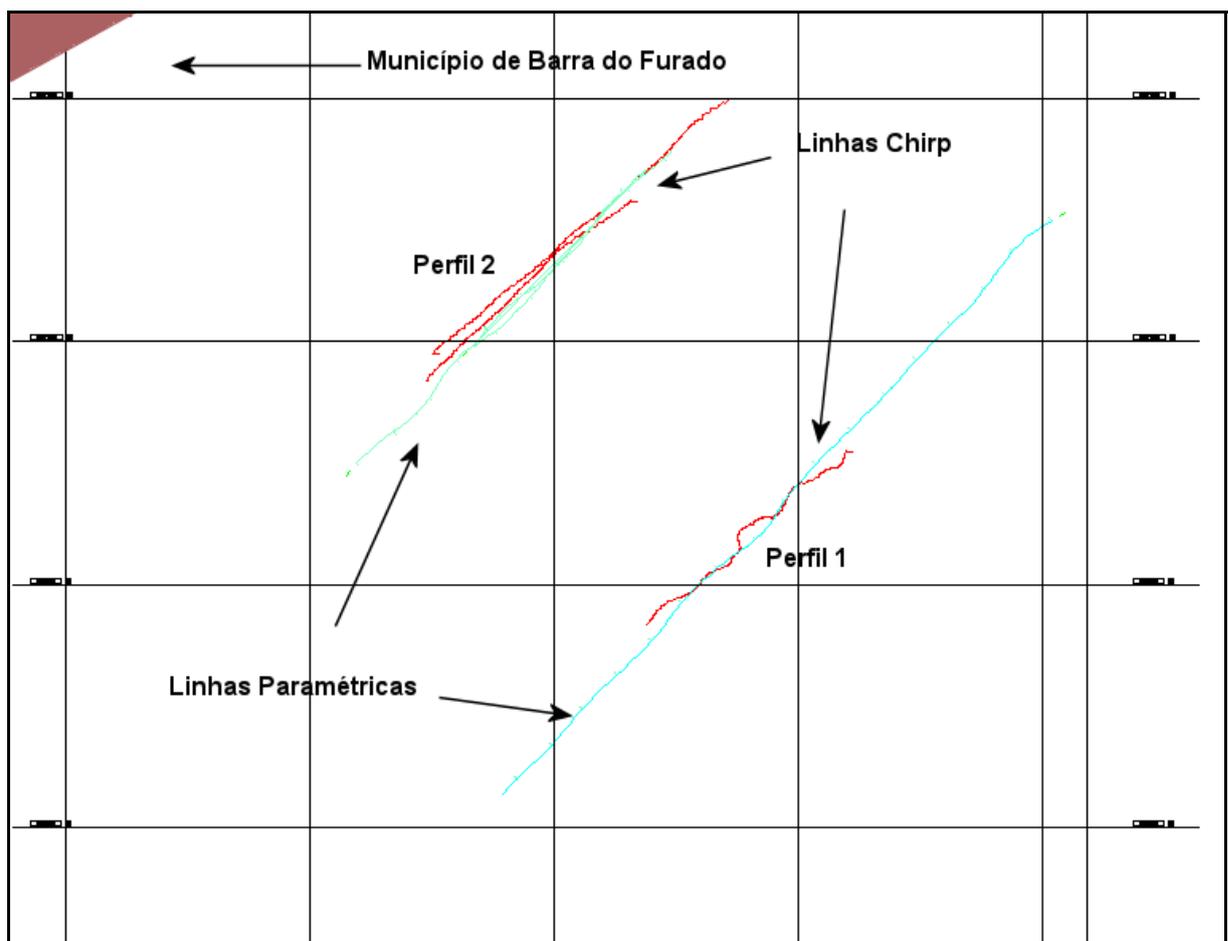


Figura 21: Área onde foram realizados os levantamentos utilizando os dois tipos de fontes, utilizando o sistema paramétrico e o chirp.

6.1 Descrição e interpretação dos perfis sísmicos

6.1.1 Perfil 1

Este perfil localiza-se na porção mais externa da área de levantamento, (fig. 22). A porção em destaque, representa o perfil a ser analisado, as linhas em vermelho correspondem ao levantamento chirp e a linha em verde correspondem ao levantamento utilizando o sistema paramétrico.

