

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA**

Marcus Vinícius Carpes Barão

**Desenvolvimento do procedimento metodológico da
Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo**

Florianópolis

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA**

Marcus Vinícius Carpes Barão

**DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO
METODOLÓGICO DA OCEANOGRAFIA SÍSMICA EM DADOS
DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Oceanografia.

Orientador:

Prof. Dr. Guillaume François Gilbert
Barrault

Co-orientador:

Prof. Dr. Antonio Henrique da
Fontoura Klein

Florianópolis

2017

Barão, Marcus Vinicius Carpes

Desenvolvimento do procedimento metodológico da Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo / Marcus Vinicius Carpes Barão ; orientador, Guillaume François Gilbert Barrault, coorientador, Antonio Henrique da Fontoura Klein, 2017. 234 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2017.

Inclui referências

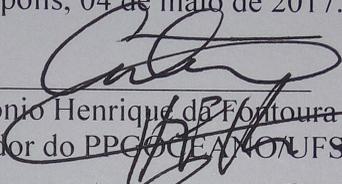
1. Oceanografia. 2. Oceanografia Sísmica. 3. Oceanografia Física. 4. Oceano Atlântico Sul. 5. Acústica Marinha. I. Barrault, Guillaume François Gilbert. II. Klein, Antonio Henrique da Fontoura. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Marcus Vinícius Carpes Barão

Desenvolvimento do procedimento metodológico da Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo

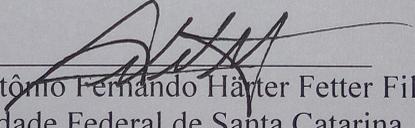
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Oceanografia”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Oceanografia.

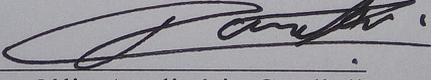
Florianópolis, 04 de maio de 2017.

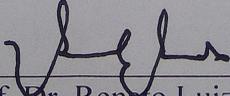

Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein
Coordenador do PPC OCEANO/UFSC

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Guillaume François Gilbert Barrault
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Antônio Fernando Häter Fetter Filho
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Júlio Apolinário Cordioli
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Renato Luiz Prado
Universidade de São Paulo


Carlos Eduardo Theodoro
PETROBRAS

À minha família.

Agradecimentos

À minha família: mãe, vó, irmãos, e esposa pelo apoio incondicional em todos os momentos da dissertação e da vida. À família da França também por possibilitar momentos de intercâmbios de culturas, abrindo a visão de mundo além do meu horizonte. *Merci à vous ma famille Française.*

Aos amigos por proporcionar bons momentos e ainda estarem perto quando mais precisamos. A Marina, João, Isabelle e o pessoal da WAVETECH pelo grande apoio em todos os momentos, nas risadas, nas consultorias de hardware e software, vocês me acrescentaram muito.

Ao pessoal do Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por me dar todo o suporte para desenvolver a minha pesquisa.

Ao professor Renato Prado e todo o pessoal do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) pelo apoio no processamento com Seismic Un*x e também pelo material compartilhado.

Ao Edu (Eduardo Engler) pelo apoio técnico, conversas e devaneio sobre tudo que é possível no mundo.

Ao pessoal do Laboratório de Redes Neurais pelo apoio no Linux.

*To Dr. Berta for all the e-mails and conversations on skype to advise me in the seismic processing with Seismic Un*x and to indicate ways to follow to be a researche. I would also like to thank PhD. Dirk Klaeschen for*

sharing, through PhD. Berta, the script to remove the direct wave.

Ao meu orientador e coorientador pelos valiosos ensinamentos ao longo de todo o caminho, pois me proporcionaram crescimento profissional e acadêmico que levarei para toda a minha vida. Obrigado por proporcionar a aprendizagem de uma nova metodologia.

Ao Dr. Garcia pela orientação e conversa sobre a composição das massas d'água na região oceânica de Santa Catarina.

À Agência Nacional do Petróleo por ceder gentilmente os dados sísmicos utilizados nesse trabalho por meio do ofício nº 1337/2015/SDT.

E por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, vinculado ao projeto Ciências do Mar-II, durante todo o período de realização do presente trabalho.

*“La mer, une fois qu’elle vous a jeté son
sort, vous tient dans son filet pour toujours.”*

...
*“O mar, uma vez que lança o seu feitiço,
mantém algém em sua rede de maravilha
para sempre.”*

Jacques Yves Cousteau



Resumo

A Oceanografia Sísmica (OS) vem se tornando uma ferramenta auxiliar na oceanografia convencional para identificar e monitorar as feições oceanográficas. O objetivo do presente trabalho foi aplicar o processamento sísmico nos dados industriais, cedidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), na região oceânica do estado de Santa Catarina para determinar as feições oceanográficas e correlacioná-las com dados *in situ*, selecionado do *World Ocean Database (WOD)*, assim como explorar e confirmar a efetividade do método. Foi aplicado o processamento convencional para dados sísmicos adaptado para evidenciar os eventos na porção do sismograma que contempla a coluna d'água. Para auxiliar a interpretação dos eventos de reflexão, os dados de estações oceanográficas perto das linhas sísmicas foram processados com o objetivo de caracterizar as massas d'água na região. O processamento dos dados sísmicos indicaram três principais limitações de aplicabilidade: o volume total da fonte, a profundidade do levantamento e a disponibilidade de informações no registro do observador. Entre todas as linhas solicitadas, apenas duas mostraram viabilidade para a análise. Apesar das limitações, o processamento sísmico dos acervos da indústria do petróleo adequado permitiu visualizar eventos reflexivos na coluna d'água. Os dados oceanográficos indicaram a presença da Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Intermediária da Antártica (AIA). Comparando com os dados sísmicos e oceanográficos, é possível situar as reflexões dentro da região da ACAS. Essas reflexões possuem diferentes padrões quando as porções do centro da massa d'água e próximo ao fundo

são comparadas. Indicando uma interação da massa d'água com o assoalho oceânico, resultado da intrusão da ACAS sobre quebra de plataforma. A utilização dos dados sísmicos industriais representa um novo uso para esses dados e confirma a aplicabilidade da OS. O presente método, quando associado às técnicas convencionais, possibilita a visualização das estruturas oceanográficas e processos oceanográficos em mesoescala.

Palavras-chave: Oceanografia física, imagem acústica marinha e Oceano Atlântico Sul.

Abstract

Seismic Oceanography (SO) has been an auxiliary tool in conventional oceanography to identify and monitor oceanographic features. The objective of this present paper was to apply the seismic processing in industrial data, given by the National Petroleum Agency (ANP in Portuguese), in the oceanic region of Santa Catarina to determine the oceanographic features and correlate them with in situ data selected from the World Ocean Database (WOD) in order to explore and confirm the effectivity of the method. Conventional processing was applied to adapted seismic data in order to evidence the events in the portion of the seismogram that contemplates the water column. To assist the interpretation of the reflection events, the data of oceanographic seasons close to the seismic lines have been processed with the scope of characterising the water masses in the region. The seismic data processing has indicated three main applicability limitations: the total volume of the source, the depth of survey and the availability of the information in the observer register. Among all the solicited lines, only two showed viability for the analysis. Despite the limitations, seismic processing of the adequate dataset of the petroleum industry allowed to visualize reflexive events on the water column. The oceanographic data indicated the presence of the Tropical Water (TW), the South Atlantic Central Water (SACW) and the Antarctic Intermediate Water (AIW). Comparing to the seismic and oceanographic data, it is possible to situate the reflections within the SACW region. These reflections have different patterns when portions at the centre of the water masses and close to the bottom are compared. Indicating an interaction of

the water mass with the ocean floor, resulting into the intrusion of the SACW on the shelf break. The use of industrial seismic data represents a new use for the data and confirms the applicability of the SO. The present method, when associated to conventional technics, allows the visualization of the oceanographic structures and oceanographic processes in mesoscale.

Keywords: Physic oceanography, marine acoustic images and South Atlantic Ocean.

Sumário

1	Introdução	31
1.1	Introdução	31
1.2	Hipótese	33
1.3	Objetivos	34
1.3.1	Geral	34
1.3.2	Específicos	34
1.4	Contribuições	34
1.5	Organização do trabalho	35
2	Revisão bibliográfica	37
2.1	Acústica submarina	37
2.2	Método sísmico de reflexão	40
2.2.1	Ondas de corpo	42
2.2.2	Ondas longitudinais	42
2.2.3	Fonte acústica e sua configuração	43
2.2.4	Reflexão e transmissão	45
2.2.5	Levantamento sísmico multicanal	49
2.2.6	Sísmica de reflexão	50
2.2.7	Resolução	53
2.2.8	Processamento dos dados	55
2.3	Oceanografia Sísmica	58
2.3.1	Diferença no processamento sísmico convencional	65
2.4	Característica do ambiente de estudo	66
2.4.1	Circulação do Atlântico Sul ocidental	66
2.4.2	Características oceanográficas	68

2.4.3	Estruturas Oceanográficas.....	70
3	Metodologia	75
3.1	Seleção dos dados.....	77
3.1.1	Linha IAM3.....	77
3.1.2	Dados do BDEP.....	77
3.1.3	Dados oceanográficos.....	78
3.2	Processamento dos dados oceanográficos.....	81
3.2.1	Temperatura.....	81
3.2.2	Salinidade.....	82
3.2.3	Densidade.....	83
3.2.4	Velocidade do som.....	84
3.2.5	Impedância Acústica Sintética e Refletividade....	84
3.3	Processamento dos dados sísmicos.....	85
3.3.1	Pré-processamento.....	85
3.3.1.1	Definição da geometria.....	85
3.3.1.2	Edição dos traços.....	88
3.3.1.3	Filtragem.....	89
3.3.1.4	Correção da divergência esférica.....	90
3.3.2	Remoção da onda direta.....	91
3.3.3	Análise da velocidade.....	93
3.3.4	Correção do sobretempo.....	94
3.3.5	Empilhamento.....	96
3.3.6	Análise dos traços empilhados.....	97
3.3.7	Conversão do tempo para profundidade.....	98
3.3.8	Interpretação.....	99
3.3.9	Comparação com a Bibliografia.....	99
3.4	Elaboração da referência.....	100
4	Processamento dos dados oceanográficos	101
4.1	Análise das propriedades físicas.....	102
4.2	Análise das propriedades acústicas.....	107
4.3	Comparação com a Bibliografia.....	111
4.4	Discussões e Conclusões.....	114
5	Processamento dos dados de referência IAM3	119

5.1	Pré-processamento.....	119
5.2	Remoção da onda direta	123
5.3	Análise da velocidade	124
5.4	Correção do sobretempo	126
5.5	Empilhamento	126
5.5.1	Análise das reflexões na coluna d'água	129
5.6	Discussões e Conclusões	130
6	Processamento dos dados do BDEP	135
6.1	Processamento da linha 93	137
6.1.1	Pré-processamento	137
6.1.2	Remoção da onda direta	142
6.1.3	Análise da velocidade	142
6.1.4	Correção do sobretempo.....	144
6.1.5	Empilhamento.....	145
6.2	Discussões e Conclusões	147
6.2.0.1	Interpretação	147
6.2.0.2	Relação entre as frequências observadas e estruturas.....	149
6.3	Processamento da linha 95	154
6.3.1	Pré-processamento	154
6.3.2	Remoção da onda direta	159
6.3.3	Análise da velocidade	159
6.3.4	Correção do sobretempo.....	161
6.3.5	Empilhamento.....	162
6.4	Discussões e Conclusões	165
6.4.0.1	Interpretação	165
6.4.0.2	Relação entre as frequências observadas e estruturas.....	167
7	Considerações finais	171
7.1	Conclusão	171
7.1.1	Processamento	174
7.1.2	Interpretação	174
7.1.3	Relação das estruturas	175
7.1.4	Proposta de aprimoramento	176

7.2	Trabalhos Futuros.....	176
7.2.1	Processamento dos dados sísmicos	176
7.2.2	Interpretação e identificação	177
7.2.3	Proposta de aprimoramento	178
	Referências Bibliográficas	179
	Apêndice	189
A	Dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP)	191
A.1	Resultados obtidos na solicitação	191
B	Valores gerados na Análise de Velocidade	199
C	Rotina Processamento linha 93	209
D	Guia para aplicação da Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo	213
D.1	Introdução	213
D.2	Definições	214
D.3	Extração de informações	215
D.4	Conversão dos dados	216
D.5	Inserção da geometria	217
D.6	Edição.....	221
D.7	Filtro	222
D.8	Análise de velocidade	223
D.9	Correção do sobretempo	224
D.10	Empilhamento	225
D.11	Conversão para profundidade	226
D.12	Remoção do Fundo	226
D.13	Finalização	228

Lista de Figuras

2.1	Variação da velocidade do som ao longo do Oceano Atlântico.	39
2.2	Propagação de um distúrbio sísmico terrestre a partir de uma fonte pontual P perto da superfície de um meio homogêneo no qual r é o raio de propagação	41
2.3	Assinatura sísmica de um único canhão de ar	44
2.4	Assinatura sísmica de um conjunto de canhões de ar	45
2.5	Modelo convolucional do traço sísmico e respectivo sismograma sintético.	47
2.6	Ilustração esquemática do levantamento aplicado na sísmica de reflexão marinha.....	50
2.7	Modelo convolutivo do traço sísmico de reflexão	51
2.8	Tipos de arranjos utilizados no processamento sísmico para aumentar a relação sinal-ruído.....	52
2.9	Primeira zona de Fresnel.	55
2.10	Levantamento sísmico multicanal	56
2.11	Correção em função do efeito de sobretempo.	57
2.12	Combinação entre reflectância e variações de temperatura em pequena escala na região entre duas massas d'água.....	59
2.13	Área de estudo e principal refletor identificado nos dados utilizados da literatura.....	61
2.14	Diagrama de temperatura versus salinidade para as massas d'água na região de Cabo Frio -RJ (19°S).	69

2.15	Esquema das correntes de contorno oeste e massas d'água ao longo da costa sudeste brasileira.	70
2.16	Escala temporal e espacial dos processos oceanográficos.	72
3.1	Fluxograma das etapas aplicadas ao processamento	76
3.2	Localização da área de estudo.	80
3.3	Diferença entre os valores de temperatura e temperatura potencial.	82
3.4	Diagrama de empilhamento	87
3.5	Edição dos traços	89
3.6	Correção da divergência esférica.....	91
3.7	Remoção da onda direta.....	92
3.8	Espectro de velocidade	94
3.9	Correção do sobretempo de chegada de acordo com o distanciamento do <i>offset</i>	95
3.10	Comparação dos traços antes e após a remoção da onda direta.	97
4.1	Localização das estações onde foram obtidos os dados de temperatura e salinidade.	102
4.2	Variação da temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.	104
4.3	Variação da densidade ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.....	106
4.4	Perfil da velocidade do som ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.	108
4.5	Variação da refletividade ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.	110
4.6	Diagrama TS das estações oceanográficas da região próxima às linhas sísmicas.	114
4.7	Comparação da refletividade e as massas d'água utilizando os índices termohalinos descritos na literatura.	116
5.1	Design do filtro passa banda utilizado.	121

5.2	Mudança no espectro de amplitude por meio da aplicação do filtro passa-banda.....	121
5.3	Aplicação de ganho no domínio do tempo.	122
5.4	Comparação dos traços antes e após a remoção da onda direta do CDP 800.	123
5.5	Análise de velocidade da linha sísmica IAM3.....	125
5.6	Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicado no arranjo CMP 800 da linha sísmica IAM3.	126
5.7	Empilhamento de todo os CDPs da linha sísmica IAM3.	128
5.9	Análise espectral da reflexão e ruído do traço 3580 empilhado juntamente com a onda direta.	130
5.10	Comparação dos traços empilhados entre o trabalho publicado e o processado por esse trabalho.	131
5.8	Análise após empilhamento do traço 3580 da linha sísmica IAM3	133
6.1	Mudança no espectro de amplitude por meio da aplicação do filtro passa-banda.....	139
6.2	Aplicação de ganho no domínio do Tempo.....	141
6.3	Comparação dos traços do disparo 800, antes e após a remoção da onda direta.	142
6.4	Análise da velocidade de propagação aplicada aos traços do arranjo CMP 1000.	143
6.5	Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicada aos traços do conjunto CMP 1000.....	144
6.6	Empilhamento dos CDP considerando toda a linha sísmica.....	145
6.7	Empilhamento dos CDP da linha 93 considerando somente a coluna d'água.	146
6.8	Comparação da linha sísmica 93 com os dados oceanográficos do verão de 1993.	148
6.9	Interpretação dos refletores da linha 93.....	152

6.10	Diferenças no espectro de amplitude do traço 5000 por meio da aplicação do filtro passa-banda Butterworth com faixa central de 15 a 95 Hz.	156
6.11	Aplicação da função ganho no domínio do tempo e remoção dos traços ruidosos no arranjo de disparo 25.	158
6.12	Comparação dos traços do disparo 500, antes e após a remoção da onda direta.	159
6.13	Análise da velocidade de propagação do pulso aplicado aos traços do arranjo CMP 1300.	160
6.14	Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicada aos traços do arranjo CMP 150	162
6.15	Empilhamento dos CDP considerando toda a linha sísmica.	163
6.16	Empilhamento dos CDP da linha 95 considerando somente a coluna d'água.	164
6.17	Comparação da linha sísmica 95 com os dados oceanográficos do inverno de 1993.	166
6.18	Interpretação dos refletores da linha 95.	169
A.1	Dados atendidos x Dados solicitados	194
A.2	Registro do observador durante o levantamento sísmico.	196
D.1	Informações necessárias para inserir a geometria	217
D.2	Parte do documento onde são encontrados as informações detalhadas sobre o levantamento sísmico	218
D.3	Representação da quantidade de traços de acordo com os CDPs	220
D.4	Edição dos traços	221
D.5	Análise de velocidade	224
D.6	Correção NMO	224
D.7	Empilhamento dos traços de um mesmo CDP.	225
D.8	Remoção do Fundo.	227

Lista de Tabelas

2.1	Métodos utilizados para supressão do efeito da onda direta.	66
3.1	Exemplo de cabeçalho de uma linha sísmica antes de inserir a geometria.	86
4.1	Distribuição dos dados oceanográficos de acordo com as estações do ano em que foram realizados os levantamentos sísmicos.	101
4.2	Assinatura termo-halina das massas d'água que são encontradas na região oceânica do estado de Santa Catarina aplicadas para classificação de massas d'água em todas as estações oceanográficas analisadas. Elaborado pelo autor.....	113
5.1	Parâmetros de aquisição IAM03.....	120
6.1	Informações sobre os dados que foram repassados por meio da solicitação ao BDEP. As informações foram extraídas a partir do registro do observador. .	136
6.2	Parâmetros de aquisição linha 93	138
6.3	Amostragem vertical e horizontal da linha sísmica 93 e da estação oceanográfica coletada no verão de 1993.	149
6.4	Resolução horizontal e vertical da linha 93.	150
6.5	Parâmetros de aquisição linha 95.	154

6.6	Amostragem vertical e horizontal da linha sísmica 95 e da estação oceanográfica coletada no inverno de 1993.	167
6.7	Resolução horizontal e vertical da linha 95.	168
7.1	Requisitos mínimos dos dados sísmicos da Indústria do Petróleo para aplicação na OS.....	172
A.1	Linhas sísmicas solicitadas ao BDEP.....	192
A.2	Informações sobre os dados que foram repassadas. .	193
A.3	Informações extraídas no registro do observador. ...	198
B.1	Valores de velocidade da linha sísmica IAM3 para os CDPS 1000 a 5000	200
B.2	Valores de velocidade da linha sísmica IAM3 para os CDPS 6000 a 10000	201
B.3	Valores de velocidade da linha sísmica IAM3 para os CDPS 10000 a 15000	202
B.4	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1993 para os CDPS 100 a 1200	203
B.5	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1993 para os CDPS 1400 a 2300	204
B.6	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1993 para os CDPS 2400 a 3300	205
B.7	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 190 a 1300	206
B.8	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 1950 a 2500	207
B.9	Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 2400 a 3300	208
D.1	Descrições de parte das chaves que compõem o cabeçalho do traço sísmico.	215

Nomenclatura

Símbolos Gerais

A_i	Amplitude de um determinado meio, eq. (2.3), pág. 46.
A_r	Amplitude de uma onda refletida, eq. (2.3), pág. 46.
A_t	Amplitude de uma onda transmitida, eq. (2.3), pág. 46.
$a_i(t)$	Série temporal de um traço sísmico, eq. (3.7), pág. 97.
c	Velocidade de Propagação, eq. (3.2), pág. 84.
c_1	Velocidade de propagação no meio 1, eq. (2.9), pág. 48.
c_2	Velocidade de propagação no meio 2, eq. (2.9), pág. 48.
d_z	Valor de profundidade após a conversão, eq. (3.8), pág. 99.
Ep	Número da fonte de energia, eq. (3.3), pág. 86.
$Fldr$	Número original de gravação de acordo com os disparos, eq. (3.3), pág. 86.
Gx	Coordenada horizontal do hidrofone, eq. (3.3), pág. 87.
i	Traço sísmico, eq. (3.7), pág. 97.
K	Módulo de volume (<i>Bulk modulus</i>), eq. (2.1), pág. 43.

L	Resolução lateral, eq. (2.12), pág. 54.
N	Quantidade de vezes que um mesmo ponto foi amostrado, eq. (3.7), pág. 97.
N_c	Número de canais que compõem o levantamento, eq. (3.4), pág. 88.
N_t	Cobertura máxima, eq. (3.4), pág. 88.
$offset$	Distância do ponto de emissão em relação a cada elemento do grupo de hidrofones, eq. (3.3), pág. 87.
p	Pressão, eq. (3.0), pág. 83.
R	Coeficiente de reflexão, eq. (2.5), pág. 46.
R	Refletividade, eq. (3.3), pág. 84.
r	Raio da frente de onda, eq. (2.14), pág. 55.
Ri_{od}	Região de Influência da Onda Direta, eq. (7.0), pág. 172.
S	Posição da fonte, eq. (2.13), pág. 54.
S_A	Salinidade Absoluta, eq. (3.0), pág. 83.
S_p	Salinidade Prática, eq. (3.0), pág. 83.
S_x	Coordenada horizontal da fonte, eq. (3.3), pág. 87.
Θ	Temperatura Conservativa, eq. (3.0), pág. 83.
T	Período de Onda, eq. (2.0), pág. 37.
t	Tempo de propagação, eq. (2.13), pág. 54.
t_0	Tempo de trânsito ao longo de um trecho vertical, eq. (3.6), pág. 96.

$Tracf$	Número do traço gravado em campo de acordo com o hidrofone, eq. (3.3), pág. 86.
$Tracl$	Sequência do traço dentro da linha, eq. (3.3), pág. 86.
$Tracr$	Sequência do traço dentro da gravação, eq. (3.3), pág. 86.
v	Velocidade de propagação, eq. (3.8), pág. 99.
v	Velocidade do som, eq. (2.13), pág. 54.
V_p	A velocidade de propagação das ondas compressoriais, eq. (2.1), pág. 43.
v_{nmo}	Velocidade do som no meio antes da interface refletora, eq. (3.6), pág. 96.
Z	Impedância Acústica, eq. (3.2), pág. 84.
Z	Impedância acústica, eq. (2.4), pág. 46.
z	Profundidade, eq. (3.2), pág. 84.
z_0	Profundidade do refletor O, eq. (2.13), pág. 54.

Símbolos Gregos

α	Fator de compensação do decaimento em função do tempo de propagação, eq. (3.5), pág. 90.
Δ_c	Distância entre os canais, eq. (3.4), pág. 88.
Δ_d	Distância entre os disparos, eq. (3.4), pág. 88.
δ_{nmo}	Representação numérica da correção do sobretempo, eq. (3.6), pág. 96.

f	Frequência da onda, eq. (2.0), pág. 37.
λ	Comprimento de onda, eq. (2.0), pág. 37.
μ	Módulo de rigidez, eq. (2.1), pág. 43.
ρ	Densidade do material, eq. (2.1), pág. 43.
θ_c	Ângulo de incidência crítica, eq. (2.11), pág. 49.
θ_i	Ângulo de refração, eq. (2.9), pág. 48.
θ_r	Ângulo de reflexão, eq. (2.9), pág. 48.

Acrônimos e Abreviaturas

ACAS	Água Central do Atlântico Sul, eq. (2.14), pág. 68.
ACS	Água Circumpolar Superior, eq. (2.14), pág. 68.
AIA	Água Intermediária da Antártica, eq. (2.14), pág. 68.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, eq. (3.0), pág. 77.
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte, eq. (2.14), pág. 68.
AT	Água Tropical, eq. (2.14), pág. 68.
AVO	Análise de amplitude <i>versus offset</i> , eq. (2.14), pág. 60.
BDEP	Banco de Dados de Exploração e Produção, eq. (1.0), pág. 32.
CB	Corrente do Brasil, eq. (2.14), pág. 67.
CCI	Corrente de Contorno Oeste Intermediária, eq. (2.14), pág. 69.
CCI	Corrente de Contorno Profunda, eq. (2.14), pág. 69.

CCO	Corrente de Contorno Oeste, eq. (2.14), pág. 67.
CDP	Ponto de Profundidade Comum, eq. (3.3), pág. 87.
CG	Corrente do Golfo, eq. (2.14), pág. 68.
CNB	Corrente do Norte do Brasil, eq. (2.14), pág. 67.
CSE	Corrente Sul Equatorial, eq. (2.14), pág. 67.
CSM	<i>Colorado School of Mines</i> , eq. (3.0), pág. 75.
CWP	<i>Center for Wave Phenomena</i> , eq. (3.0), pág. 75.
IOC	Sigla inglês para Comissão Oceanográfica Intergovernamental, eq. (3.0), pág. 78.
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, eq. (3.5), pág. 94.
IAM	Projeto Margem Íbero-Atlântica, eq. (2.14), pág. 60.
IAM3	Linha sísmica proveniente do <i>Iberian Atlantic Margins Project</i> , eq. (1.0), pág. 35.
NMO	Sigla em inglês para sobretempo, eq. (3.5), pág. 95.
ODV	Sigla inglês para Visualizador de Dados Marinhos, eq. (3.0), pág. 84.
OG	Oceanografia geofísica, eq. (2.14), pág. 63.
OS	Oceanografia Sísmica, eq. (1.0), pág. 31.
PPS-78	Sigla inglês para Escala Prática de Salinidade, eq. (3.0), pág. 83.
SVD	Filtro de Decomposição em Valor único, eq. (2.14), pág. 66.

SEG	Sociedade de Geofísicos de Exploração, eq. (3.3), pág. 85.
SM	Subcorrente do Mediterrâneo, eq. (2.14), pág. 61.
SOFAR	<i>Sound Fixing and Ranging</i> , eq. (2.0), pág. 38.
CMP	Ponto Médio Comum, eq. (2.11), pág. 50.
TEOS10	Sigla inglês para Equação Termodinâmica da água marinha, eq. (3.0), pág. 83.
USP	Universidade do Estado de São Paulo, eq. (3.5), pág. 94.
WOD	Sigla inglês para Base de dados oceanográficos mundial, eq. (3.0), pág. 78.
CTD	<i>Conductivity, Temperature and Depth</i> , eq. (2.14), pág. 58.
XBT	<i>eXpendable BathyTermograph</i> , eq. (2.14), pág. 58.

1 Introdução

1.1 Introdução

O conhecimento detalhado dos processos oceanográficos permite a construção de modelos que representem os parâmetros físicos e estruturas oceanográficas em diferentes escalas temporais e espaciais. Desta forma, é possível compreender a contribuição dos oceanos na distribuição de temperatura pelo planeta e seu efeito no clima (GARRISON, 2011).

De acordo com Möller e Abe (2011), desde o início das investigações oceânicas, tem-se buscado métodos para coleta de dados que resolvam as grandes questões oceanográficas relativas às escalas espaciais e temporais próprias de cada feição oceanográfica.

As técnicas empregadas na oceanografia convencional permitem o mapeamento de estruturas termohalinas por meio de instrumentos que medem os perfis verticais de temperatura e salinidade. Essas técnicas possuem limitações práticas no volume do oceano que conseguem amostrar e no alcance da resolução horizontal (HOLBROOK et al., 2003). Desse modo, é apresentado o método acústico denominado Oceanografia Sísmica (OS)¹, que promove o imageamento das estruturas termohalinas em alta resolução a partir de dados sísmicos de baixa frequência (1-200Hz).

¹A sísmica de reflexão é um método de prospecção geofísica que utiliza os princípios da sismologia para estimar as propriedades da subsuperfície da Terra com base na reflexão de ondas sísmicas. É importante salientar que, procurando empregar os termos utilizados pela bibliografia, será considerado ao longo de todo o trabalho os termos "dados originados de levantamentos sísmicos" como dados sísmicos e "oceanografia utilizando dados de medições sísmicas" como Oceanografia Sísmica.

Para o processamento sísmico é necessário realizar adaptações devido às características dos sinais refletidos na coluna d'água. Possuindo coeficientes de reflexão até mil vezes menores que aqueles em subsuperfície, as adaptações visam evidenciar os sinais entre a superfície e o leito marinho. Holbrook et al. (2003) foram os percussores na utilização dessa metodologia para observação de estruturas oceanográficas na coluna d'água.

A Oceanografia Sísmica pode mapear estruturas oceanográficas com resolução horizontal 100 vezes superior àquela empregada nos métodos convencionais (BIESCAS et al., 2010). A utilização dos dados sísmicos marinhos do acervo das indústrias de petróleo oferece um bom material para análise, visto que o método utilizado da sísmica convencional possui características como geometria de aquisição, tipo de fonte sísmica e arranjo de hidrofones que são semelhantes aos utilizados pela literatura na OS (HOLBROOK et al., 2003) e que ainda são pouco explorados. Por sísmica convencional, entende-se a metodologia aplicada pela indústria do petróleo na exploração das estruturas em subsuperfície.

O uso das reflexões nas estruturas d'água presentes em dados de levantamentos sísmicos está emergindo como uma nova ferramenta para estudar o oceano em grande escala, apresentando a capacidade de complementar as técnicas convencionais, auxiliando, assim, os oceanógrafos na determinação e na visualização das feições oceanográficas com resolução sem precedentes (ALVES, 2009; HOLBROOK; FER, 2005).

De acordo com Holbrook et al. (2003) e Ruddick et al. (2009) os atuais esforços da oceanografia sísmica estão na utilização de dados já coletados por outros levantamentos geofísicos aliados às técnicas oceanográficas convencionais. Dessa forma, é possível destacar a potencialidade de aplicação ao longo das regiões costeiras e oceânicas do Brasil, pois existe um vasto acervo de dados sísmicos no Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP). Apesar de estar bem estabelecida nos levantamentos com foco na pesquisa, a metodologia da OS para aplicação em dados da indústria do petróleo ainda está imatura, pois desde que Holbrook et al. (2003)

indicou a potencialidade de aplicação, foram encontradas limitadas referências de sua utilização, como por exemplo Blacic e Holbrook (2010), Quentel (2010) e Smillie (2013). Até o presente momento não foram identificadas as totais aplicabilidades do método para os dados da indústria, bem como a suas limitações, como por exemplo a configuração do equipamento e profundidades limitantes.

Nesse sentido, este trabalho empregou a OS como ferramenta de identificação dos processos oceanográficos em mesoescala na região oceânica adjacente à costa de Santa Catarina, explorando os registros sísmicos de baixa frequência (20 - 100 Hz) do acervo do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP), afim de aprofundar o conhecimento das estruturas internas da coluna d'água e colaborar com o desenvolvimento da metodologia. A escolha da baixa frequência levou em consideração a proposta estabelecida pelos percussores da metodologia (HOLBROOK et al., 2003), ao poder de alcance em grandes profundidades e reduzida interferência por estruturas em micro escala, não observado em frequências mais altas (100 kHz a 1 MHz).

1.2 Hipótese

A hipótese é composta por duas vertentes complementares:

- O processamento dos dados sísmicos adquiridos pela indústria do petróleo é capaz de identificar e mensurar alguns parâmetros físicos como as dimensões e posição das estruturas oceanográficas em mesoescala na região oceânica adjacente à costa de Santa Catarina, contribuindo como uma ferramenta robusta e complementar aos métodos atuais;
- O aprimoramento do processamento dos dados sísmicos aplicados à identificação e medição das propriedades da coluna d'água e estruturas oceanográficas como correntes superficiais e profundas, frentes, ondas internas e vórtices, otimiza o fluxo de tratamento dos dados e propicia uma maior difusão desse método.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Empregar a Oceanografia Sísmica como ferramenta de identificação dos processos oceanográficos em mesoescala na região oceânica adjacente à costa de Santa Catarina por meio de registros sísmicos de baixa frequência (20 - 100Hz), a fim de aprofundar o conhecimento da metodologia nos dados sísmicos da indústria do petróleo.

1.3.2 Específicos

- Processar os dados sísmicos multicanais do acervo do BDEP na plataforma e talude do Brasil (região oceânica adjacente ao estado de Santa Catarina).
- Interpretar a imagem obtida para identificação das estruturas oceanográficas como ondas internas, intrusões e massas d'água.
- Estabelecer a relação entre as frequências das reflexões e as estruturas oceanográficas identificadas.
- Propor aprimoramento aos processos metodológicos utilizados.

1.4 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é fundamentar o processamento sísmico da Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo na língua portuguesa. Sendo este o primeiro trabalho do grupo de pesquisa, o objetivo foi estabelecer uma base sólida para o processamento e aquisição de dados sísmicos históricos utilizando o *software* de código livre *Seismic Unix*.

Objetiva-se também que o presente documento seja uma referência inicial para novos pesquisadores e trabalhos futuros.

1.5 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em 7 capítulos e 4 apêndices. Os três primeiros capítulos abordam os temas bases para entendimento da Oceanografia Sísmica e as etapas do processamento sísmico e oceanográfico. Os quatro capítulos seguintes abordam o processamento e interpretação dos resultados. Os capítulos estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução dos conceitos básicos sobre a investigação oceânica e Oceanografia Sísmica. Apresentam-se também a hipótese, contribuição e os objetivos;

Capítulo 2: Apresentação da revisão dos principais conceitos da geofísica sobre a propagação acústica em ambiente marinho, o estado de arte da Oceanografia Sísmica e caracterização da circulação oceânica em Santa Catarina;

Capítulo 3: Descrição das etapas do processamento dos dados sísmicos e dos parâmetros oceanográficos;

Capítulo 4: Apresentação e discussão dos resultados obtidos após o processamento do dados oceanográficos;

Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados obtidos após o processamento do dado sísmico de referência IAM3;

Capítulo 6: Apresentação e discussão dos resultados obtidos após o processamento dos dados sísmicos históricos do BDEP;

Capítulo 7: Apresentação das considerações finais do trabalho, expondo as principais conclusões do trabalho ao longo de todo o documento. Apresenta também recomendações para os trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Acústica submarina

As ondas sonoras são ondas mecânicas que necessitam de um meio elástico para que se propaguem. A propagação do som é caracterizada por uma sequência de perturbações no meio em que se propagam, as quais geram zonas de compressão e rarefação ao longo de suas oscilações. Quando a emissão ocorre a partir de uma fonte pontual em um meio homogêneo e isotrópico¹, a onda sonora irá se espalhar de maneira omnidirecional, criando frentes de pressão esféricas (DUVOISIN; MADUREIRA; GREIG, 2011).

Os elementos de uma onda podem ser descritos pelos seguintes parâmetros:

- Ciclo de onda: caracterizado pela passagem de duas zonas de contração (pico), ou expansão (vales), em um mesmo ponto;
- Comprimento de onda (λ): dado pela distância entre dois picos (ou vales) consecutivos;
- Período de onda (T): tempo necessário para ocorrer uma oscilação ou λ ;
- Frequência da onda (f): número de oscilações que passam por um mesmo ponto no período de um segundo, medido em Hz;

¹Definido como um meio que possui as mesmas propriedades físicas em todas as direções (GADALLAH; FISHER, 2005)

- Amplitude de onda: é o deslocamento máximo de um segmento em relação à sua posição de equilíbrio;
- Pulso: pode ser definido como uma mudança transiente na amplitude de um sinal a partir de um valor de equilíbrio para um valor superior ou inferior, seguida por um rápido retorno ao valor inicial (equilíbrio).

A oceanografia acústica é a ciência que utiliza o som, de forma ativa ou passiva, para determinar os parâmetros, como temperatura e salinidade, e processos físicos do ambiente marinho. Em alguns casos específicos, as fontes de som são usadas para estudar o oceano e suas camadas (MEDWIN; CLAY, 1997).

O método ativo utiliza um sistema de fonte e receptor. A fonte emite sinais que serão registrados pelo receptor para obter informações sobre o ambiente. Geralmente a análise é realizada durante um intervalo (tomografia acústica) ou dispersão (imageamento do fundo oceânico). O método passivo, por outro lado, utiliza as fontes naturais de sons no mar para compreender fisicamente um processo e avaliar os parâmetros oceanográficos que o causaram.

De acordo com Munk e Wunsch (1979), a velocidade do som no oceano aumenta de forma proporcional a temperatura e pressão. A sensibilidade da variação da velocidade do som para a salinidade é, geralmente, muito menor do que a da temperatura ou pressão. Uma observação que tem implicações acústicas importantes é que a temperatura, salinidade, e conseqüentemente a velocidade do som na água do mar são verticalmente estratificadas sobre a maior parte dos oceanos do mundo (MEDWIN; CLAY, 1997).

Na Figura 2.1 podemos observar como a velocidade do som está distribuída ao longo de uma seção do oceano atlântico. A linha tracejada indica a profundidade onde o som possui a menor velocidade, porção da coluna d'água conhecida como camada SOFAR².

²Sigla em inglês para *Sound Fixing and Ranging*.

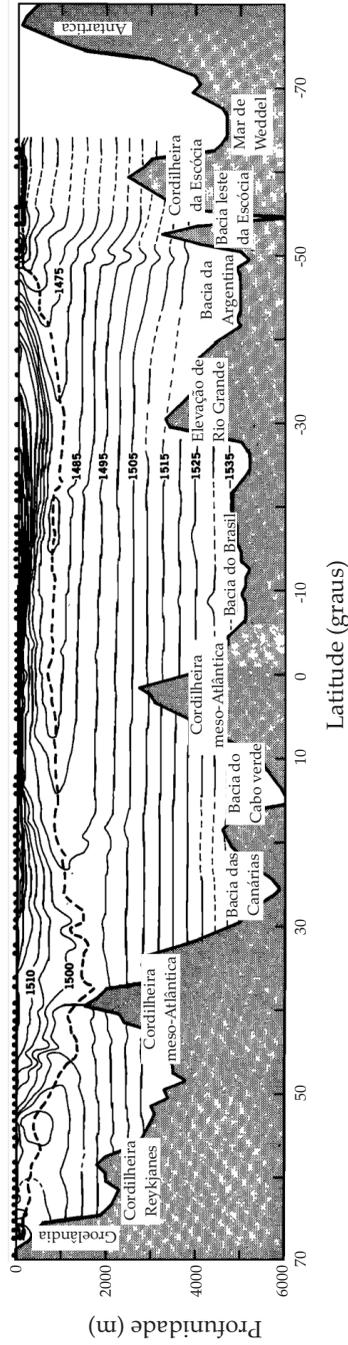


Figura 2.1.: Seção Norte-Sul das isolinhas de velocidade do som no oceano atlântico. O canal de velocidade do som mínimo (linha pontilhada) ao longo do meridiano 30.5°O. Fonte: Northrop e Colborn (1974). Modificado pelo autor.

Apesar da análise de propagação acústica estar bem estabelecida na Oceanografia Acústica, na literatura a OS não está inserida nessa vertente até o presente momento. Esta última apresenta grandes distinções na maneira que o dado é adquirido e analisado, devido ao emprego do método sísmico de reflexão. De acordo com Ruddick et al. (2009), essas diferenças são responsáveis pela não difusão completa da OS entre oceanógrafos e geofísicos, apesar do crescimento do conhecimento entorno da aplicabilidade.

2.2 Método sísmico de reflexão

Em um levantamento sísmico marinho, as ondas são geradas por uma fonte sonora controlada, localizada na superfície do mar. As ondas propagam-se ao longo de toda a coluna d'água e estruturas geológicas situadas abaixo do emissor. Algumas ondas voltam à superfície após terem interagido com camadas entre as interfaces geológicas e/ou oceanográficas.

Os sensores, denominados de hidrofones, são rebocados próximo à superfície do mar juntamente com a fonte. Estes detectam as perturbações de pressão causadas pelas ondas que retornaram e medem os tempos de chegada em diferentes afastamentos em relação à fonte. Esses tempos de percurso podem ser convertidos em valores de profundidade e a distribuição de interfaces geológicas pode ser sistematicamente mapeada (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). O mesmo acontece para as interfaces oceanográficas.

A propagação de uma onda sonora através de um meio heterogêneo é extremamente complexa. Desse modo, é necessário assumir hipóteses para simplificar e tornar possível a derivação das equações que descrevem o fenômeno de forma adequada. A heterogeneidade do meio é geralmente modelada através de sua divisão em camadas paralelas e homogêneas. Assumindo uma adequada espessura, densidade e propriedades elásticas de cada camada, as condições reais podem ser aproximadas.

De acordo com Lowrie (2007), quando ocorre um distúrbio, a energia sonora é transmitida como frente de ondas. As partículas

são deslocadas pelo distúrbio e após retornam a sua posição original.

Considerando um levantamento sísmico terrestre, quando uma energia sísmica é liberada em um ponto P próximo a uma superfície de meio homogêneo, parte da energia propaga-se no interior do meio como um corpo de ondas. A parte remanescente da energia sísmica propaga-se na forma de ondas superficiais (Figura 2.2). Pode-se fazer a analogia com as *ripples*³ que se formam na superfície de um corpo d'água quando uma "pedra" é atirada.

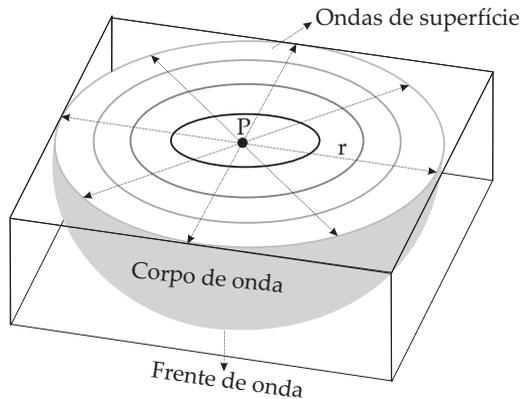


Figura 2.2.: Propagação de um distúrbio sísmico terrestre a partir de uma fonte pontual P perto da superfície de um meio homogêneo no qual r é o raio de propagação. O distúrbio propaga-se através do meio como uma onda de corpo. Fonte: (LOWRIE, 2007). Adaptado pelo autor.

As velocidades de propagação de pulsos sísmicos são determinadas pelo módulo de elasticidade e pelas densidades dos meios através dos quais há a propagação. Existem dois grupos de ondas elásticas, ondas de superfície e ondas de corpo (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

As ondas de superfície são divididas em ondas de *Rayleigh* e *Love*. Elas se propagam ao longo de uma superfície sólida. As ondas

³Ondas capilares na superfície, geralmente ocasionadas pelo atrito inicial do vento

de superfície não serão abordadas de maneira detalhada neste trabalho, visto que possuem característica cisalhante, e assim, uma propagação restrita aos meios sólidos confinados (levantamentos terrestres), propagando-se através das superfícies que o limitam. Dessa forma, não possui importância para a sismica de reflexão aplicada à coluna de água, exceto pela forma de ruído (ALVES, 2009).

2.2.1 Ondas de corpo

As ondas de corpo podem ser divididas em dois tipos: as ondas **longitudinais** e as ondas de **cisalhamento**. Da mesma forma que qualquer outro tipo de onda que se propaga no espaço tridimensional e cuja fonte de energia pode ser aproximada por uma fonte pontual, a amplitude de uma onda de corpo, em águas profundas, decresce com o inverso da distância da fonte.

A superfície em que todos os pontos se encontram no mesmo estado de vibração pode ser chamada de frente de onda e a direção perpendicular (ondas longitudinais) à frente de ondas é chamada de raio sísmico. Ao se afastar uma pequena distância r da fonte em um meio homogêneo, a frente de onda tem uma forma esférica. Portanto, as ondas que se propagam são chamadas ondas esféricas. A curvatura da frente de onda decresce com o aumento da distância r a partir da fonte. Desta forma, para grandes distâncias da fonte, a frente de onda pode ser considerada uma superfície plana e as ondas são tratadas como ondas planas.

De acordo com Lowrie (2007) esta aproximação possibilita aprender muito sobre a propagação da onda e simplifica a descrição do movimento harmônico da frente de onda. As equações que serão apresentadas a seguir consideram esta aproximação.

2.2.2 Ondas longitudinais (compressionais)

Considera-se o sistema de eixos cartesianos, onde o eixo x corresponde à direção de propagação da onda. As ondas longitudinais são as primeiras a serem registradas quando ocorre

um sismo, por isso, são chamadas ondas primárias ou ondas P . As ondas- P se propagam tanto em meios sólidos quanto em fluidos, pois ambos são compressíveis.

A velocidade de propagação das ondas compressoriais é expressa com base no módulo de rigidez μ , no módulo volumétrico K e na densidade do material ρ .

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4\mu}{3}}{\rho}}. \quad (2.1)$$

O módulo de volume (K) é o parâmetro que descreve a elasticidade volumétrica, isto é, a tendência de um material em se deformar em todas as direções quando sofre uma pressão uniforme em todas as direções. Módulo de Rigidez (ou módulo de cisalhamento) (μ) é definido como a razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a deformação do cisalhamento $\tan(\theta)$.

Líquidos e gases não possuem cisalhamento, conseqüentemente o módulo de rigidez (μ) é igual a zero. A velocidade de propagação das ondas longitudinais em meio fluido será igual a:

$$V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (2.2)$$

2.2.3 Fonte acústica e sua configuração

De acordo com Krail (2010), uma única fonte, mesmo com um volume de 2000 m^3 , não é capaz de emitir energia suficiente para obter uma reflexão de amplitude mensurável a partir de 5000 metros abaixo da superfície. Uma outra desvantagem ainda mais grave é a utilização de um único canhão de ar (*air gun*)⁴ como fonte sísmica, produzindo um pulso que oscila por vários ciclos. O resultado é um trem de onda que possui oscilações periódicas

⁴Fontes pneumáticas nas quais uma câmara é preenchida com ar comprimido sob alta pressão. O pulso é gerado a partir da liberação do ar pelas aberturas da câmara sob a forma de uma bolha de alta pressão. O primeiro pulso gerado é seguido por um trem de pulsos ocasionado pelas bolhas devido à cavitação.

(Figura 2.3), diferente do ideal para o processamento convencional, onde é preferível um sinal que se assemelhe a um impulso.

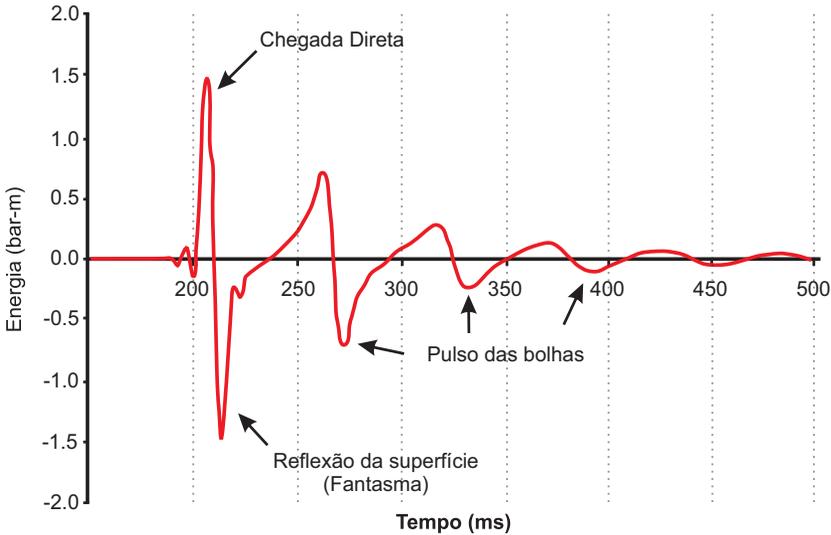


Figura 2.3.: Assinatura sísmica de um único canhão de ar. Fonte: Caldwell e Dragoset (2000). Adaptado pelo autor.

De acordo com Caldwell e Dragoset (2000) e Krail (2010), o problema da baixa amplitude e da oscilação pode ser resolvido por meio da combinação de vários pulsos de canhões de ar em arranjos. A configuração do canhão de ar em arranjo possibilita uma combinação de pulsos e faz com que aumente a amplitude do sinal emitido, devido ao aumento do número de fontes. Esse aumento da intensidade do sinal é aproximadamente proporcional à raiz cúbica do volume total da matriz⁵. Desta forma, a medida que se aumenta o volume total do arranjo (volume de cada componente combinado) aumenta-se também a amplitude do sinal emitido pelo conjunto de fontes (GADALLAH; FISHER, 2005; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

É observado que diferentes canhões de ar com volumes dife-

⁵Arranjo formado pelos equipamentos operando em conjunto.

rentes, produzem bolhas com diferentes períodos de oscilação. A sobreposição de cada assinatura dos canhões de ar em arranjo resulta na soma da amplitude do primeiro pulso e cancelamento dos demais, visto que estão fora de fase devido aos diferentes volumes dos canhões de ar (Figura 2.4).

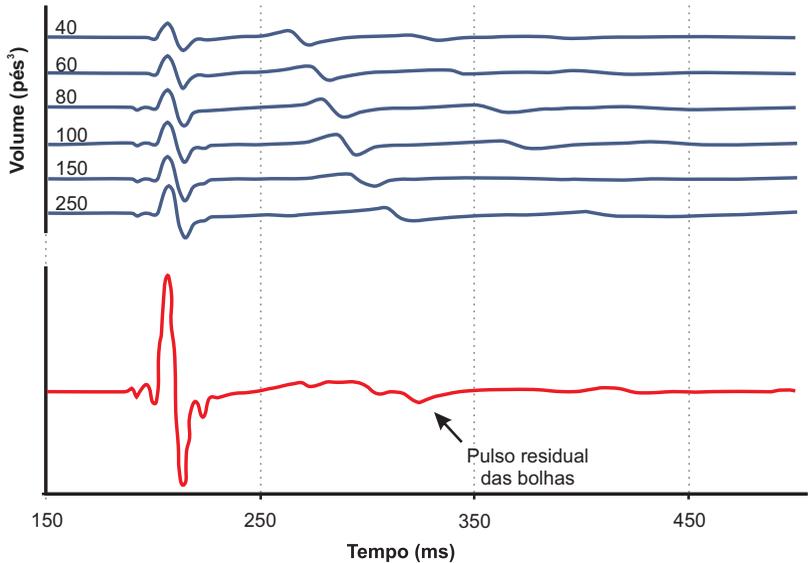


Figura 2.4.: Assinatura sísmica de um conjunto de canhões de ar.
Fonte: Caldwell e Dragoset (2000). Adaptado pelo autor.

2.2.4 Reflexão e transmissão

Considera-se uma onda longitudinal propagando-se por um determinado meio com uma amplitude A_i , incidindo normalmente na interface de outro meio de diferente impedância. É observado que na interface entre os dois meios são geradas duas ondas: uma onda refletida (com amplitude A_r) e outra onda transmitida (com amplitude A_t) para o segundo meio, cuja soma de intensidades é igual à intensidade da onda incidente (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002), assim:

$$A_i = A_r + A_t. \quad (2.3)$$

Desta forma, a energia total das ondas transmitida e refletida deve ser igual à energia da onda incidente. As proporções de quantidade da energia incidente que será refletida e transmitida são determinadas pelo contraste de impedância acústica (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

A impedância acústica (Z) é uma propriedade acústica que pode ser determinada pelo produto entre a densidade (ρ) do meio e a velocidade de propagação (c) do som ao se considerar uma onda plana com incidência normal ao plano (YILMAZ, 2008), ou seja:

$$Z = \rho c. \quad (2.4)$$

A medida numérica do efeito de uma interface sobre a propagação da onda é definida como Coeficiente de Reflexão (R), calculado pela razão entre a amplitude da onda refletida A_r e amplitude da onda incidente A_i :

$$R = \frac{A_r}{A_i}. \quad (2.5)$$

Kearey, Brooks e Hill (2002) descrevem que esse cálculo envolve considerações e deduções acerca dessa medida com as propriedades físicas dos materiais na interface. A solução formal para esse problema é conhecida como equações de Zoeppritz, geocientista alemão que definiu equações para as partições das energias das ondas sísmicas. Nessa solução, são considerados os módulos elásticos de volume e cisalhamento das ondas longitudinais, assim como a densidade do meio. No limite, a tensão e a deformação nos dois meios são considerados por essa solução. Para uma onda incidindo normalmente, as relações são simples e podem ser expressas por:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (2.6)$$

Quando a impedância acústica do meio 2 (Z_2) é maior que a do meio 1 (Z_1), o coeficiente de reflexão (R) é positivo. Portanto, a parte da onda que será refletida manterá a mesma fase da onda incidente. De outro modo, quando Z_2 é menor que Z_1 , o coeficiente de reflexão será negativo. Deste modo, a parte da onda que será refletida terá fase invertida, ou seja, se o pulso inicial foi uma compressão, o pulso refletido será uma distensão (Figura 2.5).

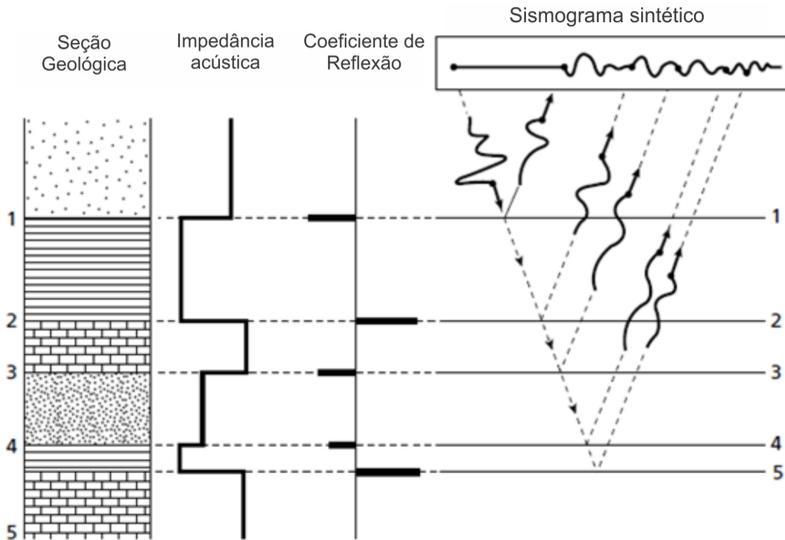


Figura 2.5.: Modelo convolucional do traço sísmico e respectivo sismograma sintético. Fonte Kearey, Brooks e Hill (2002). Adaptado pelo autor.

A Figura 2.5 mostra que a cada superfície com contraste de impedância acústica, parte da energia é refletida e parte é transmitida. Desta forma, a energia do pulso inicial é dividida ao longo do percurso e aparece como um sinal complexo nos receptores. A resposta de cada superfície chega a um determinado

tempo, que é função da profundidade do refletor.

A relação da quantidade de energia que continua se propagando de um meio para outro, isto é, a energia que sofre transmissão, é determinada pelo coeficiente de transmissão (T). Essa relação é definida como a razão entre a amplitude da onda transmitida e a amplitude da onda incidente, assim:

$$T = \frac{A_t}{A_i}, \quad (2.7)$$

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}. \quad (2.8)$$

Os fenômenos de reflexão e de refração são explicados pela Lei de Snell (Equação 2.12) por meio da relação entre os ângulos de reflexão ($\text{sen}(\theta_r)$) e de refração de uma onda que incide ($\text{sen}(\theta_i)$) em uma interface entre dois meios com velocidade de propagação c_1 e c_2 . Desta forma:

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{c_1} = \frac{\text{sen}(\theta_r)}{c_2}. \quad (2.9)$$

De acordo com a Lei de Snell, os ângulos de incidência e de reflexão são os mesmos. Sendo assim, o ângulo de refração depende do ângulo de incidência e da relação das velocidades nos dois meios.

De acordo com o ângulo de incidência, a propagação da onda poderá apresentar diversas respostas. É conhecida como refração crítica quando a energia da onda é totalmente transmitida ao segundo meio, devido a um ângulo de incidência crítica (θ_c), dada pela equação:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{\text{sen } 90^\circ}{c_2} = \frac{1}{c_2}, \quad (2.10)$$

assim,

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \left(\frac{c_1}{c_2} \right). \quad (2.11)$$

Para os ângulos maiores que o ângulo crítico, toda a energia da onda propagada será refletida.

2.2.5 Levantamento sísmico multicanal

O levantamento sísmico multicanal é um método que tem sido usado por décadas tanto na pesquisa quanto na indústria do petróleo por ser um eficiente método de exploração e imageamento acústico detalhado das estruturas geológicas. A sísmica multicanal consiste na captação de reflexão através de diferentes receptores distribuídos na superfície. Os dados gerados de cada canal são utilizados para melhorar o processamento dos dados, resolução e a interpretação subsequente das seções sísmicas (ALLABY, 2008).

No levantamento sísmico marinho, o sinal acústico é usualmente gerado por um conjunto de canhões de ar, rebocado por um navio, a poucos metros abaixo da superfície da água. Esse conjunto de fontes liberam bolhas de ar subitamente em intervalos regulares, gerando pulsos de ar comprimido na água, ao longo da trajetória do navio (Figura 2.6). A energia acústica se propaga por meio da coluna d'água e substrato. Parte é refletida quando encontra um contraste na impedância acústica entre diferentes camadas e volta para a superfície (SONG et al., 2012; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

A energia acústica refletida é registrada digitalmente na superfície por uma linha de sensores piezoelétricos (hidrofonos) comumente conhecido como *streamer* de hidrofonos. Os hidrofonos são organizados em grupos onde os sinais são somados para melhorar a relação sinal-ruído. Cada grupo forma um canal de registro e, de acordo com Song et al. (2012), em levantamentos 2D é comum ter entre 96 e 500 canais.

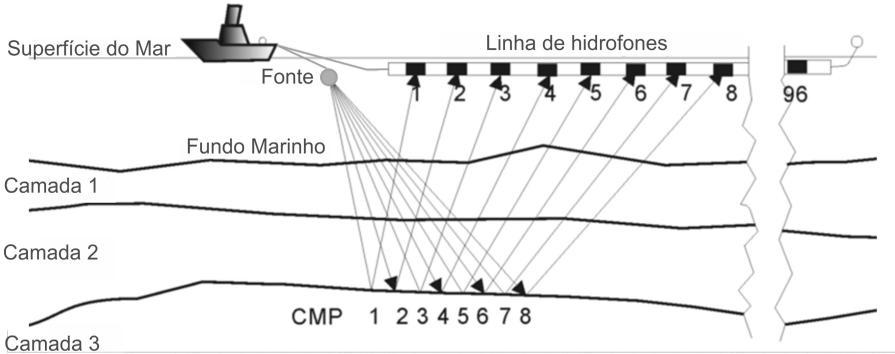


Figura 2.6.: Ilustração esquemática do levantamento aplicado na sísmica de reflexão marinha. Fonte: Song et al. (2012). Adaptado pelo autor.

2.2.6 Sísmica de reflexão

De maneira simplificada, o traço sísmico representa a resposta combinada do meio estratificado e do sistema de registro do pulso sísmico (Figura 2.7) (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). Em cada interface, uma parte de energia incidente do pulso é refletida de volta na direção do receptor. Considerando a propagação na coluna d'água, o pulso perde amplitude ao longo de sua propagação devido à divergência esférica e a perda progressiva por absorção, que tem maior influência nas frequências mais altas. Desse modo, o traço sísmico básico de reflexão pode ser visto como a convolução da função refletividade⁶ com um pulso enviado ao meio (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; KORMANN et al., 2010; YILMAZ, 2008).

⁶Definida como a distribuição de coeficientes de reflexão do ambiente.

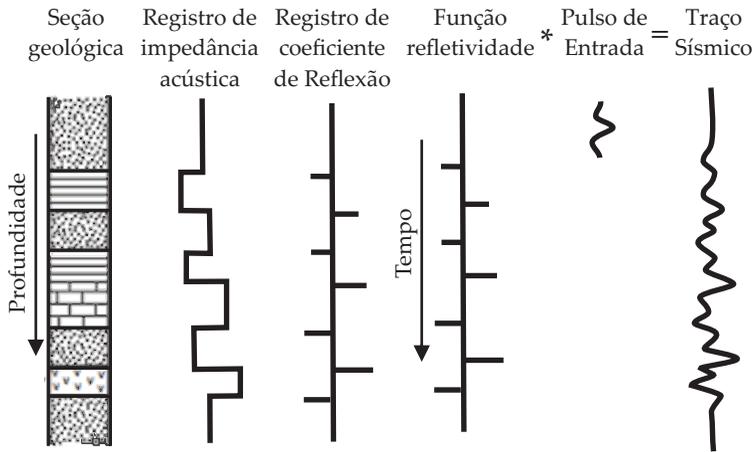


Figura 2.7.: Modelo convolutivo do traço sísmico de reflexão, mostrando o traço sísmico como uma saída convolvida de uma função refletividade com um pulso de entrada. Fonte: Kearey, Brooks e Hill (2002). Adaptado pelo autor.

Esse traço sísmico representa a resposta combinada das camadas sobrepostas verticalmente e o sistema de gravação (canais de gravação), que podem ser agrupadas em conjuntos (Figura 2.8). Os tipos de conjuntos são:

- 1—Conjunto de Tiros Comuns (*commom-shot gather*);
- 2—Conjunto de Receptores Comuns (*commom-receiver gather*);
- 3—Conjunto de Ponto Médio Comum (*common midpoint gather*);
- 4—Seção de Afastamento Comum (*Common-offset section*) e;
- 5—Seção de Ponto Médio Comum Empilhado (*zero-offset section*).

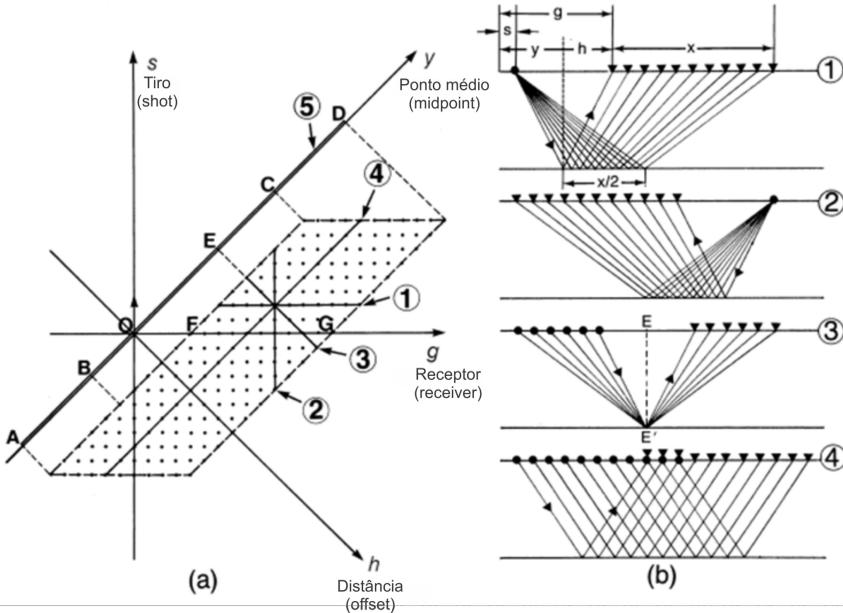


Figura 2.8.: Tipos de arranjos utilizados no processamento sísmico para aumentar a relação sinal-ruído, considerando o meio homogêneo. Os triângulos representam os receptores e círculos as fontes, sendo que x é o comprimento dos cabos de receptores, E representa a posição do ponto médio e E' é o ponto médio em profundidade considerando um refletor horizontal. As coordenadas do levantamento são dados pela posição da fonte (s), receptor (g) e afastamento dos pontos comuns (y, h). Fonte: Yilmaz (2008). Modificado pelo autor.

De acordo com Yilmaz (2008), a Figura 2.8 é conhecida como gráfico de empilhamento e é muito útil na configuração da geometria de uma linha de pré-processamento. Caso um tiro ou receptor apresentem problemas, os pontos médios afetados são facilmente identificados. Essa representação permite visualizar a geometria de aquisição e permite saber quais traços têm o mesmo *Common Midpoint* (CMP) para os diferentes tiros.

A Figura 2.8 representa as dimensões de um levantamento, no qual o segmento FG é o comprimento do cabo onde estão

dispostos os hidrofones e AD é o comprimento da linha realizada no levantamento. O número de pontos na seção 3 é igual ao da cobertura de *Common Midpoint* (CMP). A redução da cobertura é observada nas extremidades do perfil (segmentos AB e CD), devido aos limites do levantamento. Os pontos que possuem total cobertura ocorrem ao longo da linha dos CMPs (linha 3) no segmento BC.

O objetivo desse método é aproximar a seção com espaçamento zero (como se a fonte e o receptor estivessem logo acima do ponto refletido) e promover a redução relação sinal-ruído ao longo do processamento.

O método de aquisição multicanal tem a vantagem da redundância de receptores. Desta maneira é possível destacar o conceito de *fold* ou cobertura. A cobertura vai ser o número máximo de vezes que um mesmo ponto é amostrado (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; YILMAZ, 2008), característica fundamental aproveitada pela Oceanografia Sísmica (BUFFETT, 2008; HOLBROOK et al., 2003; RUDDICK et al., 2009).

2.2.7 Resolução

De acordo com Yilmaz (2008), a resolução está relacionada com o quanto é possível distinguir dois eventos reflexivos próximos. Tanto vertical quanto lateralmente, a resolução é controlada pela banda de frequências do sinal.

Vertical

A resolução vertical é a medida de capacidade para reconhecer dois refletores individuais. Mesmo que pouco espaçados, os refletores devem possuir no mínimo 1/4 do comprimento de onda (critério de Rayleigh) (SHERIFF; GELDART, 1995) e podem ser calculados da seguinte forma:

$$L = \frac{\lambda}{4}, \quad (2.12)$$

$$L = \frac{v}{4f} . \quad (2.13)$$

no qual L é a distância mínima para distinguir dois eventos, v é a velocidade do som, λ é o comprimento de onda e f é a frequência dominante.

Horizontal

Refere-se ao quão dois pontos de reflexão podem estar e ainda sim distinguidos (YILMAZ, 2008).

Tal demonstração pode ser observada na Figura 2.9, onde uma frente de onda esférica atingindo um refletor plano AA' . Este refletor pode ser considerado como um contínuo eixo de difratores. Considerando S como a posição do fonte e a mesma posição do receptor, a energia refletida em um ponto em subsuperfície (ponto O) possui o tempo de propagação (t_0) igual a $2z_0/v$. Agora, deixando a frente de onda propagar por mais $\lambda/4$. A energia localizada na subsuperfície A ou A' , vai alcançar o receptor no tempo $t_1 = 2(z_0 + \lambda/4)/v$. A energia de todos os pontos dentro do disco com raio OA' irá chegar em algum momento entre t_0 e t_1 . A energia total que chega nesse intervalo (AA'), que é igual a metade do período dominante ($T/2$), possui interferência construtiva e é chamada de primeira zona de Fresnel.

Além de depender do comprimento de onda, a resolução lateral também depende da velocidade na profundidade que encontra-se o refletor analisado. Desse modo, o raio da frente de onda é aproximadamente expresso por:

$$r = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{2}} , \quad (2.14)$$

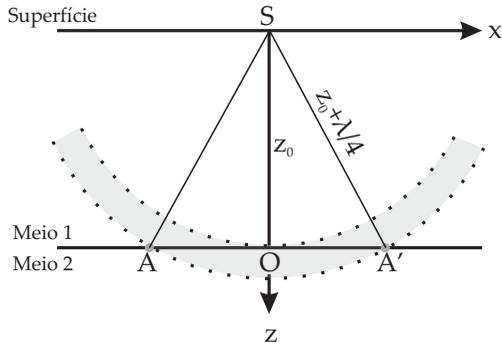


Figura 2.9.: Primeira zona de Fresnel. Modificado de Yilmaz (2008)

no qual z_0 é a profundidade do refletor e λ é o comprimento de onda na frequência dominante.

2.2.8 Processamento dos dados

O processamento sísmico pode ser considerado como uma sequência de operações que atenuam e/ou removem o ruído do dado sísmico, do mesmo modo que realiza as correções geométricas que, ao final, fornecerão uma imagem da subsuperfície. Como descrito por Yilmaz (2008), são três os principais passos que sempre são aplicados ao processamento: deconvolução, empilhamento e migração. Tais processos são observados na Figura 2.10.

Deconvolução é o processo que atua no eixo do tempo e aumenta a resolução temporal por meio da compressão do sinal em uma *wavelet*, aproximando-o de um impulso e, dessa forma, suprimindo a reverberação no trem de ondas.

Empilhamento (*Stacking*) é o processo que comprime o volume de dados em relação ao distanciamento em uma mesma família de CMP, isto é, são somados todos os traços que amostraram o mesmo ponto. O resultado é, assim, um plano de seção empilhado com afastamento zero (*zero offset*) que aprimora a relação sinal-ruído.

Migração é o processo de reconstrução de uma seção sísmica, onde os eventos de reflexão são reposicionados sob suas corretas

localizações na subsuperfície. A migração é realizada para aumentar a resolução lateral, colapsando as difrações e movendo eventos inclinados para as suas posições de subsuperfície supostamente verdadeiras, este último quando aplicado na seção empilhada (YILMAZ, 2008; KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

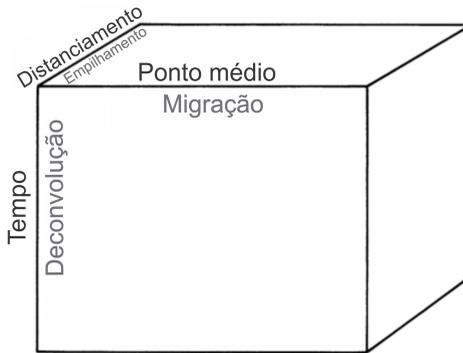


Figura 2.10.: Volume do dado sísmico representado nas coordenadas de processamento (ponto médio, distância, tempo). Fonte: Yilmaz (2008). Modificado pelo autor.

De acordo com Yilmaz (2008), o pré-processamento também envolve a edição e remoção dos traços que apresentam ruídos e/ou falhas transitórias. A maioria dos dados marinhos estão contaminados por ruídos causados por ondulação (*swell*), ruídos dos cabos que rebocam os equipamentos, embarcações e correntes.

A energia destes tipos de ruído possui baixas frequências, porém elevadas amplitudes. O ruído da ondulação e o ruído dos cabos são removidos a partir de registros dos tiros por uma filtragem passa-alta. A atenuação do ruído linear coerente, associada a dispersores do sinal podem exigir técnicas baseadas em outros tipos de filtragem.

Após a edição dos traços e a pré-filtragem, é necessário aplicar uma função ganho nos dados para corrigir a amplitude, devido às perdas por propagação esférica.

A onda acústica refletida não chega em todos os canais ao mesmo tempo, devido ao atraso ocasionado pelo afastamento

(*offset*) . Desta maneira, para visualizar os refletores em sua posição correta é necessário remover o efeito do sobretempo (NMO) (Figura 2.11), que é efeito ocasionado pelo afastamento, velocidade e da profundidade do refletor (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; YILMAZ, 2008; COFFEEN, 1986). Para isso, parte-se do pressuposto que, em um conjunto CMP, o tempo de propagação (Δt) de onda refletida em função do deslocamento (Figura 2.10) segue uma função hiperbólica.

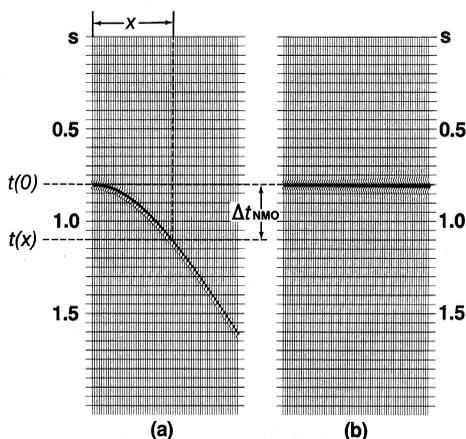


Figura 2.11.: Correção em função do efeito de sobretempo, **a** mostra o mesmo refletor em perfil parabólico a medida que aumenta o *offset* e **b** é o resultado da correção do sobretempo.

Fonte: Yilmaz (2008).

Baseado na informação ao longo do levantamento sísmico, registrado no Relatório do Observador⁷, as coordenadas das fontes e hidrofones são localizadas para todos os traços que estão armazenados nos cabeçalhos. Mudanças nas localizações são tratadas manualmente com base nas informações disponíveis no documento anteriormente citado. O estabelecimento da

⁷Documento elaborado ao longo do levantamento sísmico que possui as informações com relação ao posicionamento e configuração de todos os equipamentos em relação à embarcação e também sobre o correto funcionamento dos mesmos. Estas descrições são fundamentais no momento do processamento.

geometria de campo a partir de informações incorretas, ou faltantes, podem ocasionar problemas ao longo do processamento. Como resultado, pode ocorrer a perda na qualidade da seção empilhada, comprometendo o dado.

2.3 Oceanografia Sísmica

As camadas da termohalina são comumente mapeadas por instrumentos que medem os perfis de temperatura e salinidade em profundidade e em locais determinados, denominados de CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) e XBT (*eXpendable BathyThermograph*).

A OS promove o imageamento das estruturas termohalinas em uma resolução maior quando comparado com as técnicas convencionais. De acordo com Buffett (2008), Wood et al. (2010), Holbrook et al. (2003), o aumento de resolução horizontal é de duas ordens de grandeza em comparação com métodos convencionais utilizando perfiladores CTD e XBT. Desta forma, a reflexão sísmica emergiu como uma nova ferramenta para estudar o oceano em grande escala, visto que o extenso arquivo mundial de dados sísmicos marinhos constitui um grande e inexplorado recurso para a sondagem de estruturas na coluna d'água, auxiliando assim oceanógrafos a visualizar e identificar as estruturas na coluna d'água com resolução sem precedentes (HOLBROOK et al., 2003; HOLBROOK; FER, 2005).

Segundo Holbrook e Fer (2005), as reflexões dentro da camada d'água são de 100 a 1000 vezes mais fracas que das estruturas geológicas abaixo. Dessa maneira se faz necessário aumentar a relação sinal/ruído no sistema de processamento para o imageamento das estruturas na coluna d'água (WOOD et al., 2010).

Percursos no desenvolvimento da OS demonstraram que este método é capaz de realizar o imageamento das estruturas termohalinas ao longo de grandes áreas cobrindo toda a coluna de água (HOLBROOK et al., 2003). As reflexões observadas no sismograma são resultado dos contrastes de impedância ao longo do raio de propagação do impulso sonoro. Os contrastes

ocorrem por pequenas variações na velocidade do som entre as camadas distintas, como acontece em uma intrusão termohalina por exemplo.

Nandi et al. (2004) validam a notável sensibilidade da reflexão da onda sísmica de baixa frequência (20-100 Hz) num experimento para comparar as reflexões e a variação da temperatura do mar ao longo de 172 km no mar da Noruega. Como é possível observar na Figura 2.12, existe uma relação direta entre a amplitude da reflexão e o contraste de temperatura.

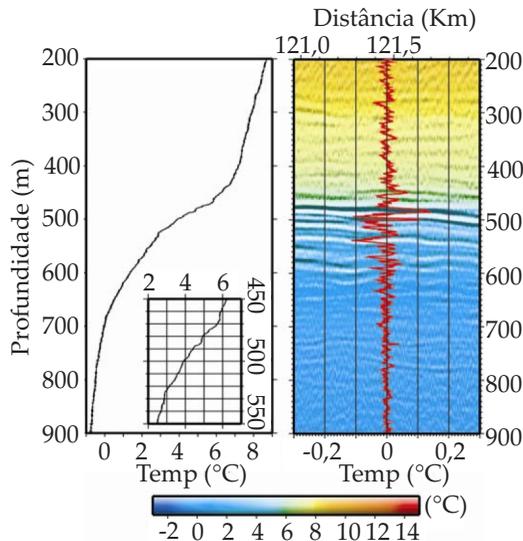


Figura 2.12.: Combinação entre reflectância e variações de temperatura em pequena escala na região entre duas massas d'água. Adaptado de Nandi et al. (2004).

Nandi et al. (2004) concluem que existe uma considerável sensibilidade do imageamento das reflexões às pequenas variações de temperatura, como por exemplo $0,03^{\circ}\text{C}$, destacando que este parâmetro está diretamente relacionado à amplitude da reflexão e indicando a capacidade de aplicar a inversão sísmica para estimar remotamente a temperatura na coluna d'água.

Os locais que apresentam valores negativos de temperatura

correspondem à Água Profunda do Mar da Noruega (NSDW), gerada na mistura entre Água Profunda do Mar da Groelândia e a Água Profunda do Oceano Ártico, alcançando -0.5°C até $-1,5^{\circ}\text{C}$ e ligeiramente menos salina (34,92 ‰).

Com o objetivo de quantificar o espectro de energia de ondas internas, Holbrook e Fer (2005) utilizaram com sucesso os dados de reflexão aliados às medições com o XBT. De acordo com os autores, esta técnica apresentou grandes vantagens no estudo quantitativo de onda interna, visto que medições do espectro de energia normalmente exigem análises de séries temporais de instrumentos *in situ* ou rebocados.

Paramo e Holbrook (2005) demonstram que por meio da aplicação da análise de amplitude *versus offset* (da sigla em inglês AVO) de dados sísmicos é possível calcular os contrastes de temperatura na coluna de água sem a utilização do perfil de temperatura medida por um XBT ou por CTD. Tal método foi comparado com medições *in situ* de temperatura obtida a partir de dados XBT. A análise foi realizada em duas reflexões com diferentes magnitudes de contraste de temperatura e profundidades. De acordo com os autores, existe uma boa correlação entre a temperatura calculada a partir da análise de AVO e XBT, propondo assim, que este método é eficiente para a quantificação de temperatura na coluna d'água.

Utilizando outra abordagem para determinar a temperatura da coluna d'água remotamente, Wood et al. (2008) aplicam a inversão unidimensional completa da forma de onda (*full waveform*), em dados sísmicos (corroborado por medições com XBT) mostrando que o contraste de temperatura dentro do oceano pode ser recuperado com incertezas de um grau Celsius.

Utilizando dados sísmicos multicanal adquirido do Projeto "Margem Íbero-Atlântica (IAM)"⁸ no Golfo de Cadiz (Figura 2.13 (a)) em 1993, Biescas et al. (2008) confirmam o potencial dos dados de sísmica multicanal para localizar e dimensionar detalhadamente as

⁸O projeto IAM faz parte de um esforço para estudar a geologia profunda da Europa, visando explorar a natureza da crosta continental e oceânica profunda da Terra em áreas selecionadas das margens atlânticas da Península Ibérica.

estruturas denominadas *meddies* (Figura 2.13 (b)).

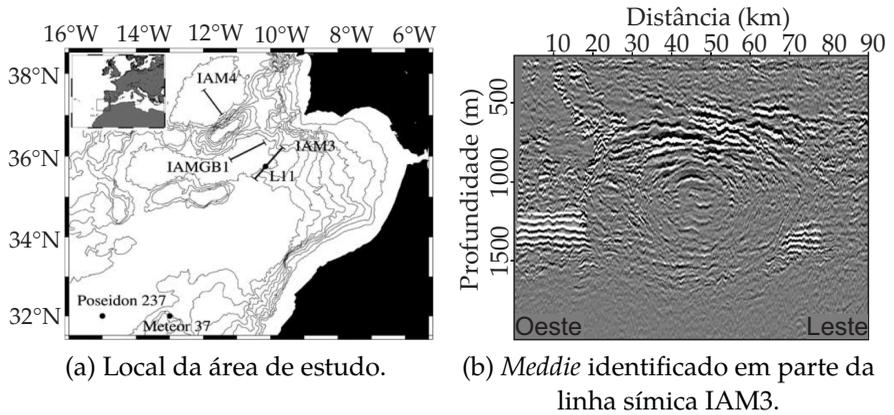


Figura 2.13.: Área de estudo e principal refletor identificado no trabalho de Biescas et al. (2008). Adaptado de Biescas et al. (2008).

Os *Meddies* são estruturas finas (lentes) que estão fortemente associados às águas com elevados valores de salinidade originadas no Mar Mediterrâneo, devido ao excesso de evaporação em relação a precipitação, e escoam através do Estreito de Gibraltar, fluindo sobre a quebra da plataforma.

Como abordado detalhadamente por Pinheiro et al. (2010), essa água alcança a estabilidade entre 500 m a 1500 m de profundidade ao norte do Golfo de Cadiz, fluindo como uma corrente de limite de massas d'água chamada de Subcorrente do Mediterrâneo (SM). Parte da SM flui próximo ao Cabo de São Vicente, na porção sudoeste da Península Ibérica e continua sentido norte sobre a quebra da plataforma como uma corrente de contorno leste. Grandes segmentos de água quente e salina na forma de lentes são desprendidos da SM e formam vórtices (*eddies* em inglês) em subsuperfície, denominando a estrutura de *Meddies* (*Mediterranean eddies*).

A Figura 2.13 (b) é o registro dessa estrutura, que possui em torno de 40 a 100 km de largura, 1 km de espessura e se estende verticalmente entre as profundidades de 500 e 1500 m. Este trabalho

consolida a potencialidade do método para investigação de *Meddies* e demais estruturas oceanográficas por meio dos dados sísmicos, visto que a sua resolução horizontal é duas ordens de magnitude superiores aos dados oceanográficos convencionais.

Com os dados do mesmo projeto, Buffett et al. (2009) realizaram análises dos dados sísmicos ao longo do trajeto da subcorrente do mediterrâneo. Os autores mostraram como refletores na coluna d'água se comportam com o aumento da distância da origem da corrente, no Estreito de Gibraltar. Os levantamentos sísmicos foram analisados em combinação com dados históricos de CTD, e assim foi possível verificar como as mudanças nestes refletores podem responder à mistura progressiva da subcorrente do mediterrâneo no norte do Oceano Atlântico. Tais resultados corroboram com Nandi et al. (2004), onde foi exposto que a temperatura é o fator que mais influencia na variação da amplitude da reflexão.

Fortin e Holbrook (2009) investigaram os requisitos da velocidade do som para um processamento correto na coluna d'água, visto que a análise deste parâmetro é muito relevante para a construção de um modelo de velocidade e utilizado mais de uma vez no fluxo de processamento (correção do sobretempo e empilhamento). Foram construídas quatro imagens, utilizando velocidade uniforme (1500 *m/s*), dados regionais de arquivo de dados, perfis de temperatura adquiridos simultaneamente aos dados sísmicos e perfis selecionados pelo usuário por meio do processamento, respectivamente. A ordem que foram aplicados apresenta o nível de complexidade requerido no processamento, do menor para maior, fato que é altamente relacionado à qualidade do modelo. Os autores concluíram que o modelo construído a partir de padrões selecionados pelo usuário (*hand picked*) apresentam melhores resultados, pois a imagem gerada apresenta alta relação sinal-ruído e alto número de refletores, quando comparado com as demais.

Sallarès et al. (2009), analisando a mesma região da subcorrente do mediterrâneo, agora pelo projeto "Oceanografia Geofísica

(OG)⁹, definiram a contribuição relativa da temperatura e salinidade para a refletividade acústica. O contraste de temperatura representa em média 80% da refletividade e a salinidade 20%. Corroborando com os trabalhos anteriores de Nandi et al. (2004) e Buffett et al. (2009).

Blacic e Holbrook (2010) apresentam as primeiras imagens, em três dimensões, das estruturas oceanográficas a partir de um conjunto de dados coletados por uma grande empresa de petróleo. O fato interessante desse trabalho é que paralelamente ao levantamento sísmico, foram obtidos também os perfis de temperatura utilizando o XBT. Este trabalho representa um passo importante para a Oceanografia Sísmica no sentido de proporcionar a cooperação e compartilhamento de dados com a indústria petrolífera. Além de ser um dos únicos trabalhos que utilizam os dados de uma empresa de petróleo, os autores ressaltam a necessidade do levantamento dos perfis de temperatura e salinidade paralelamente ao registro sísmico, pois o conhecimento real (instantâneo) do local é imprescindível para obter valores corretos de temperatura e salinidade aplicando o método de inversão.

Seguindo para águas mais rasas, Pièttè et al. (2013) demonstraram a possibilidade de gerar imagens com alta resolução dos níveis mais superficiais do oceano. Tal proposta foi comprovada através de um levantamento com diferentes características em relação aos anteriores. Para as análises, foram utilizados pequenos *offsets*, um sistema de múltiplos *streamers* e um *sparker*¹⁰ como fonte de alta resolução. O resultado foi uma imagem detalhada da termoclina sazonal a 30 metros de profundidade em uma coluna d'água com profundidade variando de 50 a 150 metros.

⁹Projeto Europeu que promove uma nova ferramenta para entender as estruturas e dinâmica oceanográfica.

¹⁰Sistema que utiliza a descarga eléctrica armazenada em alta tensão nos condensadores, e os liberta em forma de arco entre os eléctrodos na água. A descarga eléctrica na água produz uma bolha de plasma de alta pressão e vapor, que se expande e entra em colapso, produzindo energia acústica de baixa frequência (20-110 Hz).

Wood et al. (2008) tiveram resultados que corroboraram com Holbrook et al. (2003). Os resultados indicam que a técnica de reflexão sísmica pode proporcionar imagens de variações horizontais de pequena escala da estrutura termohalina, com um comportamento análogo ao sensoriamento remoto, aplicados não só a águas profundas, mas também a porções mais rasas do oceano.

A Oceanografia Sísmica é considerada um segmento da oceanografia acústica, diferenciando-se basicamente na frequência utilizada e conseqüentemente em sua aplicação. A OS utiliza frequências entre 10 e 200 Hz (HOLBROOK et al., 2003; RUDDICK et al., 2009), que são refletidas nos limites entre as massas d'água com diferentes densidades. Convencionalmente, na oceanografia acústica são utilizadas frequências 1000 vezes maiores, entre 10 e 200 kHz (WOOD et al., 2010) e são afetadas por feições na escala de micrômetros a milímetros, como sedimento em suspensão e florações de plânctons no caso da análise pela dispersão (imageamento do fundo oceânico). O forte espalhamento em águas superficiais e o mecanismo de retroespalhamento distinto devido ao seu curto comprimento de onda determina que as altas frequências (10 – 200 KHz) não são adequadas para imageamento da coluna d'água de oceanos profundos. Desse modo, a oceanografia acústica convencional não consegue quantificar as magnitudes das estruturas marinhas entre as massas d'água como a Oceanografia Sísmica se propõe (PIÈTÈ et al., 2013).

Dessa maneira, a Oceanografia Sísmica apresenta-se como uma opção para o imageamento das estruturas oceanográficas na região sudeste da plataforma continental brasileira. Visto que essa abordagem proporciona uma resolução 100 vezes melhor que as técnicas convencionais no imageamento e baixo custo de aplicação (BIESCAS et al., 2010).

O baixo custo é devido à reutilização dos dados da indústria do petróleo, a qual possui características de levantamento muito semelhantes às aplicadas para OS e apresenta um grande acervo de dados que podem ser usados (BLACIC; HOLBROOK, 2010; HOLBROOK et al., 2003).

2.3.1 Diferença no processamento sísmico convencional

A OS adiciona uma importante etapa no processamento sísmico convencional: a remoção da onda direta. A onda direta é definida como o sinal que não teve nenhuma reflexão, isto é, parte de uma onda sonora que se propaga da fonte diretamente para o receptor. Segundo Buffett (2008) um dos grandes desafios do processamento de dados sísmicos marinhos para a OS é a supressão da onda direta de maneira eficiente sem comprometer o sinal, visto que, esse efeito mascara as reflexões na coluna d'água como um ruído linear de alta amplitude.

Usualmente no processamento sísmico convencional, a coluna d'água é desconsiderada juntamente com a onda direta na edição dos traços. Contudo, esse processo não se aplica à OS, pois retiraria assim toda a informação que se procura obter.

Diversos métodos foram pesquisados para a supressão efetiva desse evento com o objetivo de manter a integridade das reflexões. Os principais, descritos até o momento, estão apresentados na Tabela 2.1 com os respectivos autores que os utilizaram.

De acordo com os trabalhos na Tabela 2.1, o efeito da onda direta é observado nos primeiros 210 m¹¹, possuindo alta amplitude e mascarando possíveis reflexões dentro dessa camada superior da coluna d'água.

O Método de Subtração adaptativa é detalhadamente descrito por Krahnemann et al. (2008) e é aquele que apresentou melhor resultado em todas as análises. A onda direta é removida por meio da transformada linear de Radon (Tau-P), isolamento do sinal que corresponde à onda direta e, por fim, a transformada inversa para o domínio do tempo.

¹¹Média das profundidades máximas onde o efeito foi observado.

Tabela 2.1.: Métodos utilizados para supressão do efeito da onda direta.

Métodos	Trabalhos
Método de Subtração adaptativa	Krahmann et al. (2008) e Ruddick et al. (2009)
<i>Median Filter</i>	Biescas et al. (2008) e Pinheiro et al. (2010)
Não remoção	Tsuji et al. (2005), Bornstein et al. (2013) e Holbrook et al. (2013)
Silenciamento	Nandi et al. (2004) e Padhi et al. (2015)
Filtro de decomposição em valor único (SVD)	Piètà et al. (2013)
Filtro autovetor	Buffett et al. (2009) e Quentel et al. (2011)

2.4 Característica do ambiente de estudo

2.4.1 Circulação do Atlântico Sul ocidental

A circulação de 90% da água no interior dos oceanos é causada pela força da gravidade, sendo que as diferenças entre as densidades produzem o movimento que é denominado circulação termohalina (GARRISON, 2011). As estruturas termohalinas possuem escalas espaciais bem definidas, como por exemplo as intrusões termohalinas, que ocorrem em regiões tropicais e subtropicais e intrusões laterais que são comuns nas frentes (regiões de fronteiras) entre a maioria das massas d'água (MÖLLER; ABE, 2011).

De acordo com Stewart (2004), a circulação profunda leva calor, salinidade, oxigênio, dióxido de carbono e outras propriedades de altas latitudes a latitudes mais baixas em todo o mundo. As consequências desse fenômeno são:

1. O contraste entre a água profunda fria e as águas quentes da superfície determina a estratificação do oceano, que influencia fortemente a sua dinâmica.

2. O volume de água no fundo é muito maior do que o volume da água de superfície. Embora correntes no oceano profundo sejam relativamente fracas, elas possuem transporte comparável aos transportes de superfície.

3. Os fluxos de calor e de outras variáveis transportadas pela circulação profunda influenciam o balanço do calor e clima da terra. Dessa maneira, a determinação exata de temperatura e salinidade é imprescindível para os estudos da formação dessas massas, de seus movimentos e velocidades e das misturas que podem sofrer ao longo de seu deslocamento (GARRISON, 2011).

O padrão de circulação no Atlântico Sul é determinado pelas correntes de contorno oeste (CCO) (SILVEIRA et al., 2000). Estas são caracterizadas por fluxos intensos, estreitos e bem definidos que fluem ao longo das margens continentais.

A Corrente do Brasil (CB) compõe a corrente de contorno oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul. Possui origem ao sul de 10° S, na região onde o ramo mais ao sul da Corrente Sul Equatorial (CSE) se bifurca formando também a Corrente do Norte do Brasil (CNB) (PETERSON; STRAMMA, 1991). A partir da bifurcação, a CB flui para o sul, contornando o continente sul-americano até a região da Convergência Subtropical (33-38°S), onde conflui com a Corrente das Malvinas e se separa da costa.

Na literatura, a Corrente do Brasil (CB) é descrita como uma corrente relativamente fraca quando comparada à sua análoga no Atlântico Norte, a Corrente do Golfo (CG). As correntes de contorno oeste podem ser pensadas como fluxos de retorno do transporte de Sverdrup¹² (SILVEIRA et al., 2000; GABIOUX, 2008). Este último pode ser estimado pelos campos de tensão de cisalhamento do vento em larga escala. Entretanto, não há aparente diferença

¹²Homenagem ao oceanógrafo Harald Sverdrup, que também dá nome à unidade utilizada para expressar o transporte de volume nas correntes oceânicas, onde 1 sverdrup equivale a 1 milhão de metros cúbicos por segundo (GARRISON, 2011).

entre os campos de ventos dos dois hemisférios, que justifique tais diferenças entre CG e CB por tal argumento teórico (ZEMBA, 1991).

2.4.2 Características oceanográficas

A região da CB é formada pelo empilhamento das massas d'água do Atlântico Sul com temperatura e salinidade bem definidas (Figura 2.14). Nos primeiros três quilômetros de coluna d'água encontram-se a Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS), Água Intermediária Antártica (AIA), Água Circumpolar Superior (ACS) e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). A CB é descrita como uma corrente quente e salina constituída principalmente pela AT e ACAS (SILVEIRA et al., 2000).

A AT é uma massa d'água quente e salina que ocupa a superfície do Atlântico Sul Tropical, a qual é transportada para o sul pela CB. Essa água da camada superior do oceano é formada como consequência da intensa radiação e excesso de evaporação em relação à precipitação, características do Atlântico Tropical. Em seu trajeto para o sul, mistura-se com águas de origem costeira mais frias e de baixa salinidade. O resultado é que a AT é caracterizada por temperaturas maiores que 20°C e salinidades acima de 36‰, ao largo da região Sudeste brasileira (SILVEIRA et al., 2000; SILVA, 2006).

A ACAS é encontrada fluindo na região da picnoclina, formada pelo afundamento das águas na região da Convergência Subtropical, possuