

Universidade Federal Fluminense (UFF)
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia e Geofísica
Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e
da Terra (DOT)

Dennis Videira Fernandes

Análise da Refletividade do Sinal Acústico pelo Fundo
Marinho no Espectro das Comunicações Submarinas

Niterói

2022

Universidade Federal Fluminense (UFF)
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia e Geofísica
Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT)

Dennis Videira Fernandes

Análise da Refletividade do Sinal Acústico pelo Fundo Marinho no
Espectro das Comunicações Submarinas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre na área de concentração em Geologia e Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Arthur Ayres Neto

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F363a Fernandes, Dennis Videira
Análise da Refletividade do Sinal Acústico pelo Fundo
Marinho no Espectro das Comunicações Submarinas / Dennis
Videira Fernandes ; Cleverson Guizan Silva, orientador ;
Arthur Ayres Neto, coorientador. Niterói, 2022.
65 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Niterói, 2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2022.m.11758995777>

1. Geofísica. 2. Geoacústica. 3. Sísmica. 4.
Comunicação Submarina. 5. Produção intelectual. I. Silva,
Cleverson Guizan, orientador. II. Ayres Neto, Arthur,
coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto
de Geociências. IV. Título.

CDD -

DENNIS VIDEIRA FERNANDES

Análise da Refletividade do Sinal Acústico pelo Fundo Marinho no Espectro das Comunicações Submarinas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre na área de concentração em Geologia e Geofísica.

Aprovada em: 19 de abril de 2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Cleverton Guizan Silva, Dr. (Orientador)

UFF



Assinado de forma digital por
Arthur Ayres Neto
Dados: 2022.04.28 15:11:26
-03'00'

Prof. Arthur Ayres Neto, Dr. (Co-orientador)

UFF



Prof. Alberto Garcia de Figueiredo Jr., Dr.

UFF



Dr. Marcus Vinícius da Silva Simões
Marinha do Brasil - IEAPM

LUIZ ANTONIO PEREIRA
DE SOUZA:00695914820

Assinado de forma digital por LUIZ
ANTONIO PEREIRA DE
SOUZA:00695914820
Dados: 2022.04.28 07:58:56 -03'00'

Dr. Luiz Antônio Pereira de Souza

IPT

Agradecimentos

A Deus, pela minha vida.

À Marinha do Brasil, em especial, ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, pela oportunidade de realização deste trabalho e à Diretoria de Hidrografia e Navegação pelo apoio técnico prestado na interpretação e processamento de dados.

À Universidade Federal Fluminense por disponibilizar este curso, que em conjunto com seu corpo docente e administrativo, contribui para o desenvolvimento intelectual dos alunos e tecnológico do Brasil.

Aos Professores Arthur Ayres Neto e Cleverson Guizan Silva, pelas orientações, incentivos e ensinamentos que valorizaram meu aprendizado durante o curso e o desenvolvimento deste estudo.

Aos Comandantes Marcus Vinícius da Silva Simões e Rogério de Moraes Calazan, pelo apoio e orientações já nas primeiras fases do curso.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e dedicação para a revisão deste trabalho.

Aos meus familiares, amigos e, em especial, à minha noiva, pela compreensão, paciência e apoio incondicional prestados a mim durante todo o curso.

Resumo

O desenvolvimento de meios de comunicação subaquática eficientes, que permitam transferência de dados, de maneira segura e confiável, por longas distâncias pelo ambiente marinho tem sido um desafio em virtude dos diversos parâmetros físicos e ambientais envolvidos. A geoacústica é uma das áreas de estudo necessária à comunicação subaquática que envolve a análise da onda sonora como método de investigação e comunicação avaliando as modificações sofridas pela onda ao atravessar um determinado meio, tais como variação da velocidade, de fase, da frequência, e da amplitude do sinal (perda de energia), dentre outras, que sejam correlacionáveis com as características esperadas para o meio. Neste trabalho, como uma contribuição ao entendimento e melhoramento dessas técnicas, foram desenvolvidas análises, a partir de dados acústicos de perfiladores de sub fundo (*Sub Bottom Profile* – SBP), que envolveram a correlação da resposta acústica do fundo marinho com propriedades físicas deste fundo. Um total de 250 km de linhas sísmicas e 27 amostras de fundo foram utilizados para correlacionar as propriedades físicas com as acústicas do fundo marinho. As 27 amostras foram diretamente correlacionadas com trechos da linha sísmica onde se obteve uma equação de regressão que foi utilizada para transformar os dados sísmicos em dados físicos, visando avaliar tais informações na região que não possuía representatividade pelas amostras de fundo. O principal parâmetro de correlação foi a impedância acústica, calculada a partir dos valores de densidade e velocidade do som para os tipos sedimentares existentes na região e a amplitude do sinal acústico registrado pelo transdutor do perfilador para o primeiro refletor (envelope representativo do fundo marinho). Com esta sistemática obtiveram-se bons parâmetros de correlação ($R^2 = 0,9$, para as amostras com predominância de areia segundo a classificação de Shepard; e $R^2 = 0,9$ para as amostra litoclásticas segundo a classificação de Larssonneur), viabilizando a criação de um mapa sedimentológico a partir de dados sísmicos.

Palavras-chave: Geofísica, Geoacústica, Sísmica, Caracterização de Fundos Marinhos, Comunicação Submarina.

Abstract

The development of an efficient underwater communications network that allows data broadcast in a safe and reliable channel for long distances into the oceans has been an ongoing challenge considering the physical and environmental parameters. The geoacoustics supports a better understanding of underwater communications since it studies the sound wave propagation behavior as propagates through the medium, leading to: velocity, phase, frequency, and amplitude variation, which can be correlated with medium characteristics. In this thesis, as a small contribution to a better understanding and improvement of these tools, some correlations were acquired after a sub bottom profile (SBP) amplitude analysis to achieve, by inversion, the bottom physical properties. To develop this study 250 km of seismic investigation and 27 bottom samples were computed to associate sea bottom physical properties with acoustical properties. The 27 samples were straightly correlated to the mean amplitude value from the seismic ping to achieve an equation that was used to transform the seismic data in physical characteristics for the entire seismic profile. The main parameter used to correlate the data was the acoustic impedance, the result from bulk density and sound velocity of the medium that were identified at the site of the study, and the amplitude of the acoustic signal recorded at the transducer for the bottom envelope. The result was a good correlation between the physical and acoustic parameters ($R^2= 0,9$ for sandy materials from Shepard's classification and $R^2= 0,9$ for lithoclastic samples according to Larssonneur's classification), allowing the construction of a faces map from seismic data.

Keywords: Geophysics, Geoacoustics, Seismic, Seabed Characterization, Underwater Communications.

Lista de Figuras

Figura 1 - Perfil genérico de velocidade do som, adaptado de KUPERMAN e ROUX (2007).	5
Figura 2 – Vetor perpendicular a frente de onda representada pelas cristas de mesma fase, adaptado de KINSLER <i>et al</i> (2000)	6
Figura 3 - Ilustração das vias de comunicação entre os equipamentos, adaptado de HEIDEMANN <i>et al.</i> (2006).	13
Figura 4 - Relação entre Fator de atenuação específico e frequência para um determinado material, adaptado de SAVAGE (1965) (a); e ATTEWELLe RAMANA (1966) (b).	17
Figura 5 - Gráficos Frequência x Atenuação, adaptado de ATTEWELL e RAMANA (1966).	18
Figura 6 - Gráficos Frequência x Atenuação, adaptado de HAMILTON (1972).	19
Figura 7 - Fator k relacionado com a porosidade (a); e tamanho médio do grão em mm (b), adaptado de HAMILTON (1972).	20
Figura 8 - Esquema do levantamento sísmico convencional.....	22
Figura 9 - Esquema de investigação pelo <i>Sub-bottom Profiler (SBP)</i> . Fonte: https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1404/logs/sept24/media/fig1-hires.jpg , acessado em 03/03/2022	22
Figura 10 – Transdutor 3,5kHz (a), e Perfilador de Sub-Fundo Knudsen 3260 (b).	23
Figura 11 - Ilustração da resolução pelo critério de Rayleigh.....	23
Figura 12 – Sistema de Classificação proposta por SHEPARD (1954), adotada para a nomenclatura dos tipos de fundo neste trabalho.....	25
Figura 13 – Padrão de classificação proposta por SCHLEE (1973), aproveitando a classificação de Shepard, entretanto, abrangendo os sedimentos cascalhosos.....	26
Figura 14 - Comparação entre reflexão incoerente (a) e reflexão coerente (b), adaptado de CLAY (1966).	29
Figura 15 - Ilustração das relações da onda incidida e refletida, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).	30
Figura 16 - Comparativo entre as curvas de coeficiente de reflexão, para sedimentos não consolidados, pela teoria do fluido e teoria elástica, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).	31
Figura 17 - Gráfico da Perda de Fundo x Ângulo de Incidência para Argila e Areia com apontamento do ângulo crítico nas areias e ângulo de intromissão nas argilas, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).	32

Figura 18 - Hipóteses de espalhamentos para ondas planas incidentes, em (a) espalhamento típico de fundo marinho com pico de espalhamento na direção do receptor; em (b), elevado espalhamento com pico na direção da fonte, caracterizando o retro-espalhamento " <i>backscatter</i> ", adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).	35
Figura 19 - Localização do levantamento dos dados. Realce (em laranja) das linhas utilizadas neste trabalho, adaptado de CEPEMAR (2012).	37
Figura 20 - Mapa de localização das amostras de fundo em relação às linhas sísmicas.	39
Figura 21 - Trecho do SBP referente à Linha 009, com a identificação do fundo pelo refletor azul, obtida com o aplicativo <i>Sub Bottom Processing</i> do software Hypack.	40
Figura 22 - Correlação da impedância acústica com o tamanho médio do grão (ϕ), adaptado de AYRES NETO <i>et al.</i> (2013).	42
Figura 23 – Perfil de velocidade do som na água, obtido durante os levantamentos sísmicos e batimétricos. (a) SVP DIA 06/03/2012 – Ponto de Referência (23° 00,649' S / 042° 03,996' W); (b) SVP DIA 05/03/2012 Ponto de Referência (23° 00,592' S / 041° 50,381' W); e (c) mapa com a localização das amostragens.	44
Figura 24 - Gráfico de correlação entre a amplitude das amostras sísmicas, o teor de carbonatos nas amostras de fundo, a profundidade da região de correlação e o tipo de fundo identificado.	45
Figura 25 - Visualização da composição dos sedimentos de cada amostra em relação a amplitude do sinal refletido.	46
Figura 26 - Gráfico com o teor de sedimentos e carbonatos de cada amostra, ordenadas segundo o valor crescente de amplitude.	47
Figura 27 – Variação da amplitude em relação ao teor de areia nas amostras de fundo.	47
Figura 28 - Variação da amplitude em relação ao teor de areia (acima de 15%), nas amostras de fundo.	47
Figura 29 – Variação da amplitude em relação ao teor de argila nas amostras de fundo.	47
Figura 30 - Variação da amplitude em relação ao teor de argila (acima de 15%), nas amostras de fundo.	47
Figura 31 – Variação da amplitude em relação ao teor de silte nas amostras de fundo.	48
Figura 32 - Variação da amplitude em relação ao teor de silte (acima de 15%), nas amostras de fundo.	48
Figura 33 – Variação da amplitude em relação ao teor de cascalho nas amostras de fundo.	48

Figura 34 - Variação da amplitude em relação ao teor de cascalho (acima de 15%), nas amostras de fundo.	48
Figura 35 - Correlação entre a Amplitude do sinal e a Impedância Calculada(a) para todos os tipos de fundo identificados.	49
Figura 36 - Correlação entre a Amplitude do sinal e a Impedância Calculada(a) para as os sedimentos sem cascalho.	49
Figura 37 - Gráfico de correlação entre as Impedâncias calculadas a parti do tamanho médio do grão (ϕ) e a Amplitude do Sinal sísmico.	50
Figura 38 - Gráfico de correlação entre o Coeficiente de Reflexão de Fundo, calculado a partir da Impedância Calculada(a), e a Amplitude do Sinal.....	50
Figura 39 - Gráfico de correlação entre o Coeficiente de Reflexão de Fundo, calculado a partir da Impedância Calculada(b), e a Amplitude do Sinal.	50
Figura 40 - Correlação da Amplitude do Sinal e o Teor de Carbonatos, levando em consideração o teor de carbonato nas amostras (foram consideradas apenas as amostras que possuíam a informações sobre o teor de carbonatos).	51
Figura 41 - Correlação do teor de carbonato e o coeficiente de reflexão calculado(a), separados quanto a Classificação de Larssonneur (Litoclástico < 50% < Bioclástico).	51
Figura 42 - Resultado dos tipos de fundo obtidos a partir da correlação da amplitude do sinal acústico com os tipos de fundo através dos valores de impedância.....	53
Figura 43 - Sobreposição do levantamento elaborado neste estudo com o mapa existente na bibliografia de referência (a legenda atende ambos os mapas, considerar que o mapa comparativo está parcialmente transparente sob o mapa comparado, diminuindo a intensidade das cores de referência).	54

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tamanho e classificação dos sedimentos.	25
Tabela 2 - Classificação dos sedimentos pelos quantitativos de cada componente dada por WENTWORTH (1922).	25
Tabela 3 - Resumo das Amostras de Fundo utilizadas e suas características físicas e geográficas.....	38
Tabela 4 - Amplitude média do sinal refletido e correlação com as amostras de fundo.....	41
Tabela 5 - Impedância calculada para os tipos de fundo identificados na região de estudo.....	42
Tabela 6 - Tabela resumo das impedâncias calculadas(b) em relação ao tamanho médio do grão (φ).	43
Tabela 7 - Faixa de valores das Impedâncias correlacionadas aos Tipos de Fundo.....	52

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivo do Trabalho e expectativas.....	2
2.	REVISÃO SOBRE ACÚSTICA SUBMARINA.....	2
2.1.	Ondas Acústicas	3
2.2.	Propagação da Onda	4
2.3.	Acústica na Comunicação Submarina	10
2.4.	Atenuação	13
2.5.	Efeitos da Atenuação na Propagação de Ondas Acústicas Submarinas.....	15
3.	MÉTODO SÍSMICO	21
4.	INTERAÇÃO DA ONDA COM O FUNDO MARINHO	24
4.1.	Granulometria e Porosidade	24
4.2.	Impedância Acústica	26
4.3.	Densidade com Quadrado da Velocidade	28
4.4.	Razão Velocidade na Água pela Velocidade no Sedimento	28
4.5.	Coeficiente de Reflexão e Perdas no Fundo.....	28
4.6.	Dispersão.....	32
4.7.	Interação do fundo na comunicação submarina.....	35
5.	METODOLOGIA.....	36
5.1.	Origem dos Dados	36
5.2.	Tratamento dos Dados.....	40
6.	RESULTADOS	44
6.1.	Considerações sobre a amplitude e fatores geográficos e batimétricos	45
6.2.	Considerações sobre a amplitude e propriedades físicas do fundo	45
6.3.	Correlação das propriedades físicas com as propriedades acústicas	49
6.4.	Extrapolação dos dados e correlação com o tipo de fundo	52
7.	DISCUSSÃO	54
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
9.	CONCLUSÃO	58
9.1.	Proposta para Trabalhos Futuros.....	58
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de ampliar o conhecimento sobre o ambiente marinho é cada vez mais importante, seja pela ampliação da fronteira de exploração de recursos naturais quanto para o entendimento das interferências globais regida pelo oceano em simbiose com o continente e atmosfera terrestre. Neste cenário, o desenvolvimento de estudos e pesquisas realizadas nessas áreas do conhecimento são de significativa importância para melhor entender o funcionamento de todas as interações do oceano com a atividade humana.

Um dos temas mais atuais, que corrobora esta colocação, seria o programa de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), que recentemente encaminhou uma proposta para incremento do limite marítimo exterior à Comissão de Limites de Plataforma Continental, órgão vinculado a ONU (Organização das Nações Unidas), o qual aprovou acréscimo de uma parcela significativa à plataforma original na região sul do Brasil. Outros protocolos de acréscimo de plataforma na região meridional oriental e equatorial brasileira ainda estão em análise, sendo todos subsidiados por parâmetros morfológicos, geológicos e geofísicos do fundo marinho.

Outro assunto que interfere diretamente na capacidade de atuação na exploração submarina, é a necessidade de desenvolver meios de comunicação subaquática eficientes, que permitam transferência de dados, de maneira segura e confiável, por longas distâncias através do ambiente marinho. A grandiosidade desse ambiente e a dificuldade de aquisição de dados de maneira direta inserem significativos desafios no avanço da exploração e no mapeamento dos oceanos, principalmente nas regiões mais profundas.

Uma das metodologias mais difundidas para a exploração oceânica é a geoacústica, devido principalmente a baixa absorção do meio para este tipo de sinal. Essa técnica utiliza ondas sonoras e sua interação com a água, fundo e subfundo marinho, e até com os organismos que ali habitam, para obter parâmetros que permitam o reconhecimento de características físicas e químicas desse ambiente.

A análise da onda sonora como método de investigação e comunicação visa avaliar as modificações sofridas pela onda ao atravessar um determinado meio, tais como: variações de velocidade, de fase, da frequência, e da amplitude do sinal (perda de

energia), dentre outras, que sejam correlacionáveis com as características esperadas para o meio.

1.1. Objetivo do Trabalho e expectativas

Neste trabalho, foram avaliados fatores que interferem na perda de energia da onda ao interagir com o fundo marinho bem como seu efeito no comportamento do campo de onda a partir de comparativos entre o sinal emitido e captado, de maneira a contribuir com a comunidade científica no desenvolvimento de técnicas, cada vez mais eficientes, de investigações e reconhecimento submarino pela geofísica.

Inicialmente foi elaborada uma breve revisão bibliográfica sobre o tema de acústica submarina com foco na atenuação do sinal acústico pelas camadas sedimentares do fundo e sub-fundo oceânico. Posteriormente, foram trazidos à tona levantamentos obtidos em expedições marítimas cujos levantamentos resultaram em dados de sísmica rasa coletados por perfilador do tipo *chirp* numa região da plataforma continental do Estado do Rio de Janeiro. A análise destes dados foi desenvolvida de acordo com as técnicas previstas na literatura e trabalhos anteriores, visando identificação e caracterização da parcela atenuada pelo fundo sedimentar.

A revisão que trata deste trabalho teve como foco a interação do sinal acústico com o fundo marinho e suas peculiaridades, na faixa de frequência entre 1-15 kHz, abordando estudos empíricos já consolidados na literatura e outros métodos com vasta utilização de cálculos para previsão e avaliação de tais interações a partir de modelos.

O resultado geral esperado para o estudo é a capacidade de caracterizar o fundo submarino a partir de padrão de atenuação e reflexão do sinal acústico ao interagir com este ambiente, conforme parâmetros já existentes na literatura além de fornecer maior confiabilidade destes parâmetros ao comparar a caracterização por esta técnica com sondagens *in situ* e mapas estratigráficos

Com tais resultados, visa-se a contribuição para a comunidade científica na fronteira da comunicação subaquática e suas interferências com as propriedades do meio.

2. REVISÃO SOBRE ACÚSTICA SUBMARINA

Na acústica, são estudadas as pressões criadas pelas ondas sonoras no meio pelo qual a onda se desloca. O som é o resultado de vibrações que se espalham no meio após uma perturbação provocada por uma “força” externa, capaz de produzir tais vibrações no meio com energia suficiente que ocasione perturbações contínuas que passam de uma molécula para outra. O som é a transmissão desta energia (perturbação) em forma de onda mecânica (HANSEN, 2014).

No ambiente submarino, este fenômeno é de extrema relevância, pois a partir dele foram desenvolvidas tecnologias capazes de perceber e identificar os campos de pressão atuantes num determinado ponto, viabilizando a correlação do campo de onda com a interferência sofrida pelo sinal acústico ao longo de sua trajetória.

2.1. Ondas Acústicas

O estudo de ondas acústicas em ambientes submarinos rasos é datado desde 1948, com o trabalho de PEKERIS (1948). Segundo KATSNELSON, PETNIKOV e VALERY (2012), apesar de não ser o primeiro estudo sobre acústica submarina, disciplina intensificada durante a Segunda Guerra Mundial, este é um dos trabalhos pioneiros sobre o assunto no pós Guerra. Quanto à utilização de ondas acústicas em terra, tais metodologias já datavam dos anos 20, com a indústria do petróleo americana se utilizando de técnicas de refração sísmica, que permitia a localização de camadas específicas na sub-superfície a partir de ondas acústicas provenientes da detonação de dinamites (BAPTISTA NETO; ABELIN PONZI; SICHEL, 2004).

A propagação de ondas acústicas é interpretada por um sistema de equações matemáticas diferenciais, que traduzem o deslocamento da frente de onda no espaço e no tempo de acordo com propriedades físicas do material pelo qual a onda se propaga. Tal equação é obtida a partir das teorias de conservação de energia e de conservação da massa ou teoria da conservação da quantidade de movimento, que segundo ilustrado por CUNHA (1997), assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2(x, y, z)} \frac{\partial^2 u(x, y, z, t)}{\partial t^2} = f(t)\delta(x - x_s)\delta(y - y_s)\delta(z - z_s)$$

Onde, u é o campo de pressão, c o campo de velocidades e $f(t)$ a amplitude da fonte em função do tempo.

Diversas metodologias de cálculo podem ser utilizadas para resolver estes sistemas de equações, os quais, dependendo da aplicabilidade e das condições de estudo podem ser simplificados quanto às condições de contorno e às propriedades físicas do material. No caso mostrado acima, que representa a equação da onda acústica levando em consideração apenas as propriedades de velocidade de propagação do meio, situação que não contempla as características de um meio elástico, ou seja, não foram considerados os efeitos da componente cisalhante da onda (JOSIAS, 2009). Para o caso geral da onda elástica, teríamos a formulação do tipo identificado abaixo, dado por BARTOLO (2010), contemplando outras propriedades do material:

$$\rho \partial_t v_i - \partial_j \tau_{ij} = f_i$$

$$\partial_t \tau_{ij} - c_{ijkl} \partial_l v_k = -\partial_t g_{ij}$$

Onde a equação da fonte é dada por:

$$g_{ij}(\vec{r}, t) = c_{ijkl}(\vec{r}) h_{kl}(\vec{r}, t)$$

Sendo, f_i a densidade de força externa aplicada, ρ a densidade de massa, \vec{v} a velocidade de deslocamento e c_{ijkl} o tensor de elasticidade.

Ainda seria possível incluir nesta formulação as características do comportamento visco-elástico do meio, levando em conta a poro-pressão existente entre a matriz sólida dos grãos e o fluido de preenchimento dos espaços entre grãos. Neste caso assume-se que o fluido de preenchimento é compressível e pode se deslocar pelos poros, resultando em fricção. Tal movimento relativo do fluido em relação aos grãos é regido pela Lei de Poisseuille, dentro de um determinado limite de frequência que depende da viscosidade cinemática do fluido e do tamanho dos poros (BIOT, 1956).

2.2. Propagação da Onda

2.2.1. Ambiente marinho

Uma das primeiras contribuições para o desenvolvimento da acústica submarina foi a descoberta do canal de som profundo (Deep Sound Channel – DSC), ocasionado pela variação da temperatura da água oceânica com a profundidade,

conforme ilustrado na Figura 1, refletindo a tendência da variação da velocidade do som diretamente com a temperatura e a pressão hidrostática. Atualmente, podemos calcular a velocidade do som na água a partir da temperatura, salinidade e pressão hidrostática. Neste caso, percebe-se que a onda sonora ao ser transmitida pode ser capturada pelo canal, o qual se apresenta em uma determinada profundidade (que varia em função da latitude local) e possui um gradiente de velocidade nas bordas superiores e inferiores em relação ao seu eixo. A mistura próxima à superfície pode levar a uma região de isovelocidades, pois a temperatura da água se mantém mesmo com o aumento da profundidade, criando o “duto de superfície”, no qual a velocidade varia apenas em função da pressão. Abaixo dessa região, tanto a temperatura quanto a velocidade caem com a profundidade. Em regiões polares, a água mais fria está na superfície, o que ocasiona maior velocidade do som nessa região, e diminui com a profundidade, esta situação faz com que o canal de som profundo fique mais superficial nas regiões polares (KUPERMAN; ROUX, 2007).

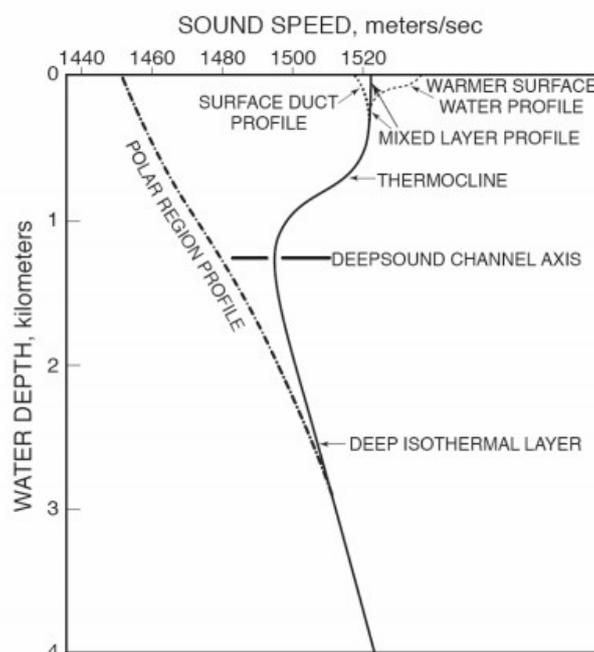


Figura 1 - Perfil genérico de velocidade do som, adaptado de KUPERMAN e ROUX (2007).

Este conceito é de extrema importância para os cálculos da propagação do som na água, visto que estas situações podem representar condições de contorno nos cálculos ou limites nos modelos computacionais além de serem alternativas de caminho para

frente de onda, alterando o trajeto realizado por ela devido às condições de refração e reflexão.

2.2.2. Fenômeno da Propagação

Uma fonte sonora pontual tende a emitir um pulso que se propaga em todas as direções no meio (omnidirecional), tendo seu comportamento descrito fisicamente por uma esfera que tem seu raio aumentado ao longo do tempo. Mesmo neste caso, para uma região afastada da origem, a frente de onda torna-se praticamente plana, conforme a Figura 2, devido a sua característica divergente, o que permite nestas distâncias o tratamento matemático como ondas planas, (KINSLER *et al*, 2000), simplificando as considerações de cálculo para as variáveis acústicas, como por exemplo, a Impedância.

Um dos fatores de maior relevância na propagação do som está correlacionado com a variação da velocidade de propagação do meio. Esta característica interfere diretamente na direção de propagação da onda, que pode sofrer desvios quando o meio se torna heterogêneo. Deste modo uma das técnicas de se estudar a propagação do som se dá por traçados de raio. Tal técnica permite descrições mais simples do comportamento da propagação (KINSLER *et al*, 2000), a partir de métodos assintóticos.

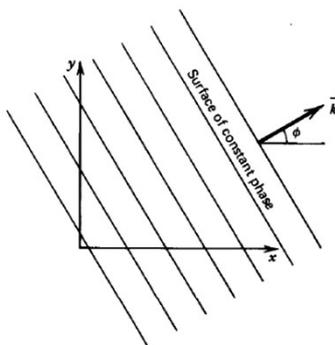


Figura 2 – Vetor perpendicular a frente de onda representada pelas cristas de mesma fase, adaptado de KINSLER *et al* (2000)

Uma das metodologias para o cálculo pela técnica do traçado de raios é utilizar a Equação Eikonal (Equação Diferencial Parcial não Linear) como solução para a equação da onda, que, sob determinadas condições, permite substituir a frente de onda por uma família de raios (transversais à frente de onda) e definir um novo sistema de coordenadas para o vetor que representa cada raio. Neste caso o sistema se resume a uma equação diferencial ordinária linear, conforme demonstrado por KINSLER *et al* (2000):

$$\nabla\Gamma = n\hat{s}$$

Onde, $n = c_0/c$ é o Índice de refração, e, \hat{s} é o vetor unitário da direção da propagação, para a Equação Eikonal, e:

$$\frac{1}{I} \frac{dI}{ds} = -\nabla \cdot \hat{s}$$

Onde, $I = nA^2/2\rho_0c_0$, cujas distâncias da fonte $\gg \lambda$, para a Equação Transporte.

Segundo CARCIONE; HERMAN e TEN KROODE (2002), estas equações, quando compatibilizadas com as devidas condições iniciais, determinam o tempo de viagem e a amplitude da onda de forma única ao longo de sua trajetória, permitindo ao método solucionar a equação diferencial de primeira ordem com a Equação Eikonal. Este método se traduz em construir curvas as quais suas derivadas parciais se reduzam a equações diferenciais ordinárias, sendo que tais curvas têm origem na fonte e as derivadas traduzem as funções de posição, mesmo em meios com variação de velocidade.

Esta metodologia resulta num conceito importante para a geofísica, identificado pela vagarosidade. Este conceito está relacionado à função que soluciona a Equação Transporte, e representa o tamanho do vetor tangente a direção de deslocamento da onda, neste caso o Raio.

Faz-se necessário ainda o estudo da interação entre estes raios, pelo fenômeno da intensidade acústica. Tal interação é representada pela interseção de raios não adjacentes em alguma região afastada da fonte, ocasionada entre um raio refletido e o raio direto. Esta situação pode gerar dois tipos de interação, uma que somam raios de mesma fase (Soma Coerente) e outra que somam raios de fases diferentes (Soma Incoerente) (KINSLER *et al*, 2000).

Este fenômeno é de fundamental importância em águas rasas, pois a interação entre as bordas (reflexão de sinal na superfície da água e no fundo marinho) pode interferir no campo de ondas original, além de serem captados pelo transdutor. Neste caso, é importante prever as características da fase destes raios, visando sua diferenciação. Conforme identificado por XAVIER *et al*. (2015), o fundo do mar é uma das fronteiras mais importantes na propagação acústica, tanto pelo seu relevo quanto

pelas suas propriedades geoacústicas, pois elas afetam as transmissões com perdas na intensidade do sinal e mudança de direção na propagação.

O estudo destas circunstâncias visa melhor entendimento do fenômeno que ocorre no fundo marinho em águas rasas ao ser “iluminado” pela frente de onda, pois nesta região existe significativa interação de ondas incidentes com ondas refletidas e espalhadas. O conceito de águas rasas é definido por KATSNELSON, PETNIKOV e VALERY (2012) como a região a partir da zona de surf até o fim da plataforma continental (inclusive a região do talude até aproximadamente 500 metros de profundidade), onde sistemas acústicos e sonares operam entre 50 Hz e 5kHz.

2.2.3. Modelos de Cálculo

Os principais modelos matemáticos para descrever a propagação da onda no meio variam de acordo com as considerações de cálculo bem como a precisão necessária do modelo adotado. Tais hipóteses vão considerar, em maior ou menor grau, as condicionantes que interferem com a propagação da onda em determinado meio. Estas condicionantes são regidas, principalmente, pelo comportamento do meio durante a passagem da onda, ou seja, o quanto a forma e a composição do meio podem ou não gerar respostas físicas (ou químicas) pela interação com a onda acústica.

Os principais modelos de cálculo são: modelo de fluido, modelo elástico e modelo visco-elástico.

Para o modelo de fluido, o fundo (camada sedimentar inicial de interface com a água) é tratado como um fluido para as considerações de cálculos quanto às constantes físicas, sendo interpretado como um meio contínuo. Não há distinção entre as propriedades físicas do líquido e dos grãos, apenas as propriedades médias obtidas pelo fluido resultante de ambos. Neste modelo, a equação que governa a propagação acústica é a equação de Navier-Stokes linearizada, utilizando-se apenas da pressão da frente de onda acústica como perturbação do meio capaz de produzir tensão (JACKSON; RICHARDSON, 2007).

Este modelo não atende os comportamentos dos meios que apresentem qualquer grau de consolidação (cimentação), onde a matriz granular é capaz de transmitir ondas transversais com velocidade superior às ondas compressionais na água.

No modelo elástico, para traduzir o comportamento do meio pela passagem da onda acústica, a Lei de Hooke é o ponto de partida, criando correlações com a tensão

aplicada pela passagem da frente de onda a qual ocasiona uma deformação proporcional e linear aos materiais componentes do meio em função de suas constantes elásticas. Neste modelo, os parâmetros que são adicionados em relação à teoria do fluido, são velocidade transversal da onda e a atenuação (JACKSON; RICHARDSON, 2007).

De maneira simplificada, as propostas acima visam obter parâmetros físicos do meio que possam ser identificados a partir da Lei de Hook, conforme equação abaixo, que satisfazem as respostas elásticas para meios porosos saturados (HAMILTON, 1971). Conseqüentemente, o cálculo das constantes elásticas dependem da precisão dos valores obtidos para a velocidade compressional, densidade e porosidade do meio (HAMILTON, 1969b).

$$V_p = \left(\frac{k + 4/3\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$V_s = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$$

Destas equações, é possível identificar algumas constantes elásticas importantes para os cálculos que compreendem o fenômeno, sendo as principais constantes:

Módulo de Compressão ou Volumétrico (bulk modulus) – k

Módulo de cisalhamento ou de rigidez - μ

Densidade - ρ

Razão de Poisson – ν , onde:

$$\nu = \frac{3k - \rho V_p^2}{3k + \rho V_p^2}$$

Constante de Lamé – λ e μ , onde:

$$\lambda = k - 2/3\mu$$

No modelo visco-elástico, também conhecido pelo modelo de Biot, é utilizada uma maior quantidade de parâmetros para descrever o meio, cujo comportamento é representado pela diferença de resposta da fase líquida e da fase sólida quando

perturbados pela frente de onda. Neste caso, serão levados em conta a capacidade do fluido percolar pelos poros da matriz sólida além da deformação intrínseca a própria matriz sólida. Propriedades como viscosidade do fluido, porosidade dos sedimentos, tamanho do grão e módulos de volume e rigidez serão os protagonistas deste modelo.

2.3. Acústica na Comunicação Submarina

As ondas sonoras se propagam na água a uma velocidade de aproximadamente 1.500m/s, e sofrem influência de diversos fatores, tanto no parâmetro velocidade quanto na frequência, amplitude e fase do sinal.

Os efeitos da propagação de ondas que mais influenciam na comunicação por ondas acústicas são: Multicaminhamento do sinal, que acaba por refletir nas interfaces da água com o fundo, da água com o ar, e camadas de águas com propriedades físicas diferentes, que possibilitam a chegada do mesmo sinal mais de uma vez no receptor; Dispersão do sinal acústico, que ocasiona a perda de potência do sinal ao se afastar da fonte, identificando a influência da atenuação do sinal no meio; e o Efeito Doppler, que causa elevada influência na transmissão considerando a baixa velocidade da onda acústica na água (quando comparada com outros meios de comunicação aéreas – que utilizam sinais de rádio frequência), bem como a sua elevada variabilidade com a profundidade, temperatura e salinidade (GUSSEN *et al.*, 2016 e LIU; ZHOU; CUI, 2008).

Apesar destas limitações, as ondas acústicas ainda são mais eficientes que as ondas eletromagnéticas, utilizadas nos sistemas de comunicação aérea/terrestre, pois esta última apresenta uma propagação diminuta na água.

A investigação submarina está aliada ao desenvolvimento de métodos que viabilizem a obtenção de dados indiretos e de baixo custo que promovam um melhor conhecimento das características do meio. Tendo-se como principal necessidade para a capacidade exploratória uma comunicação eficiente entre equipamentos e pessoas, onde sejam transmitidos dados com qualidade, velocidade e segurança, diversos sistemas estão sendo explorados para o desenvolvimento destas tecnologias, com objetivo de se estabelecer um canal subaquático de comunicação independente de conexões físicas, seja ele de curto ou longo alcance, fixo ou móvel.

As aplicações destas ferramentas vão desde a criação de uma rede de sensoriamento subaquática (*Underwater Sensor Network* - UWSN) até o controle de

veículos autônomos, aceitando o desafio de aumentar a capacidade de transmissão de dados entre sistemas espalhados pelo oceano (LIU; ZHOU; CUI, 2008, GUSSEN *et al.*, 2016 e FURQAN ALI *et al.*, 2019).

De acordo com STOJANOVIC e PREISIG (2009), os sistemas acústicos de comunicação submarina podem operar nas frequências entre 10 e 15 kHz, permitindo uma banda de apenas 5kHz para a comunicação destes sistemas. Em SONG e BADIEY (2012) um range de frequência entre 10 e 32 kHz foi utilizado para um experimento, que visava um aumento da banda de comunicação, valendo-se de uma sistemática de multibanda, onde a faixas de frequência foram divididas em 4 sub-faixas de 4,5 kHz e atingidas as velocidades de 16 e 32 kbits/s.

Em LOUZA e DEFERRARI (2020) conseguiu-se estabelecer comunicação entre uma fonte acústica e um hidrofone separados por 600 m de distância a uma profundidade entre 4 e 10 m, cujo sinal acústico transmitiu uma mensagem de 4 trechos consecutivos de 511 bits cada, a uma frequência central de 7,5 kHz e uma banda de 3,0 kHz. A mensagem foi transmitida dentro dos parâmetros previstos no experimento e com baixo índice de erro.

No âmbito da navegação submarina, tanto no meio militar quanto no meio civil, o avanço tecnológico da comunicação submarina visa incremento de segurança e eficiência para os meios e equipamentos. Na tentativa de contornar a ausência de sinal GPS neste meio, situação que torna a navegação mais difícil, pois é necessária a parametrização de posicionamento por métodos acústicos, já que mesmo os sistemas inerciais de navegação se utilizam de dados atualizados de posicionamento pelo GPS para diminuir os erros gerados por seus cálculos.

Os métodos atuais de posicionamento submarino, que não dependem diretamente de sinais GPS, tais como os sistemas inerciais de navegação, fazem uso de medidas acústicas, pelo tempo de viagem da onda acústica, para estimar distâncias, ou, se conectam (acusticamente) a pontos fixos, cujas posições são conhecidas, na superfície ou no fundo do mar para se orientarem com maior precisão (VIO, 2017).

Apesar da metodologia parecer simples, algumas dificuldades são percebidas nestes sistemas, sejam dificuldades estruturais, como a necessidade de instalar, operar e manter os equipamentos no ambiente marinho. Uma dessas dificuldades estão correlacionadas aos equipamentos instalados no fundo do mar, que necessitam de

sistemas alimentados por baterias e estanqueidade compatível. Outras, estão relacionadas à comunicação em si, uma vez que a onda acústica apresenta baixa velocidade, em comparação às ondas eletromagnéticas, implicando em baixa capacidade de transmissão de dados, além das dificuldades relacionadas à propagação da onda no meio, relativamente anisotrópico, dinâmico e que apresenta significativas interferências no sinal por atenuação, multicaminhamento e ruídos.

Entretanto, considerando as tecnologias disponíveis, as dificuldades vêm sendo superadas, pois já é possível operar veículos submarinos autônomos (UUV – *Unmanned Underwater Vehicle*) por longos períodos submersos sem que sejam perdidos os parâmetros de posicionamento. Em VIO (2017), foi desenvolvido um projeto que permite a consideração do multicaminhamento e refração das ondas sonoras na estimativa das distâncias entre o UUV e os pontos de controle em águas rasas a partir de modems direcionais. O projeto resultou em um algoritmo que usa a técnica do Traçado de Raios para modelar o ambiente e uma rotina interativa para ajustar as medidas obtidas com as previsões sintéticas, resultando na atualização em tempo real da posição do equipamento.

Uma interessante aplicação destes sistemas é a pesquisa desenvolvida sob as espessas camadas de gelo nas regiões polares. Segundo FREITAG *et al.* (2015), os sistemas autônomos representam uma das melhores plataformas para amostragens do oceano nas áreas cobertas por gelo. Tais possibilidades incrementam as áreas a serem exploradas e minimizam os riscos envolvidos, principalmente quando se consegue substituir a atuação direta do homem em ambientes hostis e imprevisíveis.

As atuações destes equipamentos autônomos estão, geralmente, amparadas por redes de sensores fixos no fundo do mar e/ou em boias que se comunicam com o submergível. Estes sensores enviam e recebem informações para o submergível durante janelas de tempo pré-determinadas, que atualizam seu sistema de posicionamento, considerando que a posição das boias está vinculada à rede de GPS e a dos sensores fixados no fundo do mar não se altera após a implantação, a Figura 3 resume algumas aplicações dessa rede de comunicação acústica.

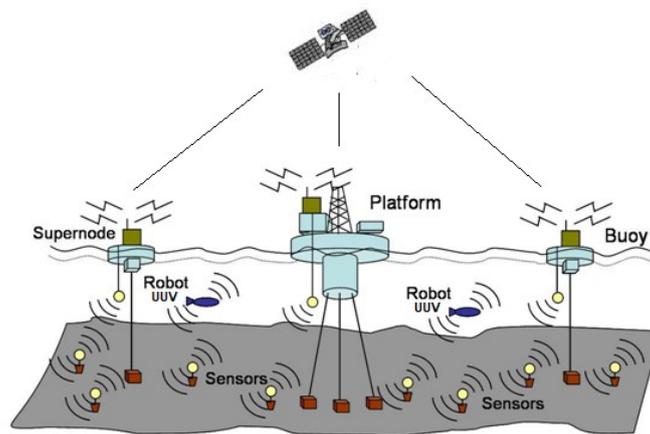


Figura 3 - Ilustração das vias de comunicação entre os equipamentos, adaptado de HEIDEMANN *et al.* (2006).

No cenário militar, os veículos autônomos também desempenham um importante papel, atualmente sua confiabilidade atingiu a maturidade e sua aplicação minimiza riscos a vidas humanas. Aplicados nas medidas de antiminagem (MCM – Mine Encounter Measures) e no rápido reconhecimento de ambientes de crise (REA – Rapid Environmental Assessment), o desenvolvimento de programas, liderados por instituições internacionais de apoio mútuo e global, desenvolvem projetos de aplicação destes sistemas autônomos para além de suas funções de pesquisa. Dentre elas o monitoramento oceânico e aplicações de táticas militares marítimas que visam desenvolver, dentre outras, proteção de portos, controle de navegação, patrulhamento de regiões sensíveis e preparação de locais de crises e batalhas (BOVIO; CECCHI; BARALLI, 2006, HAGEN *et al.*, 2008).

2.4. Atenuação

A atenuação acústica deve ser entendida como uma consequência da transmissão de ondas acústicas em um determinado material. Segundo GORGAS *et al.* (2002), a atenuação efetiva é composta por duas parcelas, uma intrínseca ao material que é o resultado da conversão da energia elástica em calor e a outra proveniente da atenuação por espalhamento, relativa às propriedades reflexivas e refrativas das ondas quando interagem com partículas ou em interfaces de materiais diferentes.

A atenuação proveniente da interação da onda com o material é dependente da frequência da onda e das propriedades do material, tais como, porosidade, tamanho do grão, forma do grão. Quando a passagem da onda modifica as características físicas do material, tornam a viscosidade do fluido e a permeabilidade dos poros fatores

dominantes na atenuação, pois a capacidade do fluido se mover em relação ao mineral indica uma condição viscoelástica (HAMILTON, 1972).

Por outro lado, se este movimento não ocorre, ou seja, o deslocamento entre fluido e mineral pode ser negligenciado, o modelo pode ser interpretado como quase elástico e a atenuação ocorre quase que inteiramente pela fricção entre os grãos do mineral. Uma caracterização semelhante também é indicada por MC DONAL *et al.* (1958), que conclui que a ausência de dispersão em formações rochosas consolidadas não estão sujeitas a características visco-elásticas, enquanto materiais não consolidados em zonas de subsaturação apresentam comportamento visco-elástico.

Ainda segundo HAMILTON (1972), a viscosidade da água nos poros e a permeabilidade do sedimento podem ser fatores de grande importância para a dispersão da velocidade nos modelos viscoelásticos, tais movimentos da água em relação à matriz mineral depende de fatores como a frequência da onda. Conseqüentemente será percebida uma significativa variabilidade da atenuação mesmo para uma pequena variação das características entre os sedimentos, como é o caso da presença de argila nos poros que diminui a permeabilidade.

De maneira complementar às considerações acima, conclui-se que estes comportamentos influenciam os modelos utilizados para os cálculos da atenuação e demais fenômenos da propagação além de estarem submetidos as seguintes condicionantes: o tamanho da onda, que deve ser muito maior que o tamanho do grão, de maneira a evitar o efeito de espalhamento Rayleigh; o meio poroso e não cimentado; o meio totalmente saturado com água (HAMILTON, 1972).

Quanto à parcela dos cálculos para a atenuação da onda, onde um modelo viscoelástico deve ser utilizado para satisfazer as condições do meio cuja passagem da onda ocasione perda de energia, algumas constantes elásticas devem ser modificadas, de maneira a incluir tais atenuações, entretanto as equações da mecânica dos solos porosos não se alteram, requerendo apenas a adaptação destas constantes (BIOT, 1962). Um desses casos, indicado por HAMILTON (1969b) para as constantes de Lamé, as quais são independentes da frequência, atribui-se o seguinte:

Constantes (complexas) para o modelo viscoelástico do meio – $(\lambda+i\lambda')$ e $(\mu+i\mu')$, onde a primeira parcela da soma representa a resposta elástica e a segunda parcela a atenuação energética.

Os fatores de atenuação estão intimamente correlacionados aos parâmetros viscoelástico do comportamento dos sedimentos saturados, e são medidos em decibéis por metro, sendo dependente de uma constante (k) (correlacionada ao tipo de solo e sua porosidade), da frequência (f) da onda e seu expoente (n), de acordo com a seguinte formulação apresentada por (HAMILTON, 1972):

$$\alpha = kf^n$$

Esta fórmula compreende a influência da frequência na atenuação da onda quando esta se propaga no meio. Entretanto, a variabilidade do material que compõe o meio e suas propriedades físicas, tais como o tamanho do grão, densidade aparente e a porosidade, influenciam diretamente o comportamento mecânico de propagação alterando as condições da onda e conseqüentemente os efeitos da atenuação. Tais comportamentos podem ser inseridos na equação pelo expoente “n”, geralmente próximo de 1,0 para baixas frequências, entretanto ao se considerar o efeito Rayleigh, quando o tamanho da onda se aproxima ao tamanho do grão o coeficiente “n” é majorado.

Para os cálculos das condições geradas pela passagem da onda no material e seu comportamento perante esta situação, visando aproximação destes cálculos ao real comportamento do meio, tanto no modelo elástico como no viscoelástico, a consideração de fatores como a isotropia do material, uniformidade da porosidade e uniformidade da poropressão, ocasionam aproximações que reduzem significativamente as constantes elásticas que influenciam o comportamento do fluido se deslocando nos poros dos grãos (BIOT, 1962).

2.5. Efeitos da Atenuação na Propagação de Ondas Acústicas Submarinas

Um dos principais efeitos da atenuação das ondas acústicas é a limitação da capacidade de penetração no fundo marinho e da distância de propagação. O fenômeno da propagação da onda é regido pela conservação de energia, então, logo se percebe a perda de energia da onda em função do deslocamento. Esta condição afeta diretamente a capacidade de percorrer longos caminhos, pois a energia inicial é dispersada omnidirecionalmente.

Percebe-se que uma parcela da atenuação das ondas sonoras pelo meio está relacionada à faixa de frequência, bem como pelo tipo de material e seu comportamento quando perturbado pela propagação acústica, cabendo estudos nesta área de interesse

para a grande variedade de fundos marinhos e as diversas frequências utilizadas pelos métodos investigativos.

2.5.1. Atenuação Intrínseca

Um dos trabalhos nesta análise é de SAVAGE (1965), que verifica a formulação da relação da atenuação com a frequência para meios granulares e conclui que, para uma faixa de frequência, entre 10 e 10^8 Hz, a atenuação intrínseca ao meio (Q – fator de atenuação específico) não varia, pois esta parcela da atenuação está relacionada a perda de energia pelo calor produzido na concentração de tensão no material constituinte do meio, seja intragranular ou no contato entre grãos, sendo o tamanho do grão um fator de relevância nesta análise.

$$Q^{-1} = \Delta E / 2\pi E$$

A formulação acima, expressa o fator de atenuação específica, proposta por KNOPOFF e MACDONALD (1958) para ondas harmônicas, onde ΔE é a energia dissipada por unidade de volume para cada período da onda e E , é a densidade de energia elástica máxima acumulada em cada ciclo da onda, que conclui a independência da frequência para a atenuação. Dados experimentais de SAVAGE (1965), mostraram que para pequenas amplitudes de ondas harmônicas, Q , se apresenta independente da frequência para uma janela de 1Hz a 1MHz, esta característica também foi concluída por ATTEWELL e RAMANA (1966), fornecendo a seguinte formulação de Q :

$$\bar{Q} = 213f^{-0,015}$$

Os gráficos da Figura 4, ilustram a atenuação intrínseca constante para a grande faixa de frequência da onda acústica ao interagirem com o mineral, conforme discutido no parágrafo anterior.

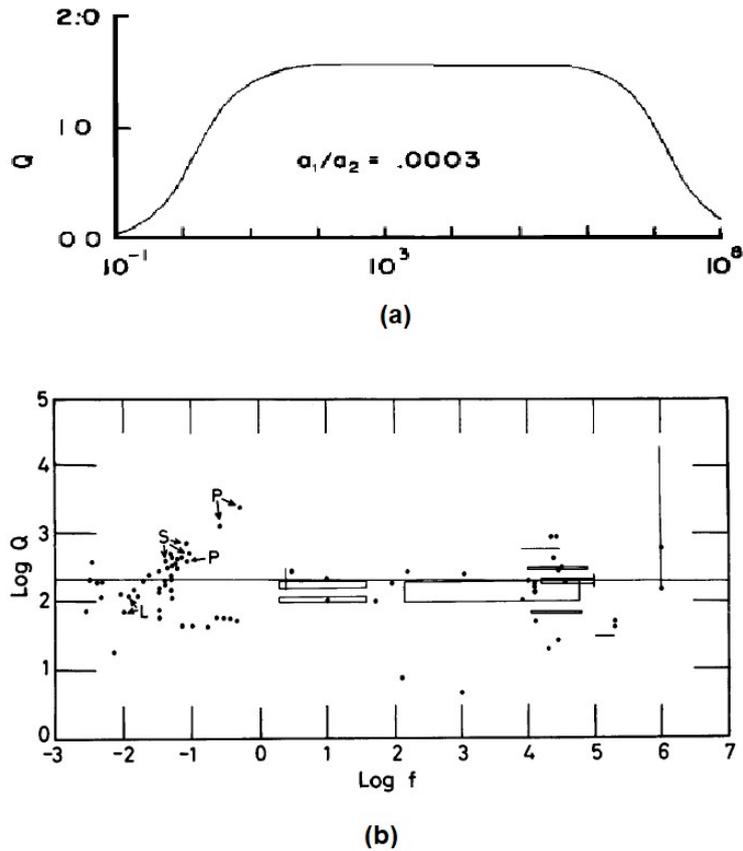


Figura 4 - Relação entre Fator de atenuação específico e frequência para um determinado material, adaptado de SAVAGE (1965) (a); e ATTEWELL e RAMANA (1966) (b).

Em ATTEWELL e RAMANA (1966), são analisadas as condições de atenuação de ondas em rochas, caracterizando este fenômeno como tanto dependente da distância, dado por $e^{-\alpha x}$, onde x é a distancia e α a constante de atenuação espacial; quanto dependente do tempo, dado por $e^{-\gamma t}$, onde t é o tempo de percurso da onda e γ a constante temporal da atenuação. Ambas as constantes são relacionadas por $\alpha = \omega/2cQ$, sendo c a velocidade, e $1/Q$ (Q^{-1}) a atenuação específica ou fricção interna característica do material. Este parâmetro representa uma parcela da atenuação total sofrida pela onda e está relacionada ao material, de maneira independente da frequência.

A partir de outro ponto de vista, AYRES e THEILEN (2001), identificam o fator “Q”, como a capacidade da rocha em transmitir a onda sísmica, quanto maior este fator, melhor a transmissibilidade da onda pelo meio, sendo que tal fator também está relacionado com a saturação e a poro pressão atuante no meio, pois para meios sem a presença de água o fator é extremamente elevado e na presença de água os valores são significativamente mais baixos.

Percebe-se então que, a atenuação intrínseca não possui relação com o modelo de comportamento do meio para a passagem da onda. Segundo aponta HAMILTON (1969b), tal atenuação não está relacionada a fatores que envolvem a permeabilidade com o sistema estrutural do sedimento.

2.5.2. Atenuação do Sinal

Visando tratar das demais parcelas de atenuação do sinal, serão abordados métodos de obtenção da atenuação do sinal pelo meio, obtidos a partir de medições (*in situ* e em laboratório) e suas formulações empíricas. Nos tópicos seguintes, as demais parcelas da atenuação serão discretizadas e analisadas individualmente, de acordo com suas contribuições.

Neste caso, percebe-se que a atenuação total está intimamente relacionada à frequência da onda, conforme Figura 5 e os trabalhos de ATTEWELL e RAMANA (1966), MC DONAL *et al.* (1958), HAMILTON (1972), HAMILTON (1976) e (GORGAS *et al.* (2002), além de outras características físicas do meio. Uma das consequências destas perdas é a limitação do tipo de fonte a ser utilizado nas investigações geofísicas, a qual deve ser compatível com a profundidade e penetração de investigação que se deseja.

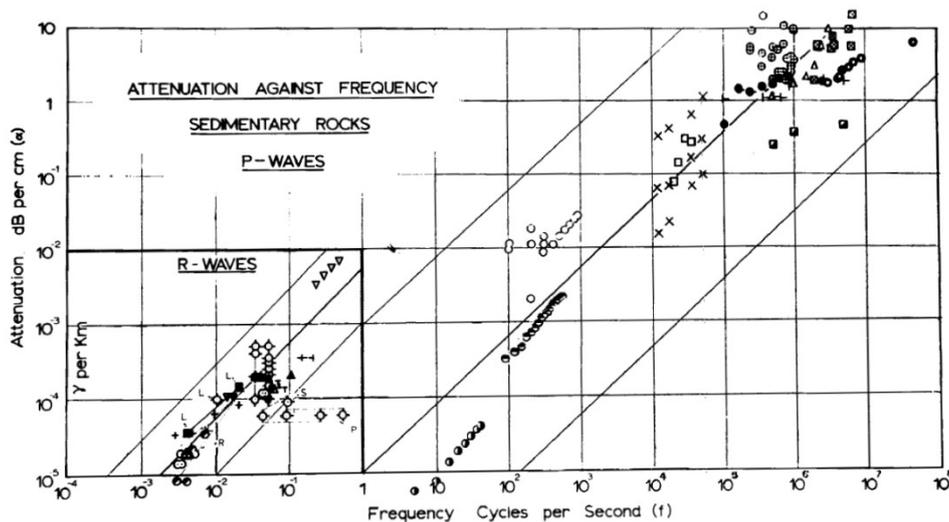


Figura 5 - Gráficos Frequência x Atenuação, adaptado de ATTEWELL e RAMANA (1966).

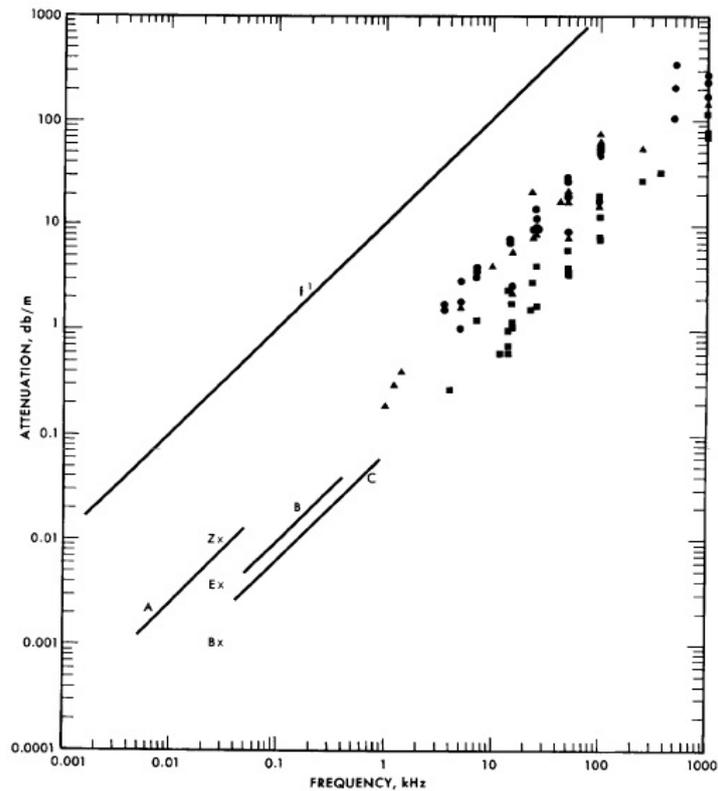


Figura 6 - Gráficos Frequência x Atenuação, adaptado de HAMILTON (1972).

Visando identificar as demais condicionantes do meio que participam da atenuação (k) do sinal sonoro, HAMILTON (1972) discute algumas observações resultantes de seus experimentos, dentre elas, a relação da atenuação com o tamanho do grão, cuja maior importância se relaciona com o espalhamento de Rayleigh, pois ao aproximar o tamanho da onda com o tamanho do grão, eleva-se a relação da frequência para a quarta ordem ($n \sim 4$); com a porosidade, que possui uma característica não linear; e, com a rigidez dinâmica (módulo de rigidez ou cisalhamento μ), que possui comportamento semelhante a porosidade. Entretanto, percebe-se que estes fatores não oferecem uma única direção para a atenuação, sendo necessário dividir a análise sob o aspecto do comportamento do meio quanto a sua saturação, adsorção de água e coesão, fazendo com que os diferentes tipos de solos apresentem parâmetros diferentes de atenuação.

Em GORGAS *et al.* (2002), também são apontadas dificuldades em estabelecer parâmetros rígidos que relacionem as propriedades físicas do meio com a atenuação, principalmente considerando os comparativos entre medições *in situ* e em laboratório, que possuem escalas de medições diferentes.

Com isto, a análise da atenuação se torna mais clara quando separamos aqueles solos mais granulares (areias) dos que possuem maior coesão (argilas). Para as areias, é possível trabalhar com as propriedades viscoelásticas, considerando a capacidade de percolagem do fluido entre os poros. Entretanto, a fricção do contato entre os grãos pode ter caráter dominante na perda de energia, devendo-se levar em conta fatores como módulo de rigidez, o qual está interligado diretamente com a porosidade (para areias) e tamanho médio do grão. O resultado de uma diminuição do tamanho do grão sem variação da porosidade, só com o aumento do número de contatos entre grão, leva a maiores atenuações. Por outro lado, se a porosidade aumenta sem a variação do tamanho do grão, ocorre a diminuição dos contatos entre grãos, diminuindo a atenuação (HAMILTON, 1972).

Para os siltes e argilas, os fatores de atenuação estão relacionados à coesão das partículas, questão de maior complexidade, pois possui relação com as características eletroquímicas do mineral e forças intragranulares, assunto que não será observado neste estudo, cabendo avaliar que maiores valores de atenuação estão relacionados com menores índices de porosidades para estes compostos, conforme identificado no pico do gráfico a) ilustrado na Figura 7 (HAMILTON, 1972).

Finalmente, valores de k foram obtidos experimentalmente por HAMILTON (1972), relacionando tanto a porosidade quanto ao tamanho do grão, conforme as figuras a seguir.

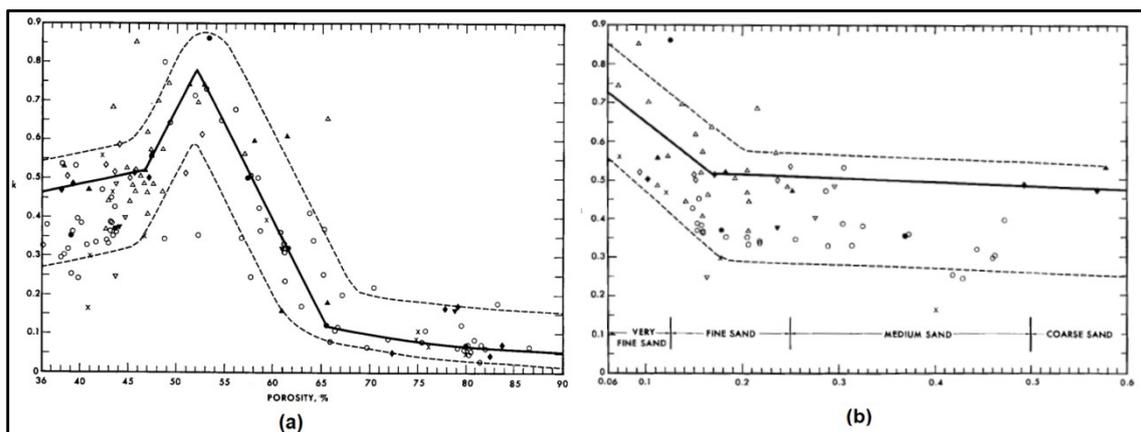


Figura 7 - Fator k relacionado com a porosidade (a); e tamanho médio do grão em mm (b), adaptado de HAMILTON (1972).

Percebe-se então que a atenuação do sinal pelo fundo marinho é de difícil caracterização, dado que diversos fatores interferem no comportamento do sinal ao se propagar por um meio heterogêneo. Em AYRES e THEILEN (2001), aponta-se que os

mecanismos de atenuação ainda são pouco entendidos, apesar de se saber das contribuições oferecidas pelas características do sinal refletido para esta análise, os quais permitem ter algum entendimento sobre as camadas refletoras.

3. MÉTODO SÍSMICO

Os métodos sísmicos se dividem em duas grandes áreas, a sísmica convencional e a sísmica de alta resolução. A primeira, mais voltada para a exploração do petróleo e identificação das camadas mais profundas da crosta, e a segunda visando reconhecimento do fundo submarino e das camadas deposicionais mais superiores para o mapeamento de habitats e como suporte para obras de engenharia submarina. Apesar de empregarem os mesmos princípios físicos, os sistemas de aquisição e processamento dos dados são diferentes (SOUZA, 2006).

O foco deste trabalho se volta para a sísmica de alta resolução, técnica que permite a investigação mais detalhada das camadas rasas do subfundo marinho. Diferentemente da aquisição sísmica convencional, ilustrada pela Figura 8, a sísmica rasa pode trabalhar com seus equipamentos de aquisição fixados no casco da embarcação, conforme o esquema apresentado pela Figura 9, cujos equipamentos são significativamente mais compactos, conforme ilustração da Figura 10. Os dados utilizados para este trabalho foram adquiridos por esse método, que permite analisar as características de interação da onda com as primeiras camadas de solo e também são compatíveis com as características dos sinais de comunicação utilizado no desenvolvimento destas tecnologias.

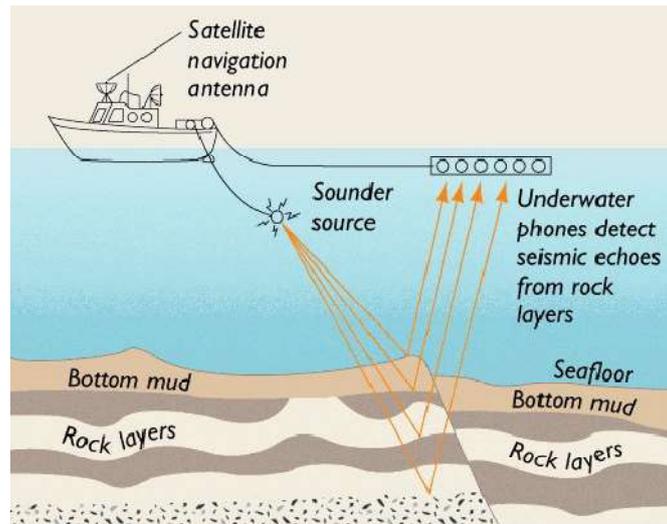


Figura 8 - Esquema do levantamento sísmico convencional.

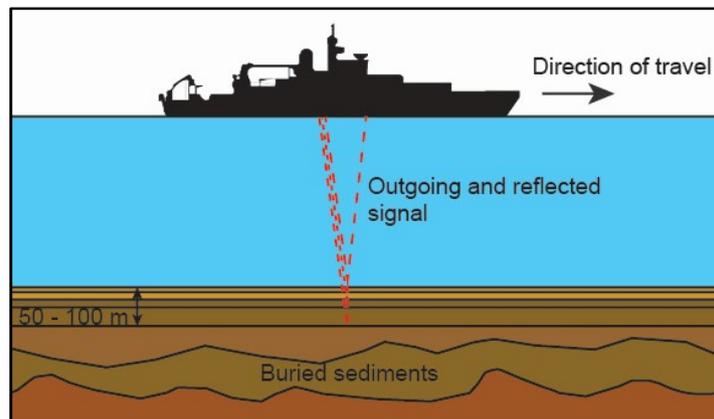


Figura 9 - Esquema de investigação pelo *Sub-bottom Profiler (SBP)*. Fonte: <https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1404/logs/sept24/media/fig1-hires.jpg>, acessado em 03/03/2022

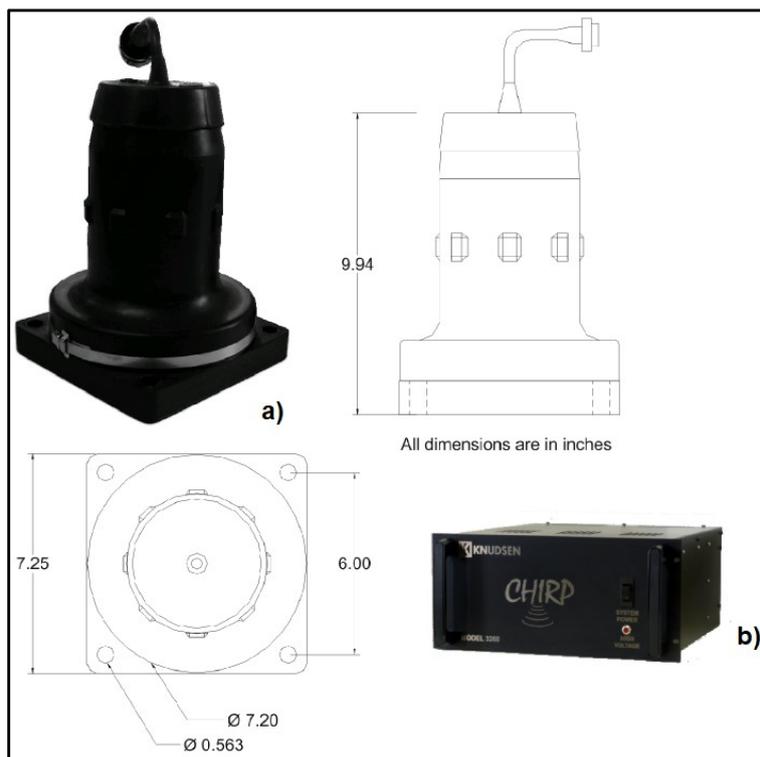


Figura 10 – Transdutor 3,5 kHz (a), e Perfilador de Sub-Fundo Knudsen 3260 (b).

A frequência de trabalho dos métodos sísmicos de alta resolução (0,5 kHz – 10 kHz para as fontes ressonantes), quando comparados com o da sísmica convencional (geralmente menores que 0,1 kHz para as fontes impulsivas), acabam por criar interações com a rugosidade do fundo marinho ou com as interfaces sedimentares, devido critério de Rayleigh conforme exemplificado na Figura 11, gerando espalhamento do sinal acústico em determinadas condições (SOUZA, 2006). Entretanto, é devido a estas condições que podemos utilizar este método para classificar o tipo de fundo e obter algumas propriedades acústicas do sedimento de cobertura que poderão ser correlacionadas com propriedades físicas.

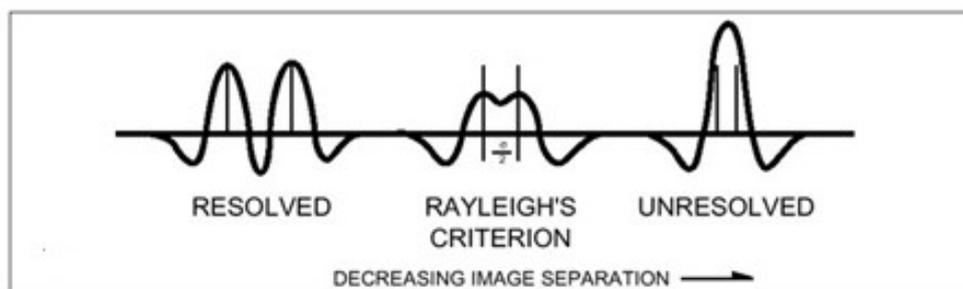


Figura 11 - Ilustração da resolução pelo critério de Rayleigh.

4. INTERAÇÃO DA ONDA COM O FUNDO MARINHO

A necessidade de reconhecimento do fundo marinho e de suas propriedades representa uma das maiores aplicações para a acústica submarina. Os avanços tecnológicos das técnicas bem como o aumento da capacidade de cálculo e armazenagem computacional permitem aquisição de dados cada vez mais complexos e de maiores regiões. A partir destas ferramentas são mensurados e analisados os resultados de investigações acústicas aumentando a precisão de medições realizadas indiretamente.

A velocidade da onda no meio é de grande importância para definir os tempos de trânsito e, desta maneira, identificar a correta posição espacial dos refletores e alvos nas camadas sedimentares no fundo e subfundo marinho. Em HAMILTON (1956), foram identificados valores de velocidade para diferentes tipos de fundo marinho, dentre eles solos moles (lamas) tais como siltes e argilas, cuja porosidade é bastante elevada, para as quais foram constatadas velocidades inferiores aquelas constatadas na água.

Diversos autores produziram trabalhos visando elaborar correlações empíricas, a partir de investigações *in situ* e em laboratório, entre as propriedades acústicas e as propriedades físicas do material que constitui o fundo marinho, dentre eles HAMILTON *et al.* (1956), RICHARDSON e BRIGGS (1993), AYRES e THEILEN (2001), DAVIS *et al.* (2002) e GORGAS *et al.* (2002). Tais pesquisas visam incremento no entendimento sobre o comportamento da onda quando interage com a camada sedimentar, visto que variação das propriedades de cada meio ocasiona grande influência no sinal acústico refletido aos transdutores.

Neste contexto, é perceptível o quanto a influência das características físicas do meio interfere na atenuação e no comportamento da onda. Este tópico servirá para identificar com maiores detalhes tais influências, bem como descrever cada uma das propriedades participantes do fenômeno.

4.1. Granulometria e Porosidade

Os tipos de sedimentos são divididos pelo tamanho dos grãos e a proporção que cada um constitui o meio em questão. Uma das principais classificações foi proposta por WENTWORTH (1922), resumida nas tabelas abaixo.

Tabela 1 - Tamanho e classificação dos sedimentos.

Cascalho Grosso	Cascalho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia Muito Fina	Silte	Argila
>64 mm	64>4 mm	4>2 mm	0,5>1/4 mm	1/4>1/8 mm	1/8>1/16 mm	1/16>1/256 mm	<1/256 mm

Tabela 2 - Classificação dos sedimentos pelos quantitativos de cada componente dada por WENTWORTH (1922).

TEOR DE MATERIAL		CLASSIFICAÇÃO WENTWORTH
Cascalho > 80%	-	Cascalho
Cascalho > Areia > 10%	Outros < 10%	Cascalho com Areia
Areia > Cascalho > 10%	Outros < 10%	Areia com Cascalho
Areia > 80%	-	Areia
Areia > silte > 10%	Outros < 10%	Areia Siltosa
Silte > Areia > 10%	Outros < 10%	Silte Arenoso
Silte > 80%	-	Silte
Silte > Argila > 10%	Outros < 10%	Silte Argiloso
Argila > silte > 10%	Outros < 10%	Argila Siltosa
Argila > 80%	-	Argila

A classificação utilizada neste trabalho foi a de SHEPARD (1954) e de SCHLEE (1973), ilustradas na Figura 12 e Figura 13.

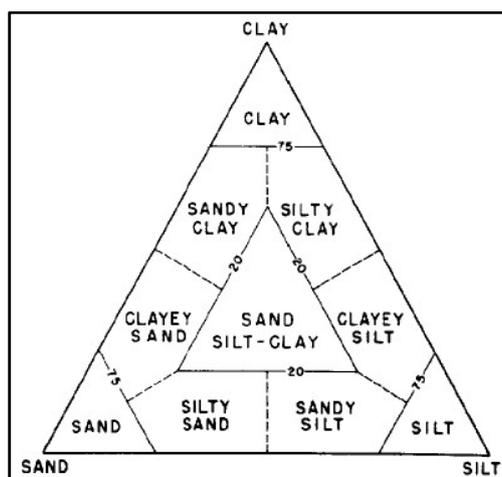


Figura 12 – Sistema de Classificação proposta por SHEPARD (1954), adotada para a nomenclatura dos tipos de fundo neste trabalho.

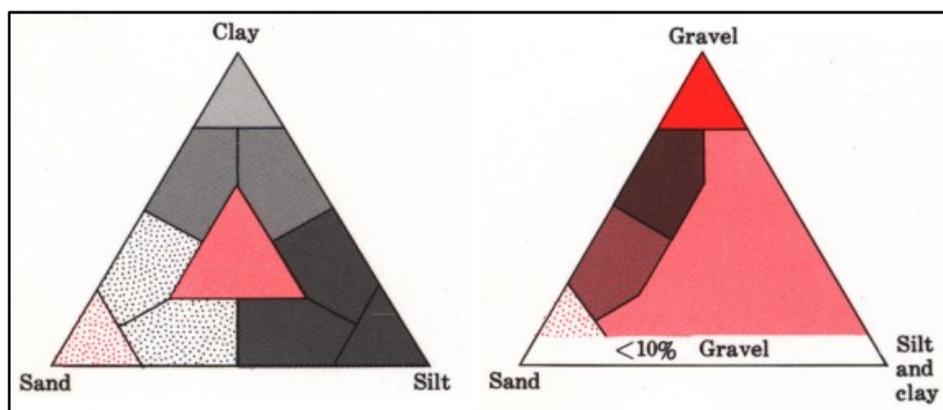


Figura 13 – Padrão de classificação proposta por SCHLEE (1973), aproveitando a classificação de Shepard, entretanto, abrangendo os sedimentos cascalhosos.

A classificação acima possui relação direta com a porosidade, a qual é caracterizada como a proporção de vazios entre grãos em relação ao volume total. Os solos mais heterogêneos possuem maior capacidade de preenchimento dos vazios existentes entre os grãos por partículas menores, resultando em porosidades baixas, por outro lado, solos mais homogêneos, tendem a ser mais porosos. Entretanto, sua composição mineralógica também influencia na estimativa da porosidade, por exemplo, grãos de areia e cascalhos apresentam-se inertes quimicamente e acabam por formar uma matriz com elevado número de contatos entre os grãos. Já os siltes e argilas, mais suscetíveis a forças intermoleculares (principalmente em contato com a água) tendem a formar “esqueletos” com elevados índices de vazios (geralmente preenchido por água) e consequentemente elevada porosidade.

Esta propriedade apresenta significativa importância para o estudo da acústica submarina, pois, conforme já abordado, a influência no comportamento do meio pela passagem da onda está relacionada com a capacidade do meio líquido presente nos poros do sedimento de se deslocar em relação a matriz granular, logo, a quantidade de vazios e o tamanho dos poros existente no sedimento devem ser levados em consideração para a dinâmica do estudo da acústica.

4.2. Impedância Acústica

Uma das características que visa resumir o fenômeno da interação da onda com as interfaces entre os diferentes meios em uma propriedade singular, é a Impedância. Segundo RICHARDSON e BRIGGS (1993), é utilizada como princípio operacional pela maioria dos sistemas de classificação acústica, também se traduz na quantidade de energia refletida (ou perdida) quando uma onda passa de um meio para outro

(HAMILTON, 1970). Esta característica é formulada pelo produto da densidade pela velocidade, originalmente dada por KINSLER *et al* (2000):

$$Z = p/u$$

Onde, Impedância (Z) é a razão entre a pressão acústica (p), causada pela passagem da frente de onda, e a velocidade u , da partícula do meio.

Que para onda planas, utiliza-se a seguinte formulação:

$$Z = \pm \rho_0 V$$

Onde, ρ_0 é a densidade do meio e V a velocidade da onda no meio.

Segundo SOUZA (2006), o fenômeno físico da reflexão só ocorre quando existem contrastes representativos (variação de impedância) entre os meios atravessados pelo sinal acústico, sendo praticamente inexistente em corpos homogêneos.

A relevância desta característica permite identificar diferentes camadas sedimentares e, principalmente, o fundo marinho, mesmo para o caso de pequenas variações de velocidade entre a água e sedimento, pois a variação de densidade influencia significativamente no cálculo da impedância (HAMILTON, 1970).

Segundo HAMILTON (1969a), a excelente relação entre a impedância e outras propriedades facilitam a predição desta para seu uso em estudos de refletividade e para determinar valores de velocidade do som nas camadas estudadas. A impedância aumenta com a diminuição da porosidade de maneira quase linear, apresentando resultados e comportamento parecidos tanto para sedimentos em águas profundas quando em sedimentos de elevada porosidade da plataforma continental. Quando consideramos a densidade, a impedância aumenta com o aumento desta, apresentando relação levemente logarítmica nas plataformas e praticamente linear em águas profundas. Ambas as características são mais precisas que o tamanho médio do grão para determinar a impedância, concluiu HAMILTON (1969a).

O estudo da relação da impedância com os demais parâmetros físicos dos solos visa obter condicionantes de representatividade do tipo de solo analisado segundo a menor quantidade de parâmetros possíveis. Tal relação aumenta a confiabilidade dos métodos geofísicos e diminui a necessidade de amostras, e, como a impedância é um parâmetro que pode ser obtido apenas pela análise do sinal refletido, diversos custos

com ensaios podem ser evitados com a utilização deste parâmetro para compor as características do fundo marinho.

4.3. Densidade com Quadrado da Velocidade

Este parâmetro também é utilizado para as análises de propriedades das camadas sedimentares é o produto da densidade pela velocidade ao quadrado, tendo elevada significância na relação com as constantes dos meios elásticos ou visco elásticos através da equação:

$$\rho_0 V_p^2 = k + \frac{2}{3}\mu = \lambda + 2\mu$$

Ainda segundo HAMILTON (1969a), este parâmetro apresenta boa correlação tanto com a porosidade quanto com a densidade, sendo praticamente lineares. Tais condições permitem a entrada com um dos parâmetros nos diagramas para o cálculo do outro, com boas condições de precisão.

4.4. Razão Velocidade na Água pela Velocidade no Sedimento

O comportamento da onda assume diversas características conforme sua interação com o meio. Uma das características de maior relevância para a geofísica é a velocidade da onda no meio, pois a variação desta característica pode determinar variações no deslocamento da onda, cujos fenômenos de reflexão e refração estejam envolvidos.

Esta Razão pode traduzir uma parcela deste comportamento, pois oferece grandezas adimensionais para comparar diferentes fundos. Outro ponto de relevância deste índice é a viabilidade da correlação de medições realizadas em laboratório e *in situ*, sobre a velocidade da onda no sedimento (HAMILTON, 1969a). Esta relação é ainda utilizada para parametrizar propriedades dos meios em coeficientes adimensionais, que são utilizados nos cálculos de reflexão e espalhamento ocasionado pela interface de meios, sem serem afetados por condicionantes sazonais, como verificado por RICHARDSON e BRIGGS (1993).

4.5. Coeficiente de Reflexão e Perdas no Fundo

Diferente dos conceitos abordados anteriormente, a Reflexão e as Perdas ocasionadas pelo fundo, se traduzem dos resultados de vários fenômenos simultâneos, dentre eles, a atenuação intrínseca, atenuação total, espalhamento, refração e reflexão,

sendo que cada um dos fenômenos influencia nos demais, pois a energia original incidente é redistribuída para todas estas ocorrências. Com isto, percebe-se a grande variabilidade de condições que podem ser impostas ao modelo que visa representar a interação da onda com o fundo marinho. Segundo HAMILTON (1969a), o fundo marinho não pode ser representado por um único modelo geoacústico, diferentes condições devem ser utilizadas considerando o tipo de fundo o qual se pretende representar.

Para CLAY (1966), o sinal refletido pode ser considerado como a soma de uma componente coerente, caracterizada pela refletividade média de uma área do fundo, e uma componente incoerente, caracterizada pelo espalhamento devido a irregularidades do fundo. As caracterizações estão relacionadas à compatibilidade entre as fases da onda incidida e da onda refletida (ou espalhada), quando estas mudam rapidamente com pequenas variações da distância entre fonte/receptor em relação ao fundo, o campo é caracterizado como incoerente, a Figura 14 ilustra o problema.

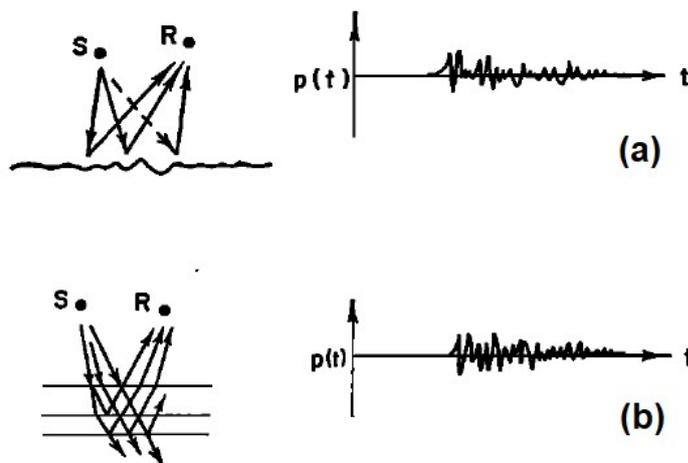


Figura 14 - Comparação entre reflexão incoerente (a) e reflexão coerente (b), adaptado de CLAY (1966).

Desconsiderando as irregularidades do fundo e visando o estudo do problema, a reflexão pode ser entendida como propagação de uma onda plana, que incide numa superfície (ou interface) com um determinado ângulo de incidência (medido a partir da superfície da interface até a fonte) que tem uma reflexão cujo ângulo é igual ao de incidência, entretanto com amplitude reduzida, conforme equações a seguir, identificadas por JACKSON e RICHARDSON (2007):

$$P_i = P_{i0} e^{ik_i \cdot r}$$

$$P_r = V_{ww}(\theta) P_{i0} e^{ik_r \cdot r}$$

Onde, P_i e P_r são as amplitudes da pressão incidente e refletida obtida a partir da amplitude da fonte P_{i0} e do vetor da onda $k_i = \omega/c_w (\cos\theta, 0, -\sin\theta)$ e $k_r = \omega/c_w (\cos\theta, 0, \sin\theta)$, tendo como $V_{ww}(\theta)$, o coeficiente de reflexão, e a Figura 15 a referência esquemática.

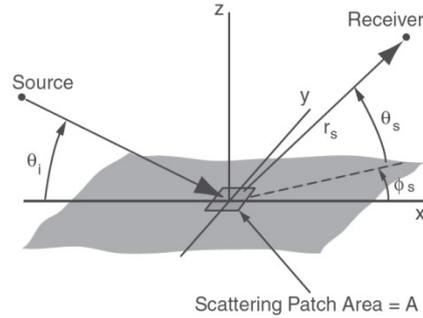


Figura 15 - Ilustração das relações da onda incidida e refletida, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).

Baseando-se no Modelo da Teoria do Fluido, que contempla a camada superficial do sedimento como um fluido sem atenuação, HAMILTON (1969a) aponta que é possível obter parâmetros de velocidade e densidade do fundo, bem como o estudo da reflexão e refração da onda com incidência normal ao fundo, bem próximo dos reais. As formulações relacionadas a esta teoria, sem significativa dependência da frequência da onda são: para o coeficiente de reflexão do fundo (R) e para a equação de perda pelo fundo (BL).

$$R = \frac{\rho_2 V_{p2} \cdot \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}}$$

Onde, $\rho_1 V_{p1}$ é a impedância do meio 1 e $\rho_2 V_{p2}$ é a impedância do meio 2, e;

$$BL = 20 \log R$$

Onde BL (*Bottom Loss*) é a Perda no Fundo, para ondas planas com incidência normal ao fundo.

Este valor é compatível ao identificado por JACKSON e RICHARDSON (2007), cuja perda de fundo é dada por:

$$BL = -20 \log(|V_{ww}(\theta)|)$$

Salienta-se que JACKSON e RICHARDSON (2007) também apresenta a equiparação das teorias do Fluido e Elástica para o tratamento do coeficiente de reflexão. Em suas considerações, e para sedimentos não consolidados, a teoria elástica apresenta uma modesta correção em relação à teoria do fluido, conforme apresentado na Figura 16, que conta com uma majoração da velocidade transversal da onda (de maneira a viabilizar a diferenciação entre as duas curvas), adotando-se 250 m/s (em detrimento dos valores realistas de 100 m/s).

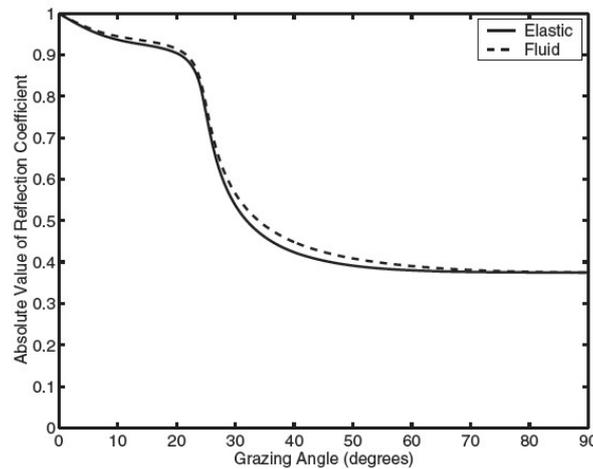


Figura 16 - Comparativo entre as curvas de coeficiente de reflexão, para sedimentos não consolidados, pela teoria do fluido e teoria elástica, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).

Percebe-se a importância da dependência no ângulo de incidência e das características da taxa de velocidade entre o sedimento e a água para o cálculo das perdas de fundo, bem como da refletividade do meio, na comparação realizada por JACKSON e RICHARDSON (2007), ilustrada na Figura 17. Percebe-se ainda que abaixo do ângulo crítico, para interfaces que não geram perdas, a reflexão é entendida como perfeita (KUPERMAN; ROUX, 2007). Desta maneira, a perda aumenta conforme o aumento da refração da onda em direção ao sedimento, sendo a penetração maior para maior ângulo de incidência, obedecendo a Lei de Snell.

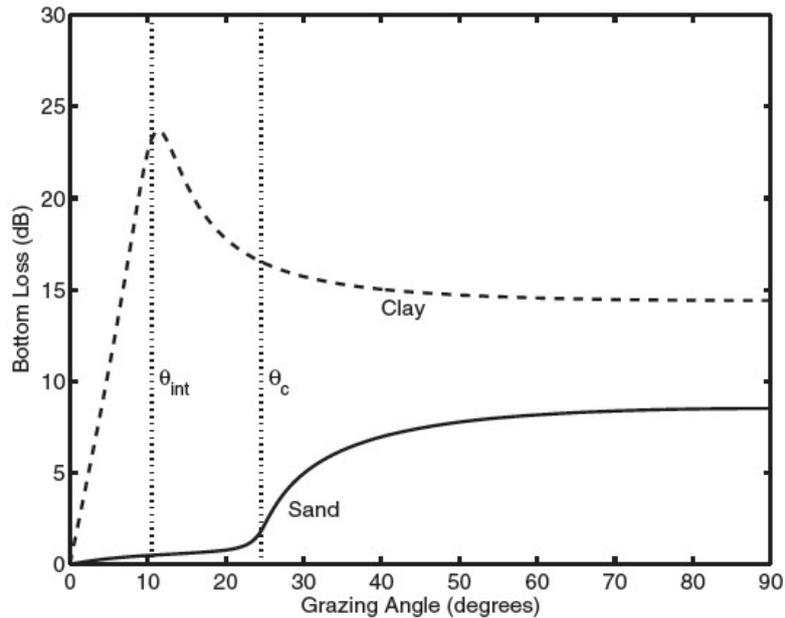


Figura 17 - Gráfico da Perda de Fundo x Ângulo de Incidência para Argila e Areia com apontamento do ângulo crítico nas areias e ângulo de intromissão nas argilas, adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).

Outro ponto a ser observado é que as baixas velocidades ($V_s < V_w$ – quando a velocidade no sedimento é menor que a velocidade na água) dos fundos argilosos, percebe-se que em certo ângulo de incidência (ângulo de intromissão), a reflexão cai abruptamente e a refração aumenta, ocasionando perda de energia máxima para o fundo, neste caso o sinal fica aprisionado na camada sedimentar e refrata consecutivamente por longas distâncias.

O fenômeno da intromissão em fundos de baixa velocidade, também foi apontado por HAMILTON (1969c), que faz referência a trabalhos onde foram percebidas ondas refratadas junto ao fundo marinho, produzindo um pequeno canal acústico na primeira camada do sedimento de fundo, cuja espessura varia entre 5 e 50 metros.

4.6. Dispersão

A dispersão é a interferência que o sinal sonoro sofre, ao ser refletido por uma interface rugosa ou qualquer heterogeneidade presente no meio pelo qual o sinal se propaga. Quando o espalhamento ocorre na interação da onda com o fundo marinho, as condições de rugosidade desta interface são de grande importância para o estudo do espalhamento do sinal sonoro. Deste modo, percebe-se que este fenômeno está totalmente relacionado com as características de refletividade do material e suas

propriedades físicas, cuja textura do sedimento apresenta um fator de significativa importância. A análise destas características pode ocorrer pelo conceito da componente incoerente da refletividade, abordada no item anterior.

A interferência do fundo é aleatória, entretanto está relacionada com o tipo de fundo e suas irregularidades na região da reflexão, conforme abordado por JACKSON e RICHARDSON (2007). O tipo, a forma e as propriedades físicas do material constituinte são fatores que contribuem para este fenômeno, além da relação entre o comprimento de onda e as dimensões das rugosidades, questões de significativa importância para o desenvolvimento deste estudo.

Este efeito também é influenciado pela distância do receptor e o ponto de espalhamento (fundo do mar). Partindo-se da proposta que uma parcela do sinal é espalhado para diversas direções ao interagir com o fundo (próximo a uma distribuição esférica), sua intensidade é atenuada significativamente com a distância, da ordem de duas vezes a atenuação do sinal refletido (URICK, 1979). Logo uma grande parcela do sinal pode ser atenuada e não ser captada pelo receptor quando esta distância é elevada.

As metodologias de medição do espalhamento de determinada onda sobre determinado tipo de fundo são feitas de diversas maneiras. Uma delas é a utilização de métodos estatísticos, aplicado principalmente para altas frequências, prevendo o tipo de campo gerado (média da pressão do espalhamento) após a reflexão por uma determinada região de um determinado tipo de solo, a partir de ensaios (JACKSON; RICHARDSON, 2007).

A partir da formulação usada por CLAY (1966), para as parcelas de reflexão incoerente e coerente do sinal, são dadas por:

$$p_{inco}^2 = \alpha^2 R^2 SA / R_1^2 \cdot R_2^2$$

$$p_{coer}^2 = \alpha^2 R^2 / R_1^2 + R_2^2$$

Onde, “p” é a pressão acústica, “α” é a função da fonte, “R” o coeficiente de reflexão, “R₁” a distância entre a fonte e a área de reflexão e “R₂” a distância da área de reflexão até o receptor, “S” a função de espalhamento e “A” é a área de reflexão.

Percebe-se nestas equações que a reflexão e o espalhamento são afetados de maneiras diferentes pelas distâncias entre a fonte e o receptor em relação ao fundo, ocasionando perdas de intensidades significativas para cada fenômeno, conforme apontado por URICK (1979).

A dispersão é geralmente medida pelo campo de pressão gerado após uma onda incidente interagir com uma região do fundo marinho de área “A”. Este campo é obtido de maneira probabilística, e confirmado por métodos empíricos (através da média de diversas medições), entretanto, sempre proporcional a intensidade do sinal incidido. A formulação para a determinação deste valor, em conformidade com a identificada anteriormente, é dada por JACKSON e RICHARDSON (2007):

$$\langle |P_s|^2 \rangle = |P_i|^2 A \sigma \frac{1}{r_s^2}$$

Onde, $\sigma(\theta_i, \theta_s, \phi_s)$, é a função de rugosidade, adimensional, obtida a partir da função Gaussiana que depende dos ângulos de incidência e de refletividade, sendo este último com duas componentes, uma no plano de incidência e outra no plano ortogonal a este, conforme ilustrado na Figura 15.

Transformando o campo de pressão em energia, pela combinação da equação acima com a equação da refletividade de fundo dada por HAMILTON (1969a), aproxima-se de uma formulação para a quantidade de sinal disperso pelo fundo e suas características. A formulação dada por JACKSON e RICHARDSON (2007), permite tal aproximação:

$$U_s = \frac{A|P_i|^2}{2\rho_w c_w} \int_{2\pi} \sigma(\theta_i, \theta_s, \phi_s) d\Omega_s$$

Fazendo o mesmo para as expressões de campo de pressão incidido e refletido e se utilizando da teoria da conservação da energia, temos a equação das energias onde $U_c + U_s \leq U_i$, resultando em:

$$|V_{wwc}|^2 \text{sen}\theta_i + \int_{2\pi} \sigma(\theta_i, \theta_s, \phi_s) d\Omega_s < \text{sen}\theta_i$$

A ilustração para a representatividade destas condições de refletividade e espalhamento pode ser entendida pela Figura 18.

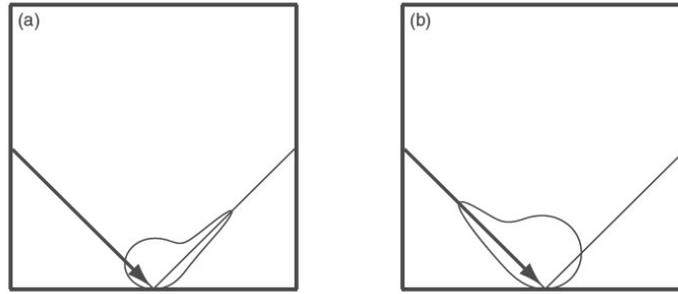


Figura 18 - Hipóteses de espalhamentos para ondas planas incidentes, em (a) espalhamento típico de fundo marinho com pico de espalhamento na direção do receptor; em (b), elevado espalhamento com pico na direção da fonte, caracterizando o retro-espalhamento "backscatter", adaptado de JACKSON e RICHARDSON (2007).

A desigualdade citada acima pode ser representada pela Lei de Lambert's, visando descrever a intensidade total da dispersão pelo espalhamento, que assume a seguinte forma:

$$\sigma(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \mu \text{sen}\theta_i \cdot \text{sen}\theta_s$$

Para $\theta_i = \theta_s$, tem-se o retro-espalhamento (*backscatter*), reduzindo a expressão acima para:

$$\sigma = \mu \text{sen}^2\theta_i$$

Em níveis práticos, a equação acima quantificando a perda pelo espalhamento devido ao fundo, pode ser representada, de acordo com KUPERMAN e ROUX (2007), por:

$$S_B = A + 10 \log \text{sen}^2\theta \text{ (dB)} \text{ ou } S_B = 10 \log \mu \text{ (dB)}$$

Estas explicações permitem tratar numericamente o problema da dispersão do sinal acústico pelo fundo marinho, cujo entendimento desenvolve conceitos para analisar o problema físico/experimental de que se trata este estudo. Entretanto, não foram desenvolvidas análises matemáticas para os resultados e discussões deste trabalho, apenas análises conceituais da influência da composição do fundo para o fenômeno da reflexão.

4.7. Interação do fundo na comunicação submarina

A utilização de protocolos de comunicação e o estudo dos critérios de previsão do comportamento dos sinais acústicos no meio submarino estão relacionados com as características do meio pelo qual o sinal se desloca e também com os limites desse meio com os meios adjacentes, mais especificamente a interface do oceano com a atmosfera e

a interface com o fundo marinho. No caso deste trabalho, a interface com o fundo marinho é analisada por parâmetros que permitem diferenciar a composição de fundo através do comportamento do sinal refletido por ele e, conseqüentemente, viabilizar a introdução dessas características na previsão do comportamento do sinal entre a fonte e o receptor.

Em JENSEN *et al* (2011), é exposto que essas condições de interação da onda com o fundo são fatores limitantes para os modelos de transmissão acústica no oceano, assim como os parâmetros geométricos do campo correlacionados com os ângulos de incidência e fase do sinal resultante da interação com a espessura da camada sedimentar (MAIA 2017). Entretanto o fenômeno da refletividade não se resume aos parâmetros físicos, mas também aos morfológicos, como a rugosidade do fundo que influencia no efeito de Rayleigh, conforme apontado por MAIA (2017), podendo ser um fator dominante na alteração da propagação pelos efeitos do espalhamento (JACKSON e RICHARDSON 2007).

Na comunicação acústica submarina, um dos fatores de maior relevância na análise do sinal é o multicaminhamento, onde feixes de onda acabam por interagir com o fundo antes de chegar ao receptor. Tal situação reflete-se nas condições de interação com o fundo, abordadas nos parágrafos anteriores, que sem o devido tratamento dificulta o pleno entendimento dos dados contidos na transmissão além de ocasionar perdas. Ao implementar um fator que traduza este comportamento na sistemática de interpretação do sinal recebido, objetiva-se melhorar a eficiência da comunicação acústica e suas derivações.

5. METODOLOGIA

5.1. Origem dos Dados

Os dados geofísicos utilizados neste trabalho foram adquiridos por levantamentos da plataforma continental sudeste do Brasil, ao largo da costa norte do estado do Rio de Janeiro, compreendida no conjunto de levantamentos para a caracterização geológica e geofísica da chamada Área IV. O levantamento se deu entre os dias 04 e 12 de março de 2012 pela CEPEMAR – Serviços de Consultoria em Meio Ambiente Ltda por solicitação da CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais com coordenação da Universidade Federal Fluminense - UFF.

Os levantamentos consistiram em aquisição geofísica por ecobatímetro multifeixe e perfilador de Sub-fundo (Sub Bottom Profiler – SBP) em perfis ao largo da costa do estado do Rio de Janeiro, com apoio da embarcação RV Ocean Stalwalt, realizando as linhas de levantamentos conforme Figura 19.

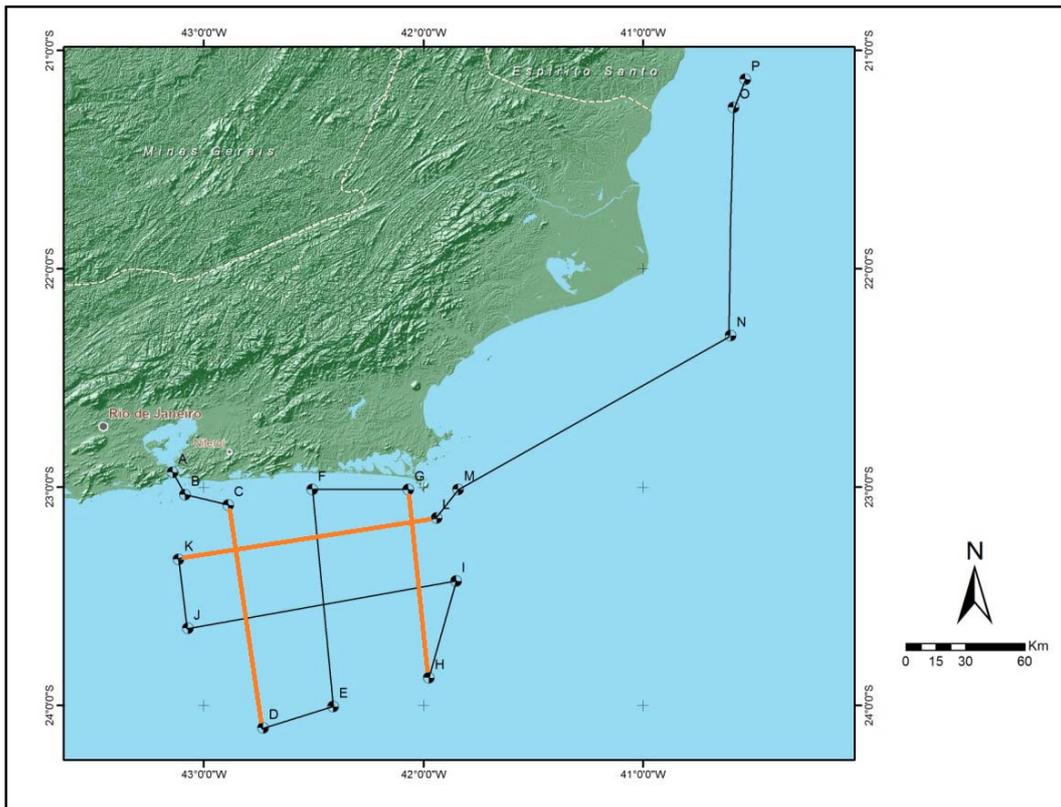


Figura 19 - Localização do levantamento dos dados. Realce (em laranja) das linhas utilizadas neste trabalho, adaptado de CEPEMAR (2012).

Os equipamentos utilizados foram Reson Seabat 7150 e 7125 para a batimetria (multifeixe) operado a 24 kHz e Knudsen 3260 para a perfilagem de sub-fundo operado a 3,5 kHz, cuja aquisição foi realizada a uma velocidade de 4,5 nós, devido ao reboque de outros equipamentos. O perfilador de subfundo está ilustrado na Figura 10, sendo do tipo fixado no casco da embarcação. Ao todo, foram utilizados 250 km de perfil sísmico para este estudo, ilustrado pelos destaques em laranja na Figura 19.

Para as amostras de fundo, foram utilizados dados do BAMPETRO. Dentre os dados existentes no banco de dados para a região de estudo, foram selecionados os que se apresentavam próximos às linhas sísmicas, visando melhor representatividade das correlações; bem como os que continham dados de granulometria (perante a classificação Shepard), teor de Carbonatos (perante a classificação de Larssonneur) e

tamanho médio do Grão (na escala de Krumbein - ϕ), resultando em 27 amostras. A distância média entre as linhas e as amostras de fundo foi de 800 metros. A Tabela 3 e a Figura 20 resumem os dados das amostras de fundo utilizadas e suas características físicas e geográficas.

Tabela 3 - Resumo das Amostras de Fundo utilizadas e suas características físicas e geográficas

AMOSTRA	LONG (°)	LAT (°)	TEOR DE AREIA (%)	TEOR DE SILTE (%)	TEOR DE ARGILA (%)	TEOR DE CASCALHO (%)	TIPO DE FUNDO (Class. Shepard)	TEOR DE CARBONATOS (%)	PROFUNDIDADE	DISTÂNCIA (m)	PHI (ϕ)
16898	-42,01609	-23,43005	84,00	10,00	1,00	5,00	AREIA	15,00	138,08	3600	0,94
17335	-42,84275	-23,28820	68,00	9,00	6,00	17,00	AREIA CASCALHOSA		98,04	700	1,21
17360	-42,88234	-23,29454	62,00	20,00	9,00	9,00	AREIA SILTOSA		97,22	750	2,77
18439	-42,05906	-23,08149	49,00	36,00	15,00		AREIA SILTE ARGILA	14,00	75,07	70	0,89
17532	-42,65073	-23,26303	96,00			4,00	AREIA	74,00	100,85	1400	1,64
19055	-42,06417	-23,03397	45,00	35,00	20,00		AREIA SILTE ARGILA	5,00	74,43	410	0,95
17441	-43,04617	-23,27875	96,00			4,00	AREIA		88,31	200	0,84
18686	-43,07894	-23,06076	94,00			6,00	AREIA	71,00	37,28	650	-0,17
19100	-42,06473	-23,02846	54,00	27,00	19,00		AREIA SILTOSA	5,00	70,72	290	5,64
18678	-43,07915	-23,05924	78,00			22,00	AREIA	71,00	36,74	660	-
17406	-42,70572	-23,26615	75,00	6,00	8,00	11,00	AREIA		95,81	480	1,48
19237	-42,06496	-23,02624	100,00				AREIA		70,12	10	5,23
18708	-42,06247	-23,04965	53,00	27,00	20,00		AREIA SILTOSA		82,66	520	0,62
19167	-42,06536	-23,02255	57,00	22,00	21,00		AREIA SILTOSA		67,13	65	5,33
19280	-42,06570	-23,01958	59,00	20,00	21,00		AREIA SILTOSA	5,00	66,92	100	-
17231	-42,02906	-23,31578	11,00	3,00	1,00	85,00	CASCALHO		123,17	2500	-2,27
19494	-42,06652	-23,01152	67,00	17,00	16,00		AREIA SILTOSA	5,00	63,39	70	5,26
17510	-42,03928	-23,26628	94,00	4,00		2,00	AREIA	67,00	119,90	600	2,63
17072	-43,02907	-23,39227	95,00			5,00	AREIA	94,00	104,17	1700	1,38
16678	-43,00773	-23,53330	88,00			12,00	AREIA	97,00	113,34	2500	0,46
18553	-43,07746	-23,07668	95,00			5,00	AREIA		37,59	110	-
18269/18392	-43,07261	-23,10567	89,00			11,00	AREIA	18,00	37,59	760	4,71
18896	-43,08171	-23,04075	100,00				AREIA	4,00	32,63	190	5,40
17919	-42,04853	-23,17999	36,00	43,00	21,00		AREIA SILTE ARGILA		113,30	1550	5,34
19510/19533	-43,08587	-23,01066	100,00				AREIA	5,00	27,91	740	1,23
17614	-42,47113	-23,22836	98,00			2,00	AREIA	83,00	107,31	1050	-
17996	-43,06328	-23,16528	95,00	5,00			AREIA	8,00	59,73	550	3,51

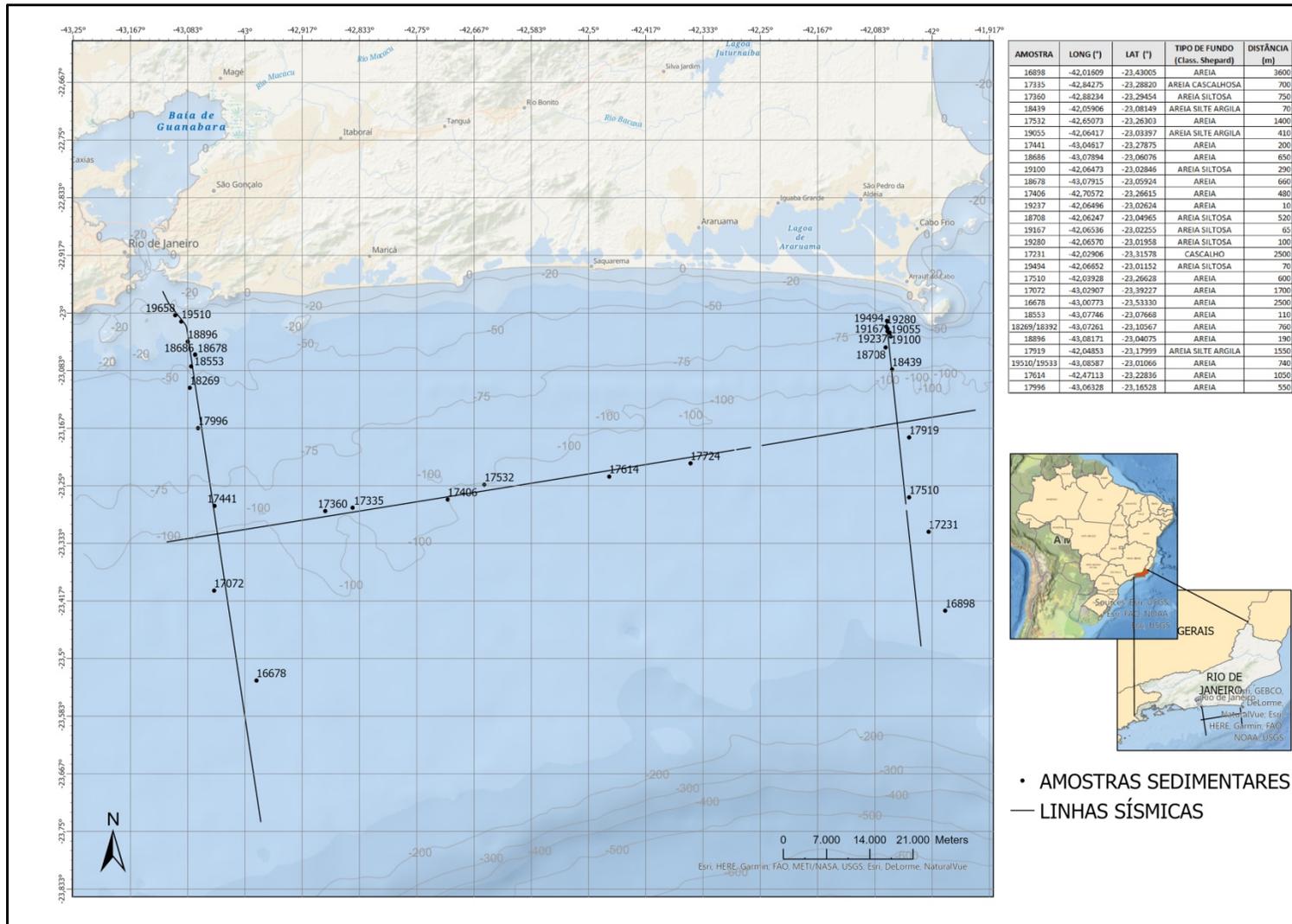


Figura 20 - Mapa de localização das amostras de fundo em relação às linhas sísmicas.

5.2. Tratamento dos Dados

As linhas sísmicas utilizadas para este trabalho ofereceram dados acústicos do sinal refletido obtidos pelo perfilamento de fundo (*Sub Bottom Profile*) com frequência de operação de 3,5kHz, gravados em formato SGY e ilustrado pela Figura 21. Os dados foram tratados pelo software KINGDOM (ISH Markit) visando à obtenção da amplitude do sinal refletido pelo fundo marinho: primeiro envelope do sinal. Pelo software também foram corrigidas inconsistências do refletor de fundo (compensação do *heave*) e a identificação do refletor de fundo. Estes valores foram correlacionados com os tipos de fundo detalhados na Tabela 3. Uma região de influência de cada amostra foi computada com um quantitativo de “pings” sísmicos mais próximos a essas amostras, então a média das amplitudes foi vinculada aos teores de sedimentos, teor de carbonato, tipo de fundo e ϕ .

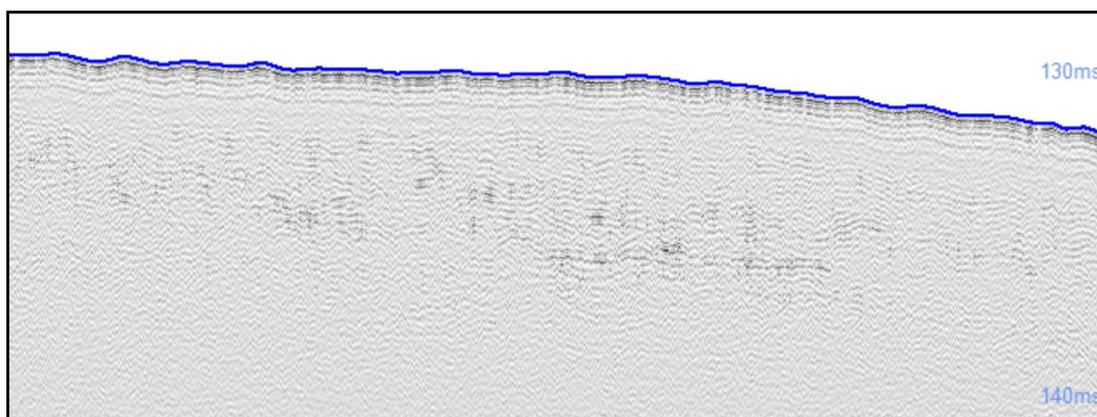


Figura 21 - Trecho do SBP referente à Linha 009, com a identificação do fundo pelo refletor azul, obtida com o aplicativo *Sub Bottom Processing* do software Hypack.

Este processamento permitiu organizar os dados e os vínculos entre os parâmetros acústicos e as amostras de fundo (parâmetros físicos, resumidos na Tabela 4), que posteriormente, através da correlação da amplitude com a impedância acústica calculada sobre as características das amostras, foram extrapolados para os demais trechos da linha sísmica, de maneira a visualizar as informações sedimentológicas ao longo da linha investigada.

Tabela 4 - Amplitude média do sinal refletido e correlação com as amostras de fundo.

AMOSTRA	LONG (°)	LAT (°)	AMPLITUDE MÉDIA	AMPLITUDE MÉDIA UTILIZADA (/100)	DESVIO PADRÃO
16898	-42,01609	-23,43005	3721,55	37,22	10,38
17335	-42,84275	-23,28820	4025,55	40,26	15,05
17360	-42,88234	-23,29454	4403,71	44,04	4,29
18439	-42,05906	-23,08149	4753,88	47,54	6,41
17532	-42,65073	-23,26303	5302,78	53,03	14,89
19055	-42,06417	-23,03397	5514,63	55,15	7,13
17441	-43,04617	-23,27875	5582,32	55,82	4,92
18686	-43,07894	-23,06076	5683,57	56,84	9,91
19100	-42,06473	-23,02846	6001,10	60,01	1,20
18678	-43,07915	-23,05924	6347,22	63,47	18,80
17406	-42,70572	-23,26615	6409,62	64,10	11,24
19237	-42,06496	-23,02624	6426,86	64,27	13,07
18708	-42,06247	-23,04965	6530,73	65,31	4,81
19167	-42,06536	-23,02255	6577,23	65,77	37,81
19280	-42,06570	-23,01958	6882,20	68,82	34,72
17231	-42,02906	-23,31578	8020,15	80,20	15,79
19494	-42,06652	-23,01152	8164,79	81,65	21,53
17510	-42,03928	-23,26628	8339,54	83,40	29,59
17072	-43,02907	-23,39227	8423,51	84,24	24,67
16678	-43,00773	-23,53330	9005,96	90,06	7,53
18553	-43,07746	-23,07668	10380,83	103,81	12,06
18269/18392	-43,07261	-23,10567	10806,35	108,06	6,46
18896	-43,08171	-23,04075	11688,63	116,89	5,84
17919	-42,04853	-23,17999	12947,76	129,48	7,23
19510/19533	-43,08587	-23,01066	13377,14	133,77	6,50
17614	-42,47113	-23,22836	14623,46	146,23	6,79
17996	-43,06328	-23,16528	15489,43	154,89	8,11

Após organizar os dados sísmicos de amplitude, exportados pelo software, percebeu-se que apresentavam alguns valores extremos, incompatíveis com a sequência de dados adjacentes. Deste modo foi realizado um descarte de valores extremamente elevados ou baixos, que resultou na remoção de aproximadamente 5% do total de amostras (pings), entretanto, o desvio padrão diminuiu de 20%.

5.2.1. Cálculo da Impedância

A impedância foi calculada para as amostras de duas maneiras independentes, a primeira delas obteve-se dados de densidade e velocidade da onda disponíveis na literatura para os tipos de sedimentos identificados na região, considerando que as amostras do BAMPETRO não dispunham dessas informações, e a partir desse valor foi calculada a impedância acústica para cada um desses tipos sedimentares, conforme a fórmula a seguir:

$$Z = \rho_0 V$$

Onde, ρ_0 é a densidade do meio e V a velocidade da onda no meio.

Nesta abordagem, os valores e suas respectivas correlações podem ser verificados na Tabela 5, onde neste caso a Impedância Calculada(a) possui fundamento em ensaios anteriores, realizados na região, ou quando não disponível, na bibliografia, conforme as fontes citadas, desse modo foi atribuído um valor de impedância para cada tipo de fundo observado na região.

Tabela 5 - Impedância calculada para os tipos de fundo identificados na região de estudo.

Impedância Calculada(a)					
TIPO DE FUNDO	VELOCIDADE CONSIDERADA (m/s)	FONTE	DENSIDADE CONSIDERADA (kg/cm ³)	FONTE	IMPEDÂNCIA CALCULADA(a) (10 ⁵ g/cm ² s)
AREIA	1660,67	Macedo 2006	1,70	Miguel Reduzino 2010	2,82
AREIA SILTOSA	1565,50	Macedo 2006	1,65	Cruz <i>et al</i> 2013	2,58
AREIA SILTE ARGILA	1582,00	Hamilton 1982	1,58	Hamilton 1982	2,50
AREIA CASCALHOSA	1836,00	Hamilton 1982	1,84	Ayres Neto <i>et al</i> 2013	3,38
SILTE	1546,50	Macedo 2006	1,57	Cruz <i>et al</i> 2013	2,43
SILTE ARENOSO	1510,33	Cruz <i>et al</i> 2013	1,67	Cruz <i>et al</i> 2013	2,52
SILTE ARGILOSO	1546,00	Hamilton 1982	1,49	Hamilton 1982	2,30
CASCALHO	1497,98	Ayres Neto <i>et al</i> 2013	1,84	Ayres Neto <i>et al</i> 2013	2,76

A segunda estratégia foi utilizar dados sobre o tamanho médio do grão, disponível nas amostras de fundo, que partir da correlação dada por AYRES NETO *et al.* (2013) para o tamanho médio do grão (ϕ) contra a impedância acústica, conforme Figura 22, obteve-se a Impedância Calculada(b).

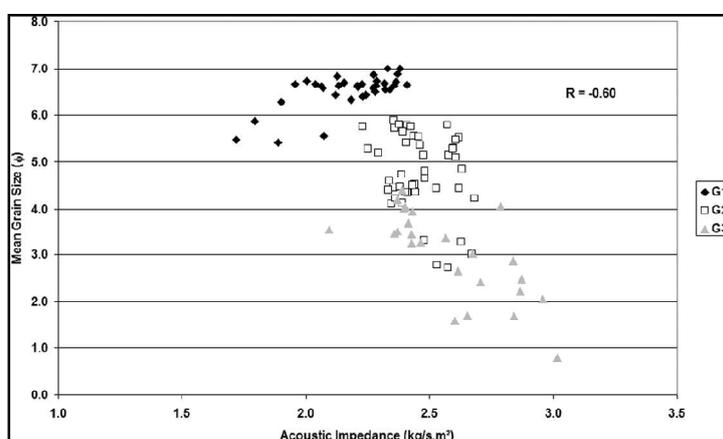


Figura 22 - Correlação da impedância acústica com o tamanho médio do grão (ϕ), adaptado de AYRES NETO *et al.* (2013).

Como o cálculo da Impedância ocorreu a partir de um dado disponível para cada amostra, foi possível atribuir para cada amostra um valor de impedância calculada, oferecendo uma maior variedade amostral entre os parâmetros correlacionados. A Tabela 6, resume os valores calculados para cada amostra, cujos valores de ϕ foram retirados das informações existentes no banco de dados das amostras.

Tabela 6 - Tabela resumo das impedâncias calculadas(b) em relação ao tamanho médio do grão (ϕ).

AMOSTRA	LONG (°)	LAT (°)	TIPO DE FUNDO	PHI (ϕ)	IMPEDÂNCIA CALCULADA(b) ($10^5 \text{ g/cm}^2\text{s}$)
18896	-43,081708	-23,040746	AREIA	5,40	2,29
19510/19533	-43,085866	-23,010659	AREIA	1,23	3,37
17335	-42,842747	-23,288204	AREIA CASCALHOSA	1,21	3,37
17360	-42,882342	-23,294543	AREIA SILTOSA	2,77	2,97
18439	-42,059059	-23,081491	AREIA SILTE ARGILA	0,89	3,46
17996	-43,063280	-23,165279	AREIA	3,51	2,78
19055	-42,064174	-23,033965	AREIA SILTE ARGILA	0,95	3,44
16898	-42,016094	-23,430054	AREIA	0,94	3,44
18269/18392	-43,072610	-23,105670	AREIA	4,71	2,47
19100	-42,064730	-23,028462	AREIA SILTOSA	5,64	2,22
17510	-42,039282	-23,266279	AREIA	2,63	3,00
18686	-43,078943	-23,060756	AREIA	-0,17	3,73
18678	-43,079152	-23,059240	AREIA	0,00	3,69
18708	-42,062467	-23,049654	AREIA SILTOSA	0,62	3,53
19167	-42,065365	-23,022547	AREIA SILTOSA	5,33	2,31
19280	-42,065697	-23,019583	AREIA SILTOSA	0,00	3,69
17231	-42,029056	-23,315781	CASCALHO	-2,27	4,27
19494	-42,066522	-23,011520	AREIA SILTOSA	5,26	2,32
17532	-42,650728	-23,263031	AREIA	1,64	3,26
17614	-42,471126	-23,228356	AREIA	0,00	3,69
17072	-43,029072	-23,392265	AREIA	1,38	3,33
16678	-43,007730	-23,533296	AREIA	0,46	3,57
17406	-42,705721	-23,266147	AREIA	1,48	3,30
18553	-43,077464	-23,076683	AREIA	0,00	3,69
17919	-42,048527	-23,179987	AREIA SILTE ARGILA	5,34	2,30
17441	-43,046168	-23,278751	AREIA	0,84	3,47
19237	-42,064955	-23,026235	AREIA	5,23	2,33

As duas abordagens utilizadas para a análise permitiu maior arranjo de comparações entre os dados físicos e sísmicos calculados e medidos.

5.2.2. Cálculo do Coeficiente de Reflexão

A partir da fórmula abaixo foi obtido Coeficiente de Reflexão de Rayleigh que foi utilizado, em complemento à impedância acústica, para correlações das propriedades acústicas medidas com as observadas, bem como na comparação das propriedades físicas e acústicas da camada sedimentar.

$$R = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$$

5.2.3. Parâmetros do meio

Para a velocidade do som na água, os gráficos apresentados na Figura 23 forneceram tal parâmetro para o cálculo da impedância da água próxima ao fundo.

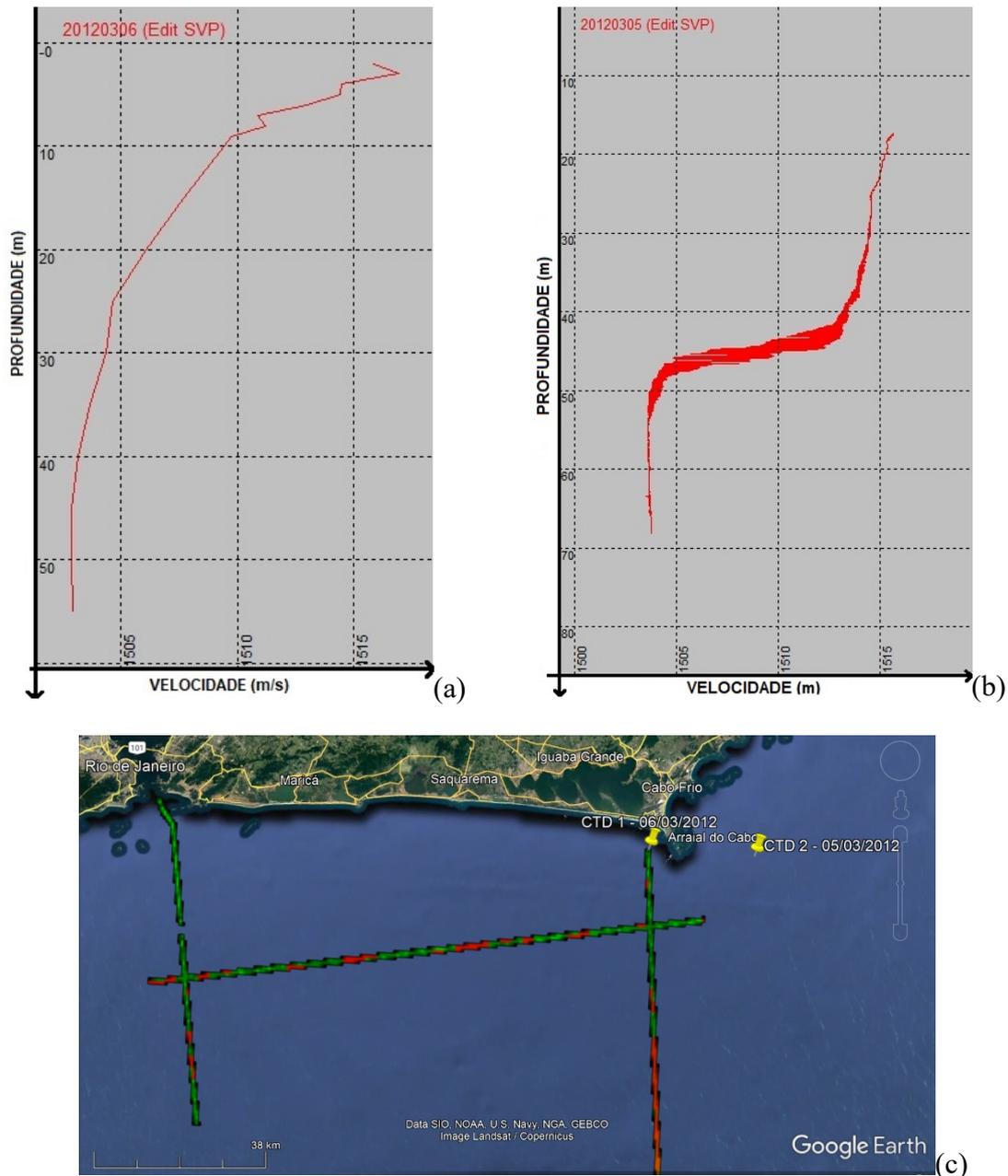


Figura 23 – Perfil de velocidade do som na água, obtido durante os levantamentos sísmicos e batimétricos. (a) SVP DIA 06/03/2012 – Ponto de Referência ($23^{\circ} 00,649' S / 042^{\circ} 03,996' W$); (b) SVP DIA 05/03/2012 Ponto de Referência ($23^{\circ} 00,592' S / 041^{\circ} 50,381' W$); e (c) mapa com a localização das amostragens.

6. RESULTADOS

Os dados apresentados nesta seção possuem algumas compatibilizações para viabilizar a análise, dentre elas:

Os valores de Amplitude estão divididos por 100, visando manter estes e os demais dados dentro de uma mesma escala gráfica;

A distância das amostras até alinha sísmica está dividida por 10;

O eixo vertical do gráfico está em escala logarítmica, permitindo a comparação visual entre os valores de diferentes atributos num único gráfico;

6.1. Considerações sobre a amplitude e fatores geográficos e batimétricos

A partir da Figura 24, é perceptível algumas considerações preliminares sobre a análise dos levantamentos realizados com intuito de tratar os dados observados dentro da normalidade:

O relativo aumento da amplitude do sinal sísmico com a diminuição da profundidade;

Uma concentração dos fundos constituídos de areia para as amplitudes mais elevadas, e fundos constituídos por siltes e argilas nas faixas mais baixas de amplitude;

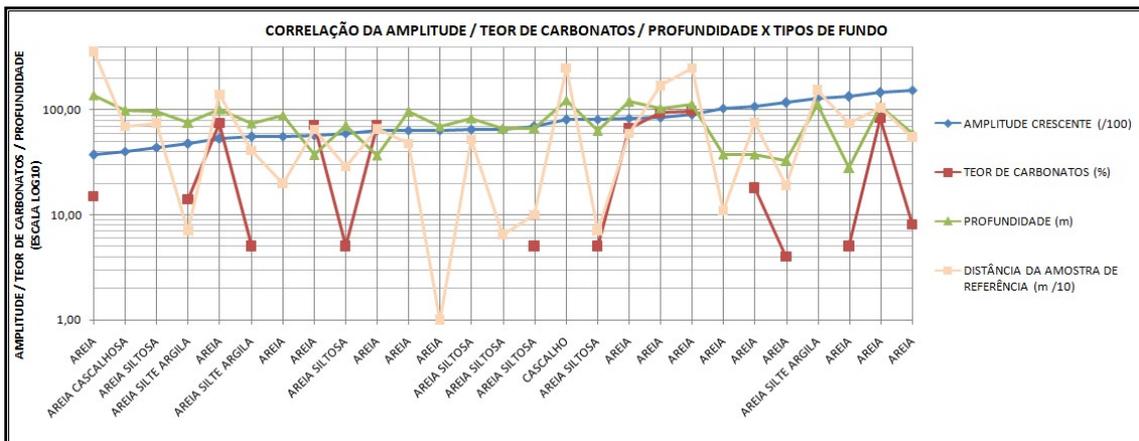


Figura 24 - Gráfico de correlação entre a amplitude das amostras sísmicas, o teor de carbonatos nas amostras de fundo, a profundidade da região de correlação e o tipo de fundo identificado.

6.2. Considerações sobre a amplitude e propriedades físicas do fundo

A partir da Figura 25, pode-se observar que as amostras de fundo correlacionadas às amplitudes mais baixas apresentam maiores teores de argila e silte em sua composição, com exceção da amostra 17919, identificada pela amplitude 129,48 e da amostra 16898, identificada pela amplitude 37,22; tais amostras foram consideradas como erro/outlier, e serão desconsideradas da conclusão e das análises qualitativas.

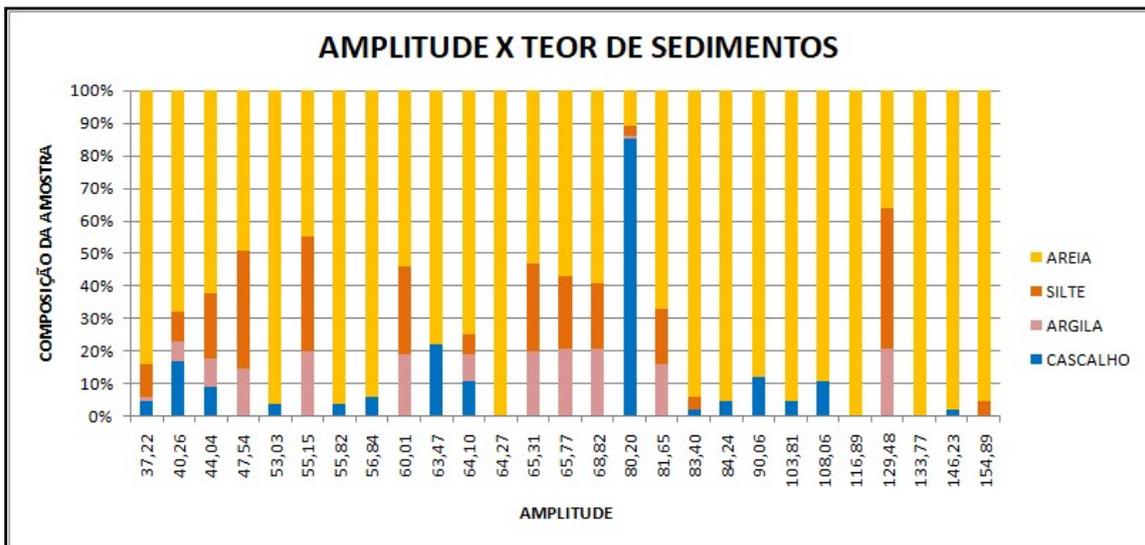


Figura 25 - Visualização da composição dos sedimentos de cada amostra em relação a amplitude do sinal refletido.

A partir da Figura 26, podem-se fazer algumas observações, dentre elas:

As amostras com teores intermediários de silte e argila ou aquelas com granulometria mais bem distribuída, e apresentam elevado teor de carbonatos, tendem a aumentar a amplitude do sinal refletido;

Percebeu-se que três amostras (17919, 18439 e 19055) contendo teores de sedimentos distribuídos de maneira mais homogênea, do tipo Areia-Silte-Argila pela classificação de Shepard (nenhum dos tipos sedimentares apresenta proporção superior a 50%), apresentam amplitudes correlacionáveis ao teor de carbonatos. Apesar de uma das amostras (amostra 17919) não possuir diretamente o conteúdo de carbonatos, outra amostra, relativamente próxima (amostra 18003) oferece uma área de influência para o teor de carbonato local superior a 50%.

As amostras com elevado teor de areia e elevado teor de carbonatos, tendem a ter sua amplitude diminuída, em comparação com as areias de baixo teor de carbonatos, com exceção da amostra 17614.

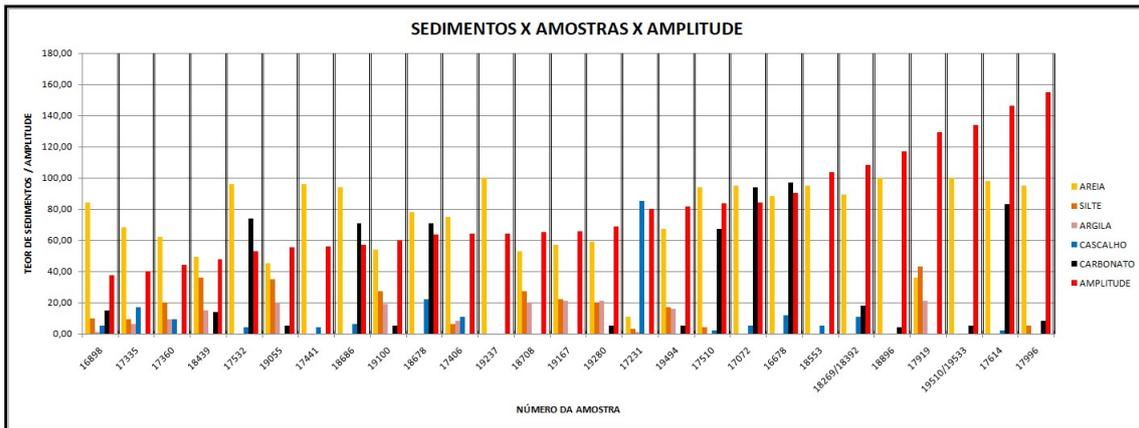


Figura 26 - Gráfico com o teor de sedimentos e carbonatos de cada amostra, ordenadas segundo o valor crescente de amplitude.

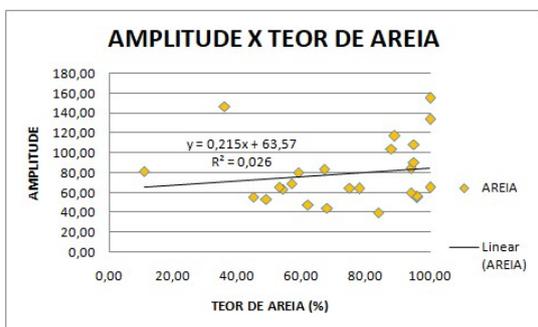


Figura 27 – Variação da amplitude em relação ao teor de areia nas amostras de fundo.

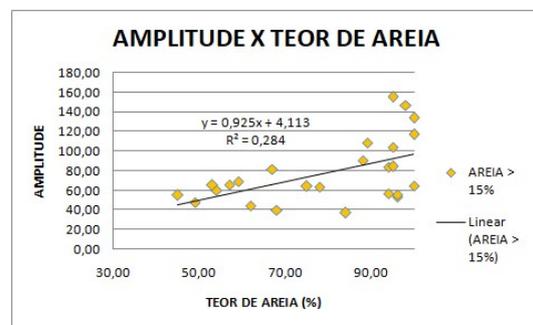


Figura 28 - Variação da amplitude em relação ao teor de areia (acima de 15%), nas amostras de fundo.

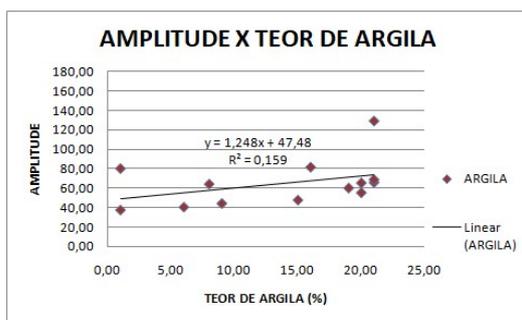


Figura 29 – Variação da amplitude em relação ao teor de argila nas amostras de fundo.

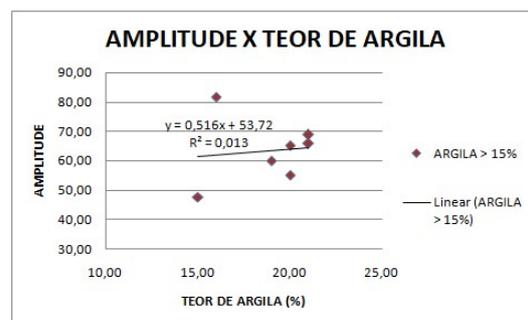


Figura 30 - Variação da amplitude em relação ao teor de argila (acima de 15%), nas amostras de fundo.

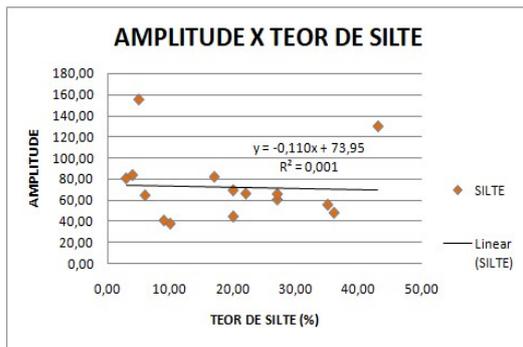


Figura 31 – Variação da amplitude em relação ao teor de silte nas amostras de fundo.

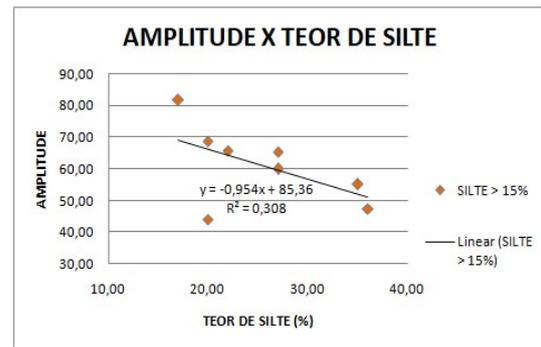


Figura 32 - Variação da amplitude em relação ao teor de silte (acima de 15%), nas amostras de fundo.

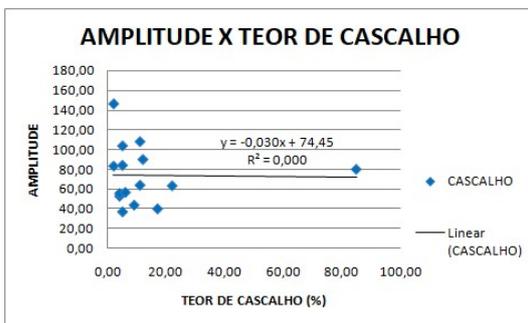


Figura 33 – Variação da amplitude em relação ao teor de cascalho nas amostras de fundo.

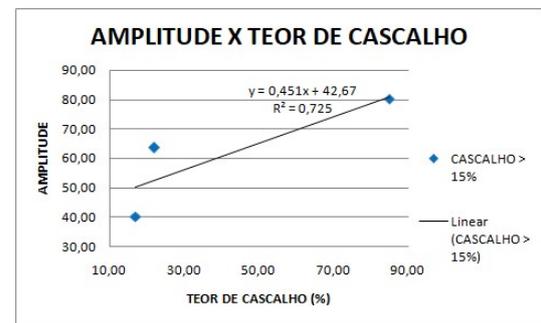


Figura 34 - Variação da amplitude em relação ao teor de cascalho (acima de 15%), nas amostras de fundo.

Nos gráficos apresentados nas Figuras Figura 27 à Figura 34, ilustra-se a interferência dos teores de cada tipo de sedimento para a amplitude refletida no fundo em duas propostas diferentes, uma delas com qualquer teor diferente de zero e outra considerando apenas concentrações maiores que 15% para o sedimento analisado nas amostras. De maneira global, percebe-se que o aumento da concentração de cada tipo sedimentar interfere de maneira particular na amplitude do sinal refletido. Para os sedimentos mais grossos, areia e cascalho, o incremento dos teores ocasiona um aumento da amplitude. Já para o silte, ocorre o inverso, a amplitude diminui para as concentrações mais elevadas.

Para o caso das amostras de argila, percebe-se pouca interferência nas variações dos teores deste sedimento em relação à amplitude do sinal, situação esta que pode estar relacionada com a baixa concentração de argila nas amostras (todas menores ou iguais a 21%), visto que o fundo da região de estudo é majoritariamente arenoso.

As baixas amplitudes identificadas em algumas amostras de sedimentos grossos, onde se deveria esperar elevada refletividade do meio caracterizada por elevada

amplitude do sinal, pode ter ocorrido pelo elevado espalhamento do sinal neste tipo de fundo (material com superfícies mais irregulares ou presença de cascalho carbonático). Neste caso a refletividade do fundo continua sendo elevada, entretanto, devido à baixa diretividade da reflexão, o sinal não é totalmente captado pelo transdutor.

6.3. Correlação das propriedades físicas com as propriedades acústicas

Considerando as abordagens apontadas no item 5.2.1, foram elaboradas as análises cabíveis para a correlação dos parâmetros físicos com os acústicos na região de influência das amostras.

Utilizando a média dos valores de amplitude atribuídos a cada amostra de fundo, foi realizada uma correlação desses valores com a impedância representativa de cada tipo de fundo identificado nas amostras, resultando nos gráficos ilustrados nas Figura 35 e Figura 36.

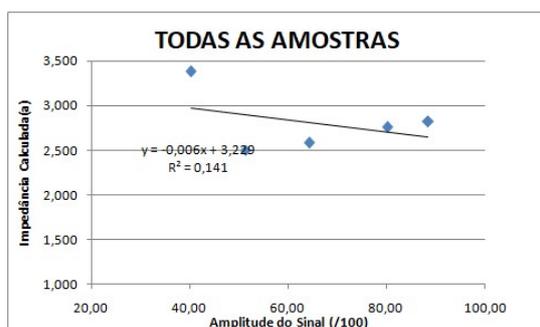


Figura 35 - Correlação entre a Amplitude do sinal e a Impedância Calculada(a) para todos os tipos de fundo identificados.

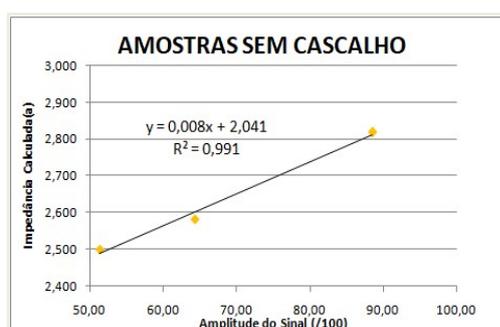


Figura 36 - Correlação entre a Amplitude do sinal e a Impedância Calculada(a) para os sedimentos sem cascalho.

A partir dos gráficos apresentados, verifica-se que a impedância calculada para as amostras que contém cascalho, não correspondem à resposta de refletividade esperada, resultado provável do baixo quantitativo de amostras com estas características ou do elevado espalhamento do sinal para este tipo de fundo. Por outro lado, segregando e analisando apenas as amostras com maior representatividade, obtemos uma correlação mais estreita entre os parâmetros analisados. Neste caso analisando apenas as amostras que tinham maior relevância amostral (Areia, Areia-Silte-Argila e Areia Siltosa – Identificadas como Sem Cascalho), foi possível obter uma equação para a correlação e extrapolação dos dados.

Para a correlação da amplitude com a Impedância Calculada(b), obtida a partir do ϕ , foi elaborado o gráfico da Figura 37. A elevada dispersão dos valores não

permitiu uma tendência que pudesse ser utilizada ou qualquer análise qualitativa dos parâmetros.

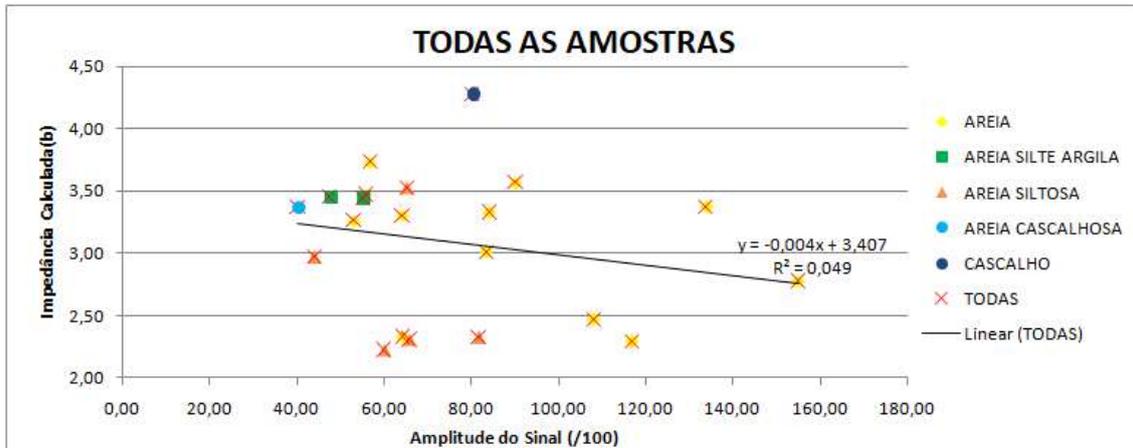


Figura 37 - Gráfico de correlação entre as Impedâncias calculadas a parti do tamanho médio do grão (ϕ) e a Amplitude do Sinal sísmico.

Foram ainda correlacionados dados de amplitude medida e coeficiente de reflexão do fundo calculado, tanto para as Impedância Calculada(a) quanto para a Impedância Calculada(b), dado pela equação identificada abaixo e ilustrada na Figura 38 e Figura 39.

$$R = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}}$$

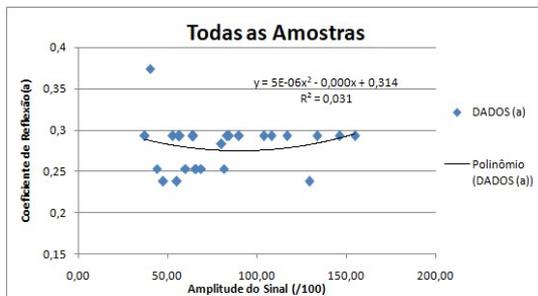


Figura 38 - Gráfico de correlação entre o Coeficiente de Reflexão de Fundo, calculado a partir da Impedância Calculada(a), e a Amplitude do Sinal.

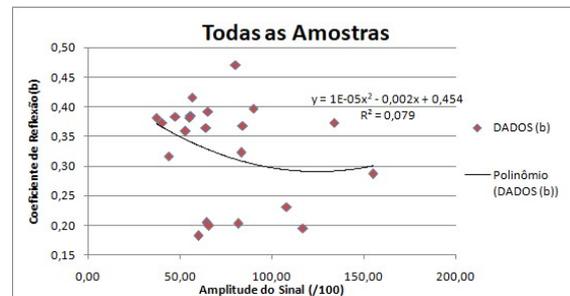


Figura 39 - Gráfico de correlação entre o Coeficiente de Reflexão de Fundo, calculado a partir da Impedância Calculada(b), e a Amplitude do Sinal.

As amostras foram avaliadas quando ao teor de carbonatos, conforme Figura 40, entretanto, devido ao baixo número de amostras disponíveis e a dispersão entre elas, nenhuma consideração direta foi verificada.

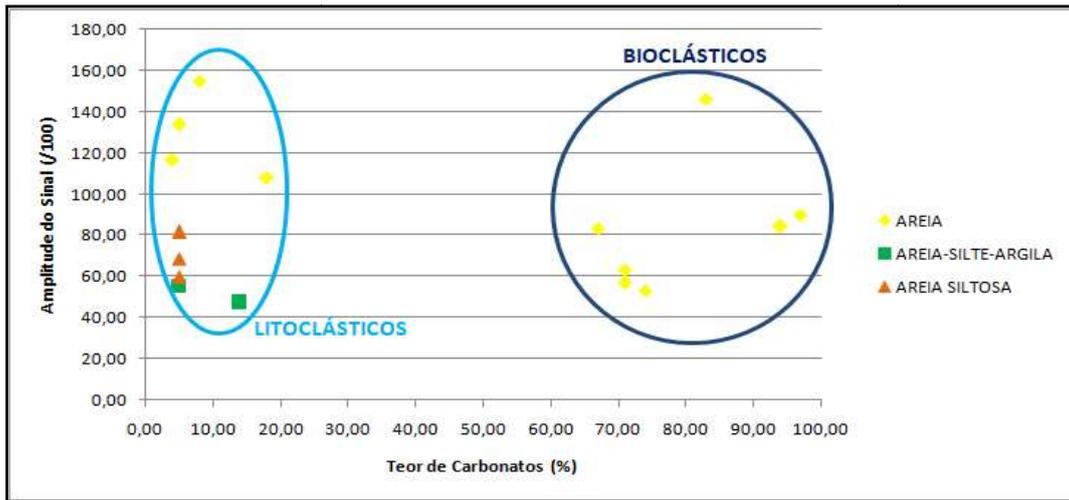


Figura 40 - Correlação da Amplitude do Sinal e o Teor de Carbonatos, levando em consideração o teor de carbonato nas amostras (foram consideradas apenas as amostras que possuíam a informações sobre o teor de carbonatos).

Considerando que os valores de reflexão de fundo são originados a partir da Impedância, sob uma análise que leva em consideração os teores de carbonatos de cálcio nas amostras e a Classificação Larssonneur, ilustradas na Figura 41, pode-se verificar que os sedimentos Litoclásticos apresentam um comportamento dentro do esperado entre o coeficiente de reflexão e a amplitude.

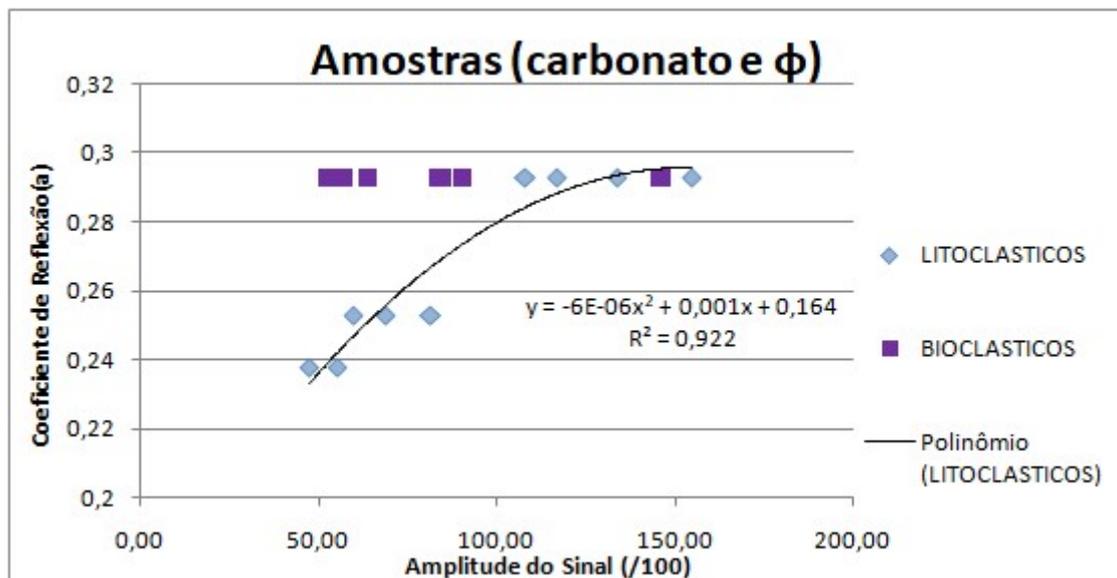


Figura 41 - Correlação do teor de carbonato e o coeficiente de reflexão calculado(a), separados quanto a Classificação de Larssonneur (Litoclástico < 50% < Bioclástico).

A variabilidade das respostas acústicas pela refletividade do fundo identifica a necessidade de cuidados especiais para os conceitos de intensidade e espalhamento do

sinal refletido pelo fundo marinho. A banda de frequência 1-15 kHz cria circunstâncias de interação com os fundos mais rugosos, por estes provocarem maior espalhamento sinal acústico, ocasionando queda na intensidade do sinal captada pelo receptor/transdutor nos sistemas de comunicações.

6.4. Extrapolação dos dados e correlação com o tipo de fundo

Após correlacionar qualitativamente as propriedades acústicas com as propriedades físicas do fundo marinho, foi realizada uma extrapolação dessa correlação para os demais valores de amplitude ao longo da linha sísmica a partir da reta identificada na Figura 36, obtendo-se os parâmetros da Tabela 7.

$$Z = 0,008A + 2,041$$

Onde: Z é a impedância calculada a partir da Amplitude (A), medida pela investigação sísmica.

Tabela 7 - Faixa de valores das Impedâncias correlacionadas aos Tipos de Fundo.

TIPO DE FUNDO	IMPEDÂNCIA MÍNIMA (10 ⁵ g/cm ² s)	IMPEDÂNCIA MÁXIMA (10 ⁵ g/cm ² s)
SILTE ARGILOSO	2,30	2,37
SILTE (LAMA)	2,43	2,46
AREIA-SILTE-ARGILA	2,50	2,51
SILTE ARENOSO	2,52	2,55
AREIA SILTOSA (LAMOSA)	2,58	2,67
CASCALHO	2,76	2,79
AREIA	2,82	3,06
AREIA CASCALHOSA	3,38	3,48

O resultado desta extrapolação pode ser observado no mapa da Figura 42, que ilustra os tipos de fundo através dos valores de impedância calculada (conforme a metodologia identificada por “a”) para os diversos tipos de fundo existentes na região, cuja extrapolação foi realizada a partir da correlação dos dados.

Para uma melhor verificação dos valores obtidos para a classificação de fundo, resultado da correlação das propriedades acústicas para obtenção das propriedades físicas do fundo marinho, foi elaborado um comparativo entre o resultado e o mapa apresentado por FIGUEIREDO JÚNIOR e MADUREIRA (2004), ilustrados na Figura 43.

Com este comparativo, pode-se perceber que mesmo com as limitações das quantidades de amostras utilizadas neste estudo e da grande variabilidade da resposta

sísmica para um mesmo parâmetro físico (ou vice-versa), existem significativos pontos correlacionáveis do resultado com o mapa de referência.

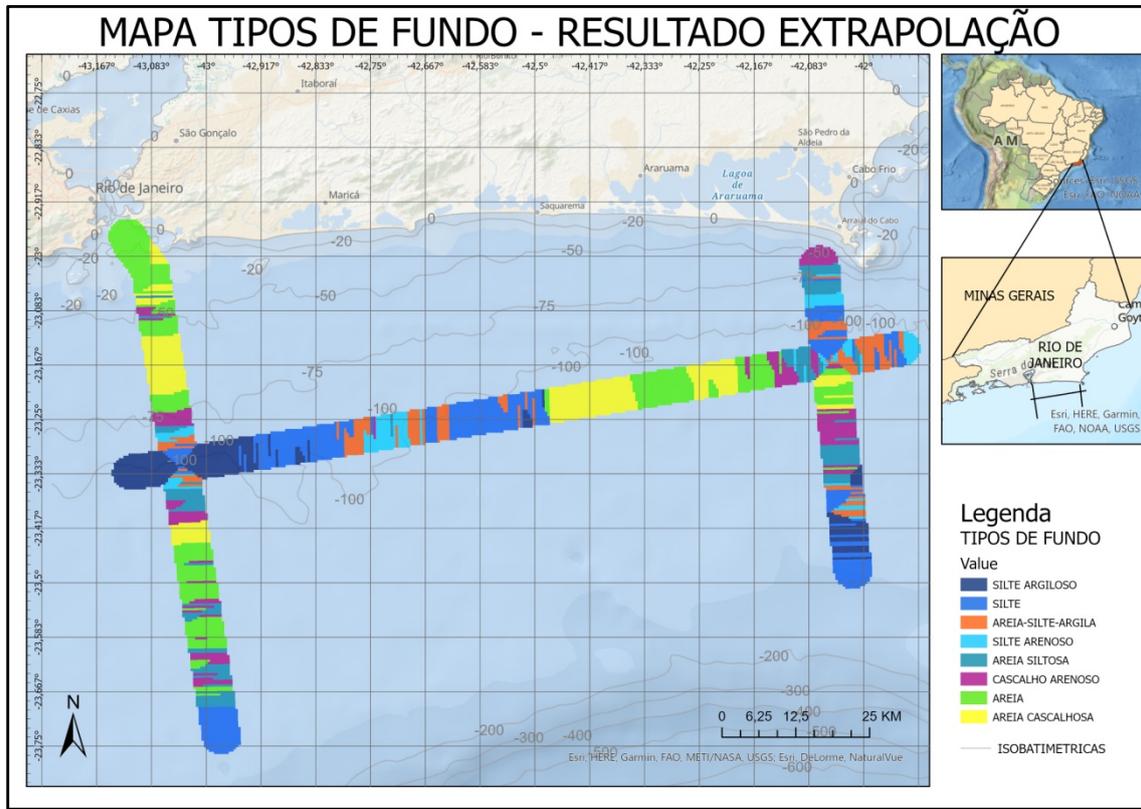


Figura 42 - Resultado dos tipos de fundo obtidos a partir da correlação da amplitude do sinal acústico com os tipos de fundo através dos valores de impedância.

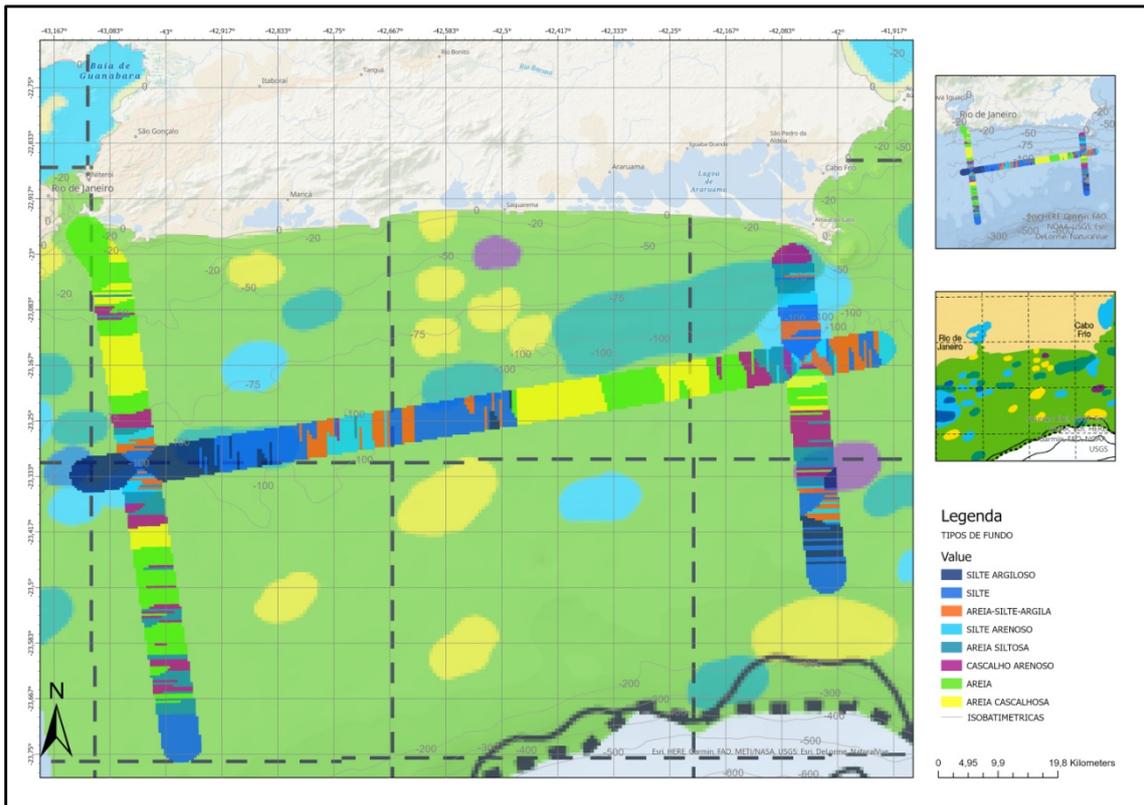


Figura 43 - Sobreposição do levantamento elaborado neste estudo com o mapa existente na bibliografia de referência (a legenda atende ambos os mapas, considerar que o mapa comparativo está parcialmente transparente sob o mapa comparado, diminuindo a intensidade das cores de referência).

7. DISCUSSÃO

Os resultados identificados neste estudo foram, em grande parcela, alinhados com a bibliografia estudada. Os pontos de maior relevância serão identificados neste capítulo visando melhor respaldo técnico dos resultados obtidos.

O decaimento da amplitude do sinal refletido com o aumento da profundidade, mesmo que pouco sensível nos resultados deste trabalho pela relativa baixa profundidade da região investigada, foi também percebida em SZUMAN *et al.* (2006), que atribuiu à influência da dispersão esférica do sinal acústico ao se aumentar a profundidade, logo, uma menor quantidade de energia seria refletida pelo trecho de fundo imageado em cada “ping” (*large footprint*). Pelo mesmo autor foram percebidas varias hipérboles de difração para o sinal do SBP, esta característica pode ser observada no presente trabalho pelos elevados valores de desvio padrão da amplitude.

As correlações encontradas neste trabalho para as amplitudes e as características físicas dos sedimentos através da impedância acústica também foram observadas em DAVIS *et al.* (2002) e AYRES NETO *et al.* (2016). O aumento da amplitude do sinal refletido com o aumento da impedância calculada(a) para o tipo de fundo constituíram o parâmetro de correlação das medições acústicas em características físicas, resultando em um “mapa” sedimentológico para a região a partir da resposta sísmica levantada ao longo da linha.

Para a segunda metodologia de correlação utilizada, percebeu-se a dificuldade em alinhar os parâmetros físicos com a resposta acústica esperada. Neste caso os dados de ϕ foram correlacionados por um parâmetro obtido por AYRES NETO *et al.* (2013) para calcular a impedância (conforme a estratégia de calculo “b”), situação que pode ter ocasionado imprecisão na correspondência entre impedância e tamanho médio do grão pelos limites amostrais ou pela questão da localização e representatividade das amostras utilizadas pelo trabalho de referência, que considerou amostras além da plataforma continental. Além disso, conforme descrito por HAMILTON (1969a), as características de velocidade e densidade são mais precisas que o tamanho médio do grão para a obtenção da impedância acústica. Também enfatizado por DAVIS *et al.* (2002), quanto melhor a qualidade dos parâmetros locais utilizados na predição das rotinas de inversões alinhados com levantamentos acústicos de boa qualidade, melhores os resultados.

A variação do sinal refletido em relação à concentração dos diferentes tipos sedimentares nas amostras de referência é largamente percebida na literatura, entretanto com uma abordagem diferente da utilizada neste trabalho. Trabalhos como os de HAMILTON (1970), RICHARDSON e BRIGGS (1993) e GARLAN *et al.* (2015), se utilizam, principalmente, da variação da porosidade do sedimento, e correlacionam esta com as características acústicas. Neste trabalho não foi possível utilizar este parâmetro pela indisponibilidade do mesmo nas amostras.

Não foram consideradas as perdas do espalhamento ocasionado pela rugosidade da camada sedimentar do fundo marinho, dado que apenas a parcela do sinal que chegava ao receptor foi utilizada para as correlações. Um ponto importante quanto à sistemática de obtenção dos dados acústicos pelo SBP é a característica da interação do tipo de onda com a camada sedimentar e sua rugosidade (SZUMAN *et al.*, 2006). Outro ponto de vista seria o fenômeno abordado por CLAY (1966), cuja interferência de parcelas coerente e incoerente podem ter significativa influência na diretividade da

reflexão de fundo, assim como a morfologia do sedimento de fundo, que em determinadas condições em fundos carbonáticos, incrementa a rugosidade superficial e conseqüentemente o espalhamento. Dada a elevada resolução desse equipamento, a rugosidade do fundo pode ter provocado excessivo espalhamento do sinal que não retornou para o transdutor e não contribuiu com a amplitude medida, conseqüentemente distorcendo a capacidade de refletividade do sedimento, principalmente para os mais grossos, conforme apontado por URICK (1979). Esta situação pode corroborar com a existência de alguns *outliers* nos levantamentos utilizados por este trabalho.

Ao considerarmos a utilização da acústica para comunicação submarina, os fatores discutidos no parágrafo anterior podem ter correlação com as influências abordadas por MAIA (2017) e JENSEN *et al* (2011), dado que, mesmo para uma incidência vertical (ângulo de incidência de 90° com a horizontal), já se percebem efeitos do espalhamento do sinal ao interagir com o fundo, entendimento dado à elevada variação nos valores de amplitude registrada ao longo da linha sísmica, indicando a necessidade de maior detalhamento para as características do fundo para o melhor entendimento do comportamento do sinal nas comunicações.

Nos comparativos que levaram em consideração o teor de carbonato de cálcio, a baixa taxa de amostras com tal informação bem como a disparidade entre as os valores resultantes da correlação realizada, não permitiram expandir a influência do teor de carbonatos na refletividade do fundo, pois apenas os sedimentos com baixo teor de carbonato tiveram o comportamento esperado, aumento da amplitude para coeficientes de refletividade mais elevados. GARLAN *et al.*, (2015) apontaram que a interferência do carbonato de cálcio nas amostras são fatores de significativa importância para a velocidade do som nos sedimentos, entretanto, ainda não existe um consenso sobre a direção dessa interferência, considerando que não só o teor de carbonato é relevante, mas também sua morfologia, tamanho e porosidade.

Ainda no estudo desenvolvido por GARLAN *et al.*, (2015), assim como o carbonato de cálcio, a assimetria (*skewness*) também possui influência nos parâmetros acústicos, neste âmbito podem ser analisadas as amostras classificadas como Areia-Silte-Argila, de maneira a justificar a grande variabilidade das amplitudes em regiões com esse tipo de composição sedimentar.

O resultado da correlação permitiu a plotagem dos dados em um mapa, o qual foi comparado satisfatoriamente com o mapa apresentado por FIGUEIREDO JÚNIOR e MADUREIRA (2004). O mapa de referência foi obtido por correlação entre grandezas físicas e grandezas acústicas, estas últimas computadas pela reflexão acústica do fundo a partir de levantamentos de eco-sonda Simrad EK500 operando na frequência de 38 kHz, valorizando as diferentes abordagens do problema que encontraram resultados semelhantes. A partir do banco de amostra BAMPETRO, DIAS e MEDEIROS (2005) também realiza um mapa de fácies sedimentares, entretanto com informações obtidas diretamente das amostras processadas pelo sistema SAG – Sistema de Análise Granulométrica, que define aproximadamente 48 tipos de sedimentos, em função da granulometria e dos teores de carbonato. Estas correlações demonstram a capacidade de métodos acústicos de interpretar, com relativa precisão, as características físicas do fundo marinho bem como a validade do banco de dados para tais correlações.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram projetadas propriedades físicas do fundo marinho, quanto à classificação dos sedimentos, a partir de respostas acústicas obtidas por levantamentos sísmicos. O mapa ilustrado na Figura 43 demonstra, com certa fidelidade, uma boa correlação entre os parâmetros de amplitude do sinal e impedância acústica.

A dificuldade em obter das amostras de referência as características de densidade ou porosidade e velocidade da onda para a camada sedimentar do fundo, direcionou o trabalho para um comparativo mais indireto entre os parâmetros físicos e sísmicos, aumentando a imprecisão das inversões, diferente do realizado por RICHARDSON e BRIGGS (1993) e GARLAN *et al.* (2015).

A grande variabilidade dos tipos de fundo na região e a elevada sensibilidade do receptor acústico resultaram num mapa bastante fragmentado quanto às propriedades ilustradas no mapa.

Considerando que as amostras provenientes do BAMPETRO possuíam informações laboratoriais e visuais das amostras, e que algumas delas continham análises mais detalhadas das características físicas e composição, tais como: (presença de conchas, corais, fragmentos de rocha, minerais pesados, algas etc), estas condicionantes não foram consideradas na análise tampouco sua influência na amplitude

do sinal refletido. Tais ocorrências foram pontuais e não representavam influência nas classificações sedimentares utilizadas como parâmetro.

Considerando o banco de dados utilizado e a tentativa de maior correlação possível entre os parâmetros físicos e os parâmetros acústicos, foram utilizadas todas as amostras disponíveis para a região, entretanto, obedecendo um critério de distância máxima para a representatividade das amostras em relação ao ponto cuja resposta sísmica foi medida. Apesar das amostras não serem contemporâneas ao levantamento sísmico, a análise resultou em um bom comparativo entre as grandezas. Entretanto, acredita-se que a utilização de amostras obtidas junto aos levantamentos sísmicos ofereceria melhor significância nas correlações.

Os resultados das análises bem como as extrapolações realizadas para as linhas sísmicas foram ilustradas em um mapa, este mapa não teve a intenção de representar uma área de influência para os dados, foi apenas o recurso visual utilizado para a análise dos resultados obtidos sobre a linha sísmica.

9. CONCLUSÃO

Foi possível realizar a correlação dos dados acústicos a partir de amostras pontuais ao longo da área investigada bem como a extrapolação das informações para toda a linha sísmica.

Foi possível elaborar um mapa sedimentar a partir da correlação obtida entre os dados sísmicos e as características físicas do fundo, oferecendo uma abordagem complementar para o trabalho desenvolvido por DIAS e MEDEIROS (2005) e FIGUEIREDO JÚNIOR e MADUREIRA (2004).

A influência do teor de carbonatos mostrou-se inconclusiva, sendo possível apenas realizar uma análise para as amostras Litoclásticas, que tiveram comportamento dentro do esperado entre impedância acústica e intensidade do sinal refletido. As amostras Bioclásticas, não apresentaram diversidade suficiente nos parâmetros físicos para uma análise neste trabalho.

9.1. Proposta para Trabalhos Futuros

A análise dos parâmetros de refletividade, perdas e absorção do sinal acústico pelo fundo marinho poderiam ser melhor compreendidas considerando uma análise

absoluta entre a energia transmitida e a energia captada pelo transdutor sísmico, favorecendo uma comparação direta entre o sinal emitido e o sinal refletido após ser modificado pela interação com o fundo.

Adicionalmente ao item anterior, expandir a análise para outras frequências não amparadas nesse estudo, dentro da banda 1 – 15 kHz, que também possuem interação com a rugosidade do fundo marinho.

A influência do teor de carbonatos das amostras no comportamento acústico do sedimento não pôde ser devidamente analisada neste trabalho, entretanto elas parecem desempenhar um relevante papel neste fenômeno, principalmente para aquelas com elevado teor de carbonatos. Sugere-se analisar estas interações com maior propriedade, visto que esta característica possui influência na rugosidade do fundo e conseqüentemente na refletividade e no espalhamento do sinal pelo fundo, condição relevante para a comunicação submarina.

Aumentar a densidade de dados, tanto sísmico quanto amostral, para viabilizar uma análise qualitativa, com suporte em tratamento estatístico, dos dados utilizados na compilação das correlações entre as grandezas físicas e acústicas, possibilitando ainda a elaboração de um mapa com extrapolação para uma área.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTEWELL, P. B.; RAMANA, Y. V. **Wave Attenuation and Internal Friction as Functions of Frequency in Rocks.** Geophysics, vol. XXXI, no 6, p. 1049–1056, Dezembro 1966.

AYRES, A.; THEILEN, F. **Preliminary laboratory investigations into the attenuation of compressional and shear waves on near-surface marine sediments.** Geophysical Prospecting, vol. 49, no. 1, p. 120–127, 2001.

AYRES NETO, A.; DE TEIXEIRA MENDES, J. N.; DE SOUZA, J. M. G.; REDUSINO, M.; LEANDRO BASTOS PONTES, R. **Geotechnical Influence on the Acoustic Properties of Marine Sediments of the Santos Basin, Brazil.** Marine Georesources and Geotechnology, vol. 31, no. 2, p. 125–136, 2013.

AYRES NETO, A.; MOTA, B. B.; BELEM, A. L.; ALBUQUERQUE, A. L.; CAPILLA, R. **Seismic peak amplitude as a predictor of TOC content in shallow marine sediments.** Springer, vol. 36, no. 5, p. 395–403, Abril 2016.

BAPTISTA NETO, J. A.; ABELIN PONZI, V. R.; SICHEL, S. E. **Introdução à Geologia Marinha.** 1st ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004. 279 p. - ISBN: 85-7193-098-8.

BARTOLO, L. Di. **Modelagem Sísmica Anisotrópica Através do Método das Diferenças Finitas Utilizando Sistemas de Equações em Segunda Ordem.** Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE/Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro: 2010. p. 222. Tese de Doutorado.

BIOT, M. A. **Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porus Media.** Journal of Applied Physics, USA, vol. 33, no. 4, p. 1482–1498, Abril 1962.

BIOT, M. A. **Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid.** Journal of the Acoustical Society of America, USA, vol. 28, no. 2, p. 168–178, 1956.

BOVIO, E.; CECCHI, D.; BARALLI, F. **Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations.** Annual Reviews in Control, vol. 30, p. 117–130, Novembro 2006.

CARCIONE, J. M.; HERMAN, G. C.; TEN KROODE, a. P. E. **Y2K Review**

Article: Seismic modeling. *Geophysics*, vol. 67, no. 4, p. 1304–1325, 2002. .

JARDIM, P. CEPEMAR, **Campanha de Levantamento Geofísico com Sparker e Sub-Bottom Profiler e Amostragem do Fundo Oceânico com Piston Corer Área IV: Plataforma Continental Sudeste do Brasil**. Vitória-ES: CEPEMAR, 2012, 23 p. (Relatório Operacional - CPM MS RT 002/12))

CLAY, C. S. **Coherent Reflection of Sound from the Ocean Bottom**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 71, no. 8, p. 2037-2046, Abril 1966.

CUNHA, P. E. M. **Estrategias eficientes para RTM Pre Empilhamento 3D em Profundidade pelo Método das Diferenças Finitas**. 1997. 134 f. Dissertação de Mestrado, Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal da Bahia, Salvador-BA, Dezembro 1997.

DAVIS, A.; HAYNES, R.; BENNELL, J.; HUWS, D. **Surficial seabed sediment properties derived from seismic profiler responses**. *Marine Geology*, vol. 182, p. 209–223, 2002.

DIAS, G. T. de M.; MEDEIROS, M. F. de. **Proposta de Metodologia para a Elaboração de Cartas Sedimentológicas**. ABEQUA X - Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, p. 7, Guarapari - ES, 2005.

FIGUEIREDO JÚNIOR, A. G.; MADUREIRA, L. S. P. **Topografia, composição, refletividade do substrato marinho e identificação de províncias sedimentares na região Sudeste-Sul do Brasil**. São Paulo: Instituto Oceanográfico – USP (Série documentos Revizee: Score Sul), 2004 - ISBN 85-98729-07-8.

FREITAG, L.; BALL, K.; PARTAN, J.; KOSKI, P.; SINGH, S. **Long range acoustic communications and navigation in the Arctic**. OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington, 2015. p. 1-5.

FURQAN ALI, M.; NALIN JAYAKODY, D. K.; PONNIMBADUGE PERERA, T. D.; SRINIVASAN, K.; SHARMA, A.; KRIKIDIS, I. **Underwater Communications: Recent Advances**. International Conference on Emerging Technologies of Information and Communications (ETIC), March, 2019.

GARLAN, T.; KÖNG, E.; GUYOMARD, P.; MATHIAS, X.; ZARAGOSI, S. **The sedimentary and acoustic properties of deep sediments from different oceans**. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 37, September, 2015. p. 14–23.

GORGAS, T. J.; WILKENS, R. H.; FU, S. S.; NEIL FRAZER, L.; RICHARDSON, M. D.; BRIGGS, K. B.; LEE, H. **In situ acoustic and laboratory ultrasonic sound speed and attenuation measured in heterogeneous soft seabed sediments:** Eel River shelf, California. *Marine Geology*, vol. 182, 2002. p. 103–119.

GUSSEN, C. M. G.; DINIZ, P. S. R.; CAMPOS, M. L. R.; MARTINS, W. A.; COSTA, F. M.; GOIS, J. N. A **Survey of Underwater Wireless Communication Technologies.** *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 31, no. 1, 2016. p. 242–255.

HAGEN, P. E.; STØRKERSEN, N.; MARTHINSEN, B. E.; STEN, G.; VESTGÅRD, K. **Rapid environmental assessment with autonomous underwater vehicles - Examples from HUGIN operations.** *Journal of Marine Systems*, vol. 69, Fevereiro 2008. p. 137–145.

HAMILTON, E. L. **Compressional-Wave Attenuation in Marine Sediments.** *Geophysics*, vol. 37, no. 4, Agosto 1972. p. 620–646.

HAMILTON, E. L. **Elastic properties of marine sediments.** *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, no. 2, Janeiro 1971, p. 579–604.

HAMILTON, E. L. **Low Sound Velocities in High-Porosity Sediments.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 28, no. 1, Janeiro 1956, p. 16–19.

HAMILTON, E. L. **Sound attenuation as a function of depth in the sea floor.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 59, no. 3, Março 1976, p. 528–535.

HAMILTON, E. L. **Sound Velocity, Elasticity, and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific: Vol. I - Sediments Properties, Environmental Control, and Empirical Relationships.** Naval Undersea Research and Development Center, Outubro 1969a.

HAMILTON, E. L. **Sound Velocity, Elasticity, and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific: Vol. II - Elasticity and Elastic Constants.** Naval Undersea Research and Development Center, Outubro 1969b.

HAMILTON, E. L. **Sound Velocity, Elasticity, and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific: Vol. III - Prediction of in Situ Properties.** Naval Undersea Research and Development Center, Outubro 1969c.

HAMILTON, E. L. **Sound Velocity and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific.** Journal of Geophysical Research, vol. 75, no. 23, Agosto 1970. p. 4423-4446.

HAMILTON, E. L.; SHUMWAY, G.; MENARD, H. M.; SHIPEK, C. J. **Acoustic and Other Properties of Shallow-Water Sediments off San Diego.** The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 28, no. 1, Janeiro 1956. p. 1–15.

HANSEN, C. H. **Fundamentals of Acoustics.** Department of Mechanical Engineering - University of Adelaide, Austrália, 1951.

HEIDEMANN, J.; YE, W.; WILLS, J.; SYED, A.; LI, Y. **Research challenges and applications for underwater sensor networking.** IEEE Wireless Communications and Networking Conference - WCNC, 2006. p. 228–235.

JACKSON, D. R.; RICHARDSON, M. D. **High-Frequency Seafloor Acoustics.** Springer Science+Business Media, Nova York, 2007, Monograph Series in Underwater Acoustics ISBN-10: 0-387-34154-4, ISBN-13: 978-0-387-34154-5.

JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W.A.; PORTER, M. B.; SCHMIDT, H. **Computational Ocean Acoustics**, 2nd ed. Springer - 2011. ISBN 978-1-4419-8677-1

JOSIAS, J. da S. **Migração Reversa no Tempo na Determinação das Amplitudes de Reflexão em Função do Ângulo de Incidência.** Universidade Federal do Rio De Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Rio de Janeiro, 2009. p. 194. Tese de Doutorado.

KATSNELSON, BORIS. PETNIKOV, VALERY. LYNCH, J. **Fundamentals of Shallow Water Acoustics.** Springer Science+Business Media, Nova York, 2007, Monograph Series in Underwater Acoustics, 2012. ISBN 978-1-4419-9776-0

KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics.** 4th ed. John Wiley & Sons, Inc, 2000 - ISBN 0-471-84789-5.

KNOPOFF, L.; MACDONALD, G. J. F. **Attenuation of small amplitude stress waves in solids.** Reviews of Modern Physics, vol. 30, no. 4, Outubro 1958. p. 1178–1192.

KUPERMAN, W. A.; ROUX, P. **Underwater Acoustics.** Springer Handbook of Acoustics. Springer, Nova York, Janeiro 2007. p. 149–204.

LIU, L.; ZHOU, S.; CUI, J. H. **Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks.** *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 8, no. 8, Julho 2008. p. 977-994.

LOUZA, F. B.; DEFERRARI, H. A. **Superimposed training low probability of detection underwater communications.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 148, no. 3, Setembro 2020. p. 273-278.

MACEDO, H. C. **Análise da Propagação de ondas compressãois (P) em sedimentos marinhos.** Universidade Federal Fluminense - Niterói/RJ - 2006. Dissertação de Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha. p. 98.

MAIA, L. P. **Environmental model-based time-reversal underwater communications.** University of Algarve - Faculty of Sciences and Technology - 2017. Tese de Doutorado. p. 155.

MC DONAL, F. J.; ANGONA, F. A.; MILLS, R. L.; SENGBUSH, R. L.; VAN NOSTRAND, R. G.; WHITE, J. E. **Attenuation of Shear and Compressional Waves in Pierre Shale.** *Geophysics*, vol. 23, no. 3, Julho 1958. p. 421-439.

PEKERIS, C. L. **Theory of propagation of explosive sound in shallow water.** *Propagation of Sound in the Ocean*, Worzel, J. L., Ewing, M., Pekeris, C. L., 2nd ed. Outubro 1948.

RICHARDSON, M. D.; BRIGGS, K. B. **On the use of acoustic impedance values to determine sediment properties.** *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 15, no. 2, 1993. p. 15–24.

SAVAGE, J. C. **Attenuation of Elastic Waves in Granular Mediums.** *Geophysical Research*, vol. 70, no. 16, Agosto 1965. p. 3935-3942.

SCHLEE, J. **Atlantic Continental Shelf and Slope of the United States - Sediment Texture of the Northeastern Part.** United States Department of the Interior, Washington - DC, 1973. Geological Survey Professional Paper. p. 164.

SHEPARD, F. P. **Nomeclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios.** *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 24, no. 3, Setembro 1954. p. 151–158.

SONG, A.; BADIEY, M. **Time reversal acoustic communication for multiband transmission.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 4, Abril 2012. p. 283–288

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

STOJANOVIC, M.; PREISIG, J. **Underwater Acoustic Communication Channels: Propagation Models and Statistical Characterization.** IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 1, Janeiro 2009. p. 84–89.

SZUMAN, M.; BERNDT, C.; JACOBS, C.; BEST, A. **Seabed characterization through a range of high-resolution acoustic systems - A case study offshore Oman.** Marine Geophysical Research, vol. 27, no. 3, 2006. p. 167–180.

URICK, R. J. **Sound propagation in the sea.** Defense Advanced Research Projects Agency, Washington, D.C., 1979.

VIO, R. P. **Improved UUV positioning using acoustic communications and a potential for real-time networking and collaboration.** Naval Postgraduate School - Monterey - CA, 2017.

WENTWORTH, C. K. **A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments.** The University of Chicago Press Journals - Journal of Geology, vol. 30, no. 5, Julho-Agosto 1922. p. 377–392

XAVIER, F. C.; LOURENÇO, F. M. G.; SIMÕES, M. V. da S.; FERNANDES, H. dos S.; ALBUQUERQUE, R. N. **Projeto de Propagação Acústica Submarina - PROPENERG Desenvolvimento de Banco de Dados: Ruídos Ambientais e Parâmetros Geoacústicos Submarinos.** Revista A Ressurgência, 2015. p. 12–18.