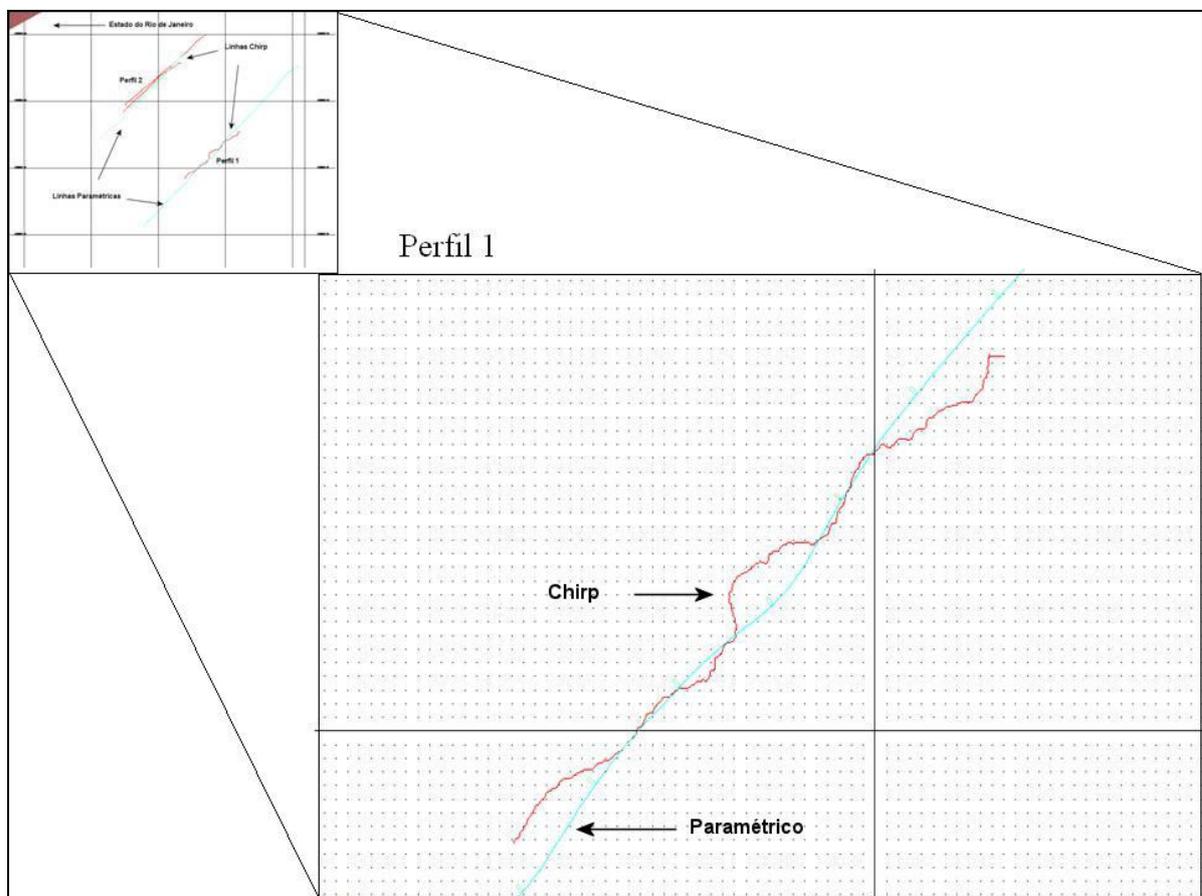


Figura 22: Área correspondente ao perfil 1.

Nos dados obtidos no perfil 1 com os dois equipamentos apresentaram diferenças consideráveis.

Em ambos os levantamentos, chirp e paramétrico, foi observado um fundo reflexivo, podendo estar associado a um fundo arenoso, o que resulta em uma baixa penetração do sinal acústico.

Nos dados adquiridos com o equipamento paramétrico pode se observar alternância de refletores ao longo da linha. Em alguns momentos foi observado uma intercalação de um segundo refletor em sub-superfície. Esse fato pode estar relacionado a mudanças de fácies sedimentares no fundo marinho ou nas camadas sub-superficiais, que acarretam na penetração ou não da onda acústica (fig 23).

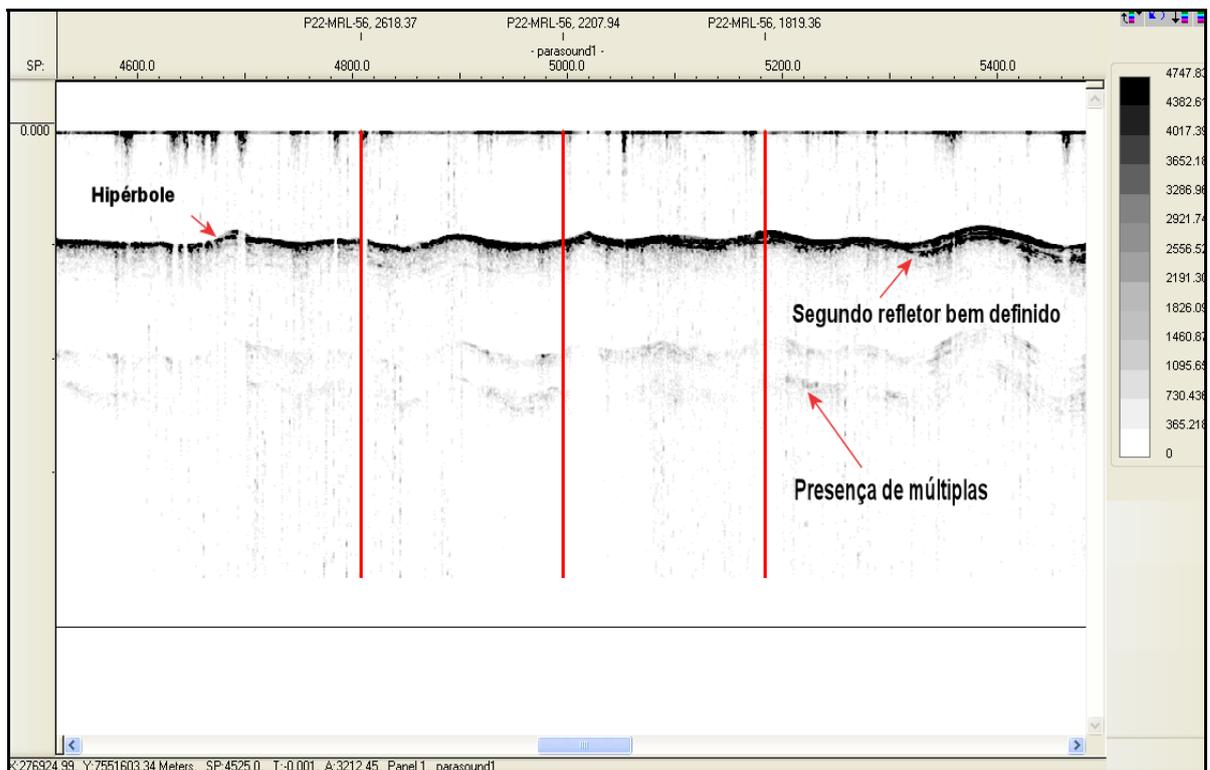


Figura 23: Sistema Paramétrico: Visualização da alternância de refletores em sub-superfície.

Nos dados Paramétricos também se observa a presença de pequenas hipérboles que no sistema chirp, não foram visualizadas. A presença dessas hipérboles pode estar relacionada ao

estreito feixe emitido pelo sistema paramétrico, o que permite uma melhor visualização de estruturas de pequeno porte sobre o fundo marinho (resolução horizontal) (fig 24).

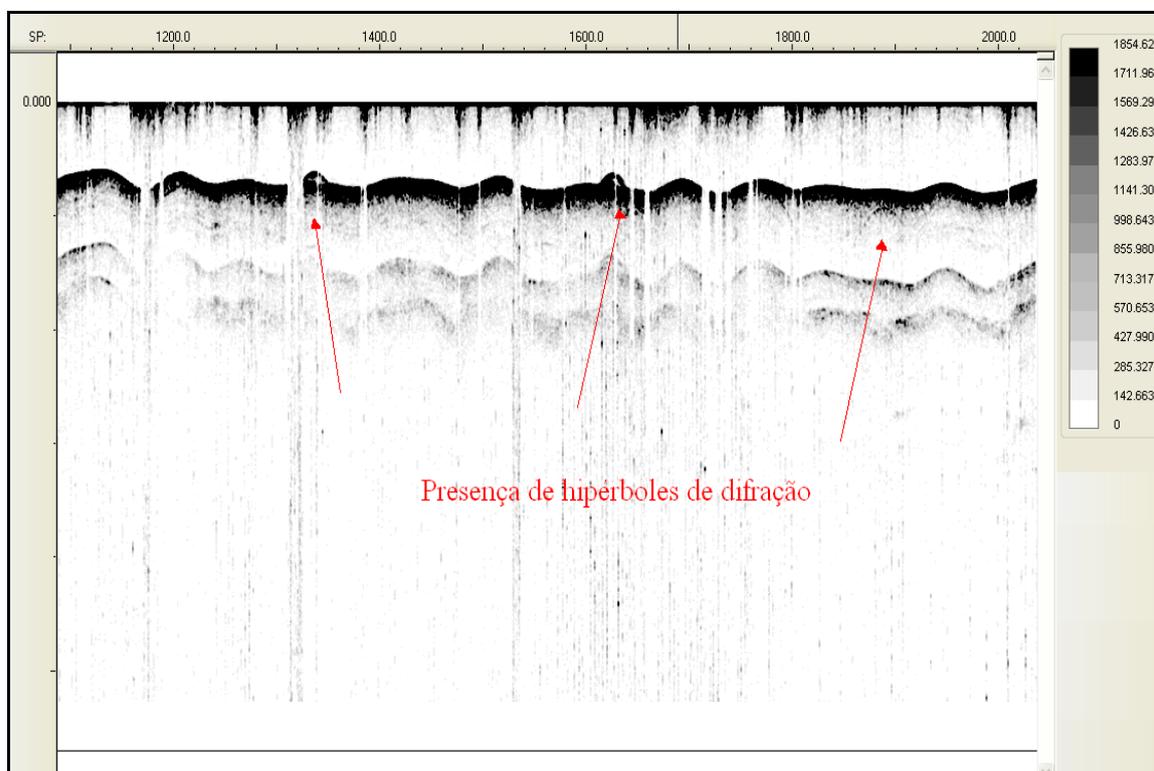


Figura 24: Sistema Paramétrico: Presença de hipérboles na superfície e em sub-superfície do fundo marinho.

Em relação à resolução vertical, o método paramétrico também se mostrou mais eficiente, pois foi possível um melhor detalhamento dos primeiros refletores em sub-superfície (fig.25), enquanto que nos dados chirp essa visualização se mostrou confusa de difícil mapeamento.

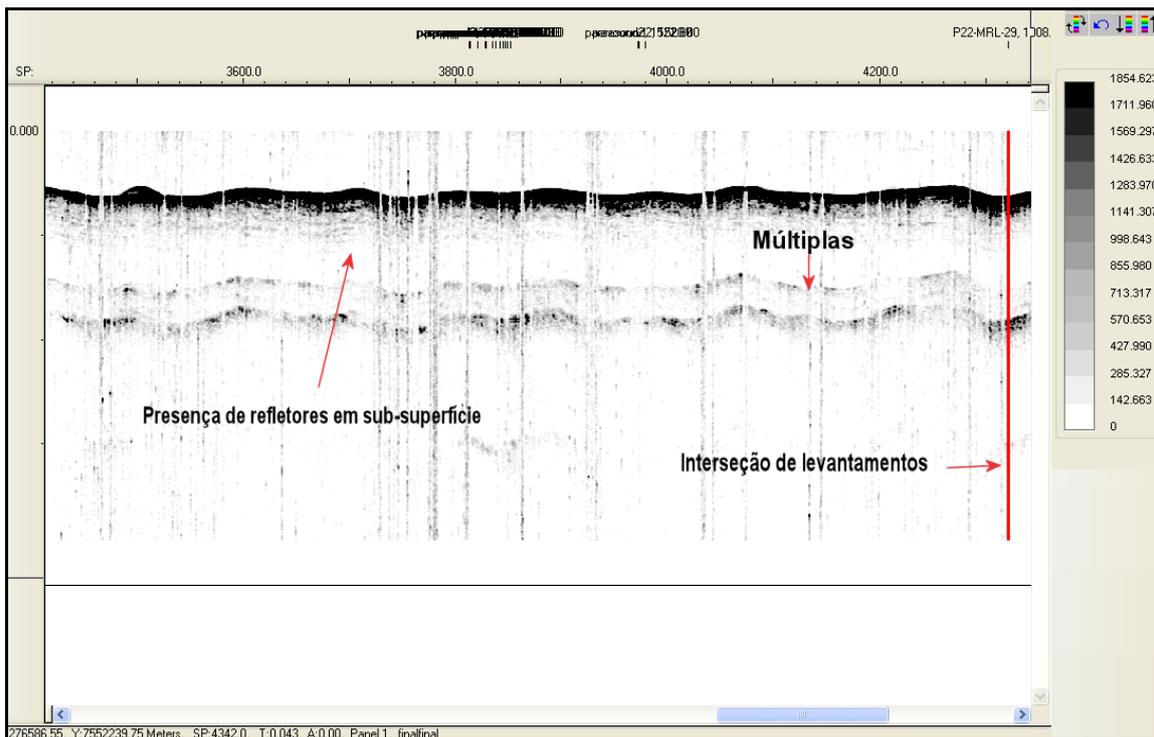


Figura 25: Sistema Paramétrico: Visualização de refletores em sub-superfície.

Entretanto os dados chirp mostraram melhores resultados em relação a penetração. De acordo com a figura 26 , foi possível a visualização de um refletor a cerca de 15ms de profundidade e nos dados Paramétricos o máximo foi de 4ms.

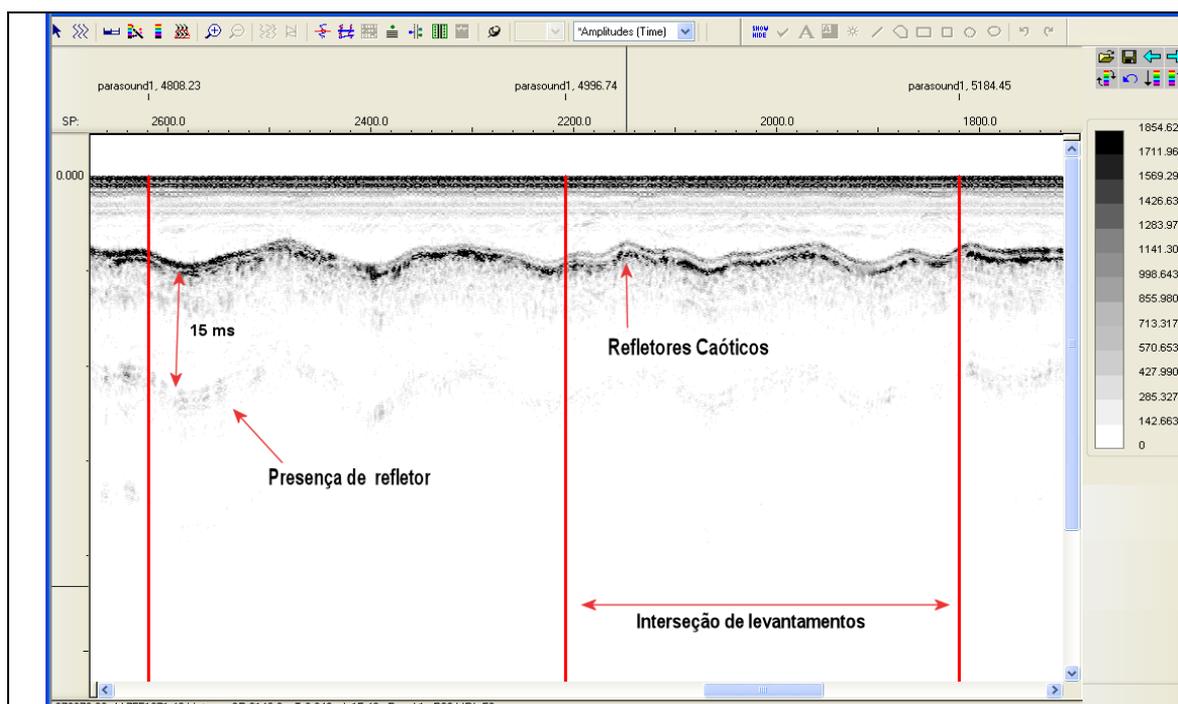


Figura 26 : Sistema Chirp: Visualização da alta penetração e visualização de refletores em sub-superfície, 15 ms.

Esse resultado também foi observado por Weber e Kuhn (1993), onde foi identificada uma melhor resolução vertical e horizontal do sinal acústico do sistema paramétrico, comparado ao sistema chirp, em regiões planas.

6.1.2 Perfil 2

Este perfil localiza-se na porção mais próxima a costa da área de levantamento, (fig 27). A porção em destaque representa o perfil a ser analisado, as linhas em vermelho correspondem ao levantamento chirp e a linha em verde correspondem ao levantamento utilizando o sistema paramétrico.

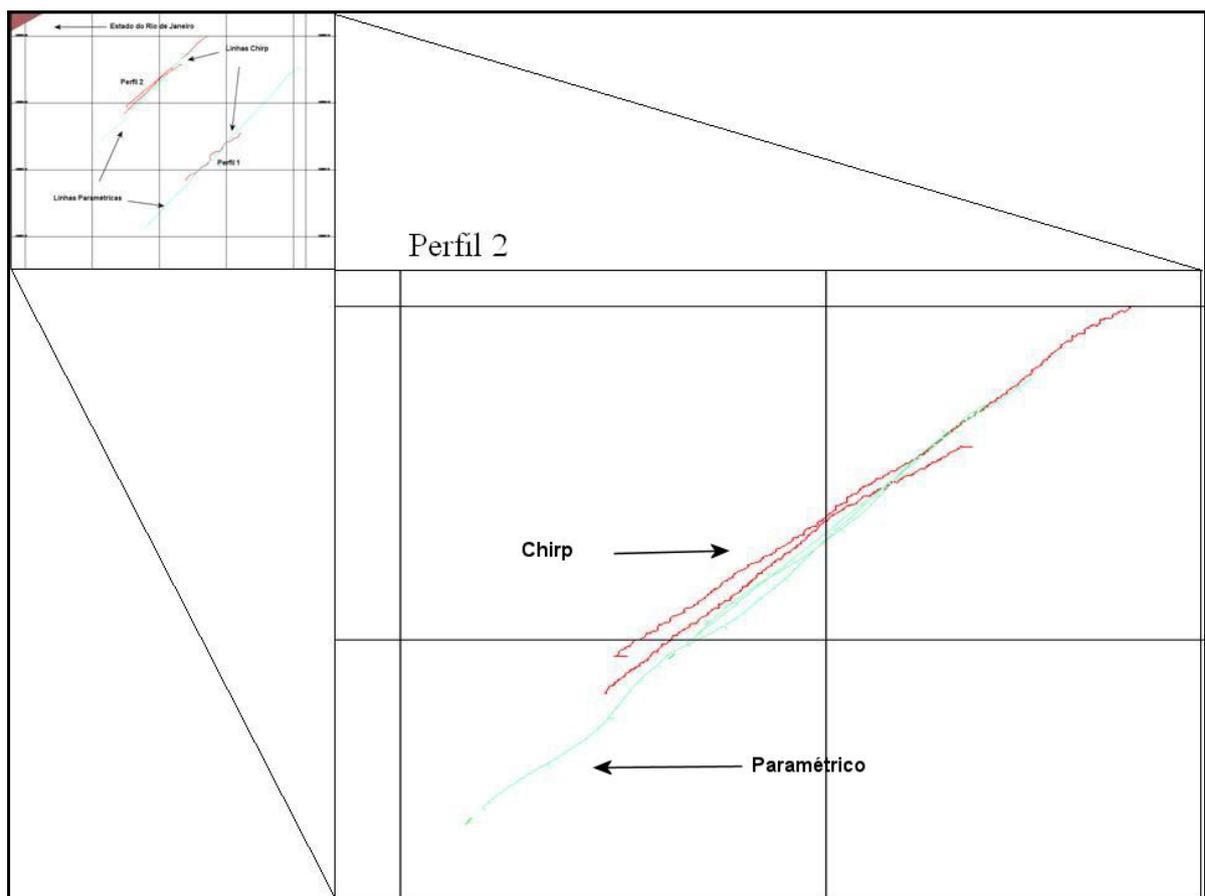


Figura 27: Área correspondente ao perfil 2.

O sistema paramétrico novamente se mostrou mais eficiente em relação à resolução vertical, onde foi possível visualizar com maior nitidez refletores em sub-superfície (fig 28).

Também foi possível observar pequenas hipérboles que podem estar relacionadas a pequenas estruturas depositadas ou enterradas sobre o fundo marinho.

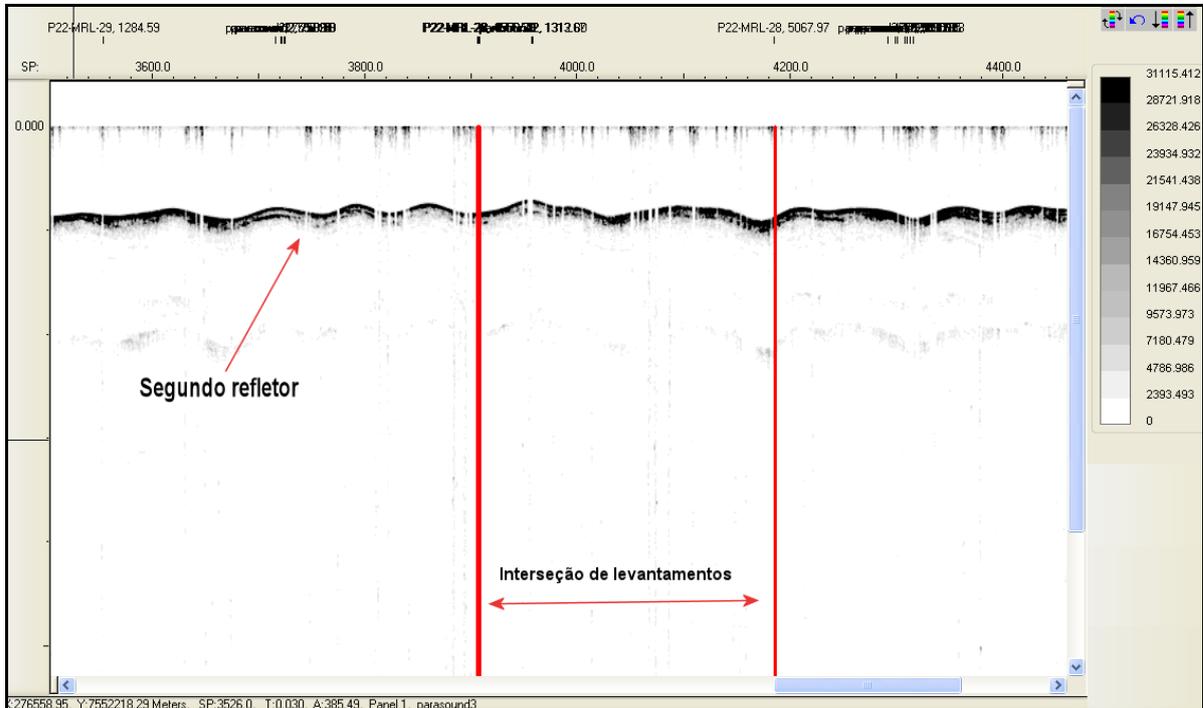


Figura 28 : Visualização de hiperboles em superfície e em sub-superfície

Devido ao pequeno ângulo do sinal acústico irradiado pelo sistema paramétrico, pode-se observar um aumento considerável da resolução espacial reduzindo assim a dispersão do sinal já na primeira camada de interação, favorecendo assim a visualização da morfologia sedimentar do local de estudo.

No sistema chirp pode-se observar novamente a baixa resolução horizontal e vertical do sinal acústico, apresentando pouca visibilidade para o mapeamento do segundo refletor em sub-superfície (fig 29).

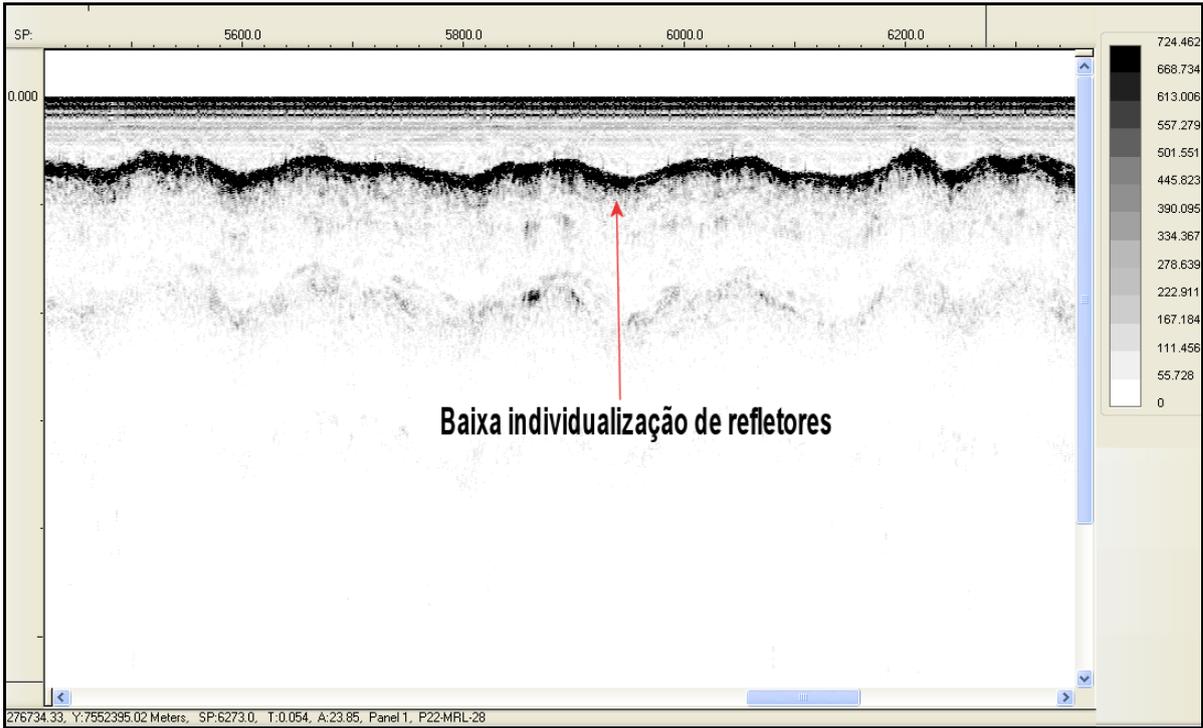


Figura 29: Sistema Chirp, baixa visualização dos refletores.

Em relação à penetração, foram visualizados refletores com cerca de 12ms no sistema chirp e no sistema paramétrico não ultrapassam de 4 ms (fig 30).

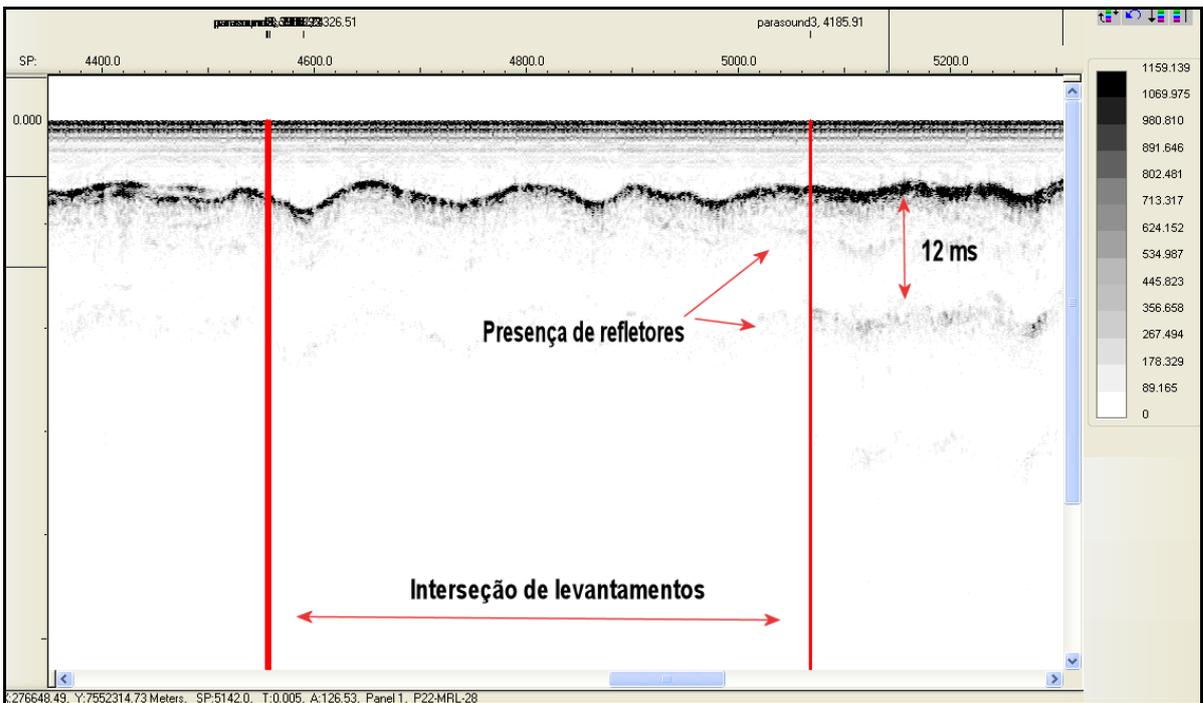


Figura 30 : Sistema chirp: Alta penetração do sinal acústico.

7 CONCLUSÃO

Após a comparação qualitativa dos perfis sísmicos adquiridos com sistemas chirp e paramétrico, pode-se constatar que o equipamento paramétrico permite um melhor reconhecimento de refletores sísmicos mais próximos ao fundo marinho (melhor resolução vertical) quando comparado ao sistema Chirp.

Nota-se que o estreito feixe emitido pela associação de duas altas frequências primárias, gerando um frequência secundária, com alta diretividade, mostra-se uma ferramenta poderosa na identificações de camadas sedimentares muito rasas.

Nos dados do sistema paramétrico também pode ser observados melhores condições de identificação de hipérboles, que podem representar pequenas estruturas no fundo marinho, em superfície e em sub-superfície. Em termos de engenharia, no caso de investigação de dutos enterrados, isso faz com que o sistema paramétrico tenha uma importância considerável, pois quanto melhor a identificação do topo da hipérbole, melhor se extrai a cota de enterramento dos dutos.

Esses resultados estão de acordo, em relação a resolução sísmica, com o trabalho de Weber E. M. & Kuhn G.(1993), que também realizaram comparações entre os dois tipos de fontes em lugares equivalentes.

Entretanto em relação à penetração, os autores supra citados também obtiveram melhores resultados no sistema paramétrico, porém o fundo marinho levantado pelos mesmos se tratava de lamas intercaladas, isso de alguma forma pode ter causado a divergência de resultados.

Os dados obtidos com o sistema Chirp apresentaram melhores resultados quando comparados com o sistema paramétrico, atingindo refletores de aproximadamente 15 ms.

Para entender melhor o comportamento de ambas as fontes e conseguir diagnosticar quais das mesmas se mostra mais eficiente seria necessário o mapeamento em áreas mais profundas e que apresentassem variações de relevo para assim poder analisar parâmetros relevantes para a se tomar a decisão de qual fonte se faz mais proveitosa. Além disso, devem ser adotados critérios mais rígidos no levantamento, mantendo maior controle dos parâmetros de aquisição, a fim de que possa ser realizada uma comparação mais quantitativa entre os dois sistemas.

REFERÊNCIAS :

ALVES, E. C., PONZI, V. R., 1984. Características morfológicosedimentares da plataforma continental e talude superior da margem continental sudeste do Brasil. XXXVIII Cong. Bras. Geologia. 1629-1642.

BADLEY, M.E. 1985. Practical Seismic Interpretation. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holanda. 257p.

DAMUTH, J.E. 1975. Echo Character of the Western Equatorial Atlantic Floor and its Relationship to the Dispersal and Distribution of Terrigenous Sediments. Marine Geology, n.18, p.17-45

DIAS, G. T. M., PALMA, J. J. C., PONZI, V. R. A. 1982 – Matéria orgânica no Quaternário da Margem Continental entre Rio de Janeiro e Guarapari. Projeto LAGEMAR-I. G./UFRJ – CENPES/PETROBRÁS. Relatório Final

GRANT, J.A. & R. SCHREIBER. 1990. Modern swathe sounding and sub-bottom profiling Technology for research applications: The Atlas Hydrosweep and Parasound Systems. Mar. Geophys. Res., 12(1-2):9-19

GRHAM, J.A. and SCHREIBER, R. (1990) - Modern Swathe Sounding and Sub-bottom Profiling Technology for Research Applications: The Atlas Hydrosweep and Parasound Systems. Marine Geophysical Researches, 12: 9-19

GROSSMANN, G. 2002. Processamento e interpretação de dados sísmicos de parasound no delta submarino do Amazonas. Niterói. 102p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica marinha) Instituto de Geociências, programa de pós graduação em geologia e geofísica marinha, UFF.

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

KOWSMANN, R. O. e COSTA, M. A. 1979. Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. CENPES. DINTEP, 55p. (Série Projeto REMAC, n.8).

MC GEE , T.M. 1995. High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes Part A: Acquiring analogue seismic signals. J. Appl. Geophys.,33(4): 271-285.

MEDWIN H. & CLAY C. S. 1997. Fundamentals of Acoustical Oceanography (Applications of Modern Acoustics), Academic Press; 1st ed., 712 p.

MOUSTIER C.2009, Fundamentals of Echo-Sounding, 51ST MULTIBEAM SONAR TRAINING COURSE

OLIVEIRA, A.M.S. & S.N.A. Brito. 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE. 586p.

SANTOS, C.A. & J.M.L. DOMINGUEZ. 2005. Sedimentação na plataforma continental entre Serra grande e Olivença . costa central da Bahia. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário . ABEQUA, 10.

SILVA, C. G., 1987. Estudo da evolução geológica e geomorfológica da região da Lagoa Feia, RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências. Tese de Mestrado. 113p.

SOUZA, L. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação da áreas submersas rasas. São Paulo. 311p. Tese de doutorado (Doutorado em Ciências, área de Oceanografia Química e Geológica

WEBER E. M. & KUHN G. 1993. Acoustical characterization of sediments by Parasound and 3.5 kHz systems: Related sedimentary processes on the southeastern Weddell Sea continental slope, Antarctica , Marine Geology, 113

WUNDERLICH, J. & G. WENDT. 2004. High-Resolution Echo-Sounding and Estimation of Sediment Properties using Nonlinear Acoustics. In: Near Surface 2004 European Meeting of environmental and Engineering Geophysics, 10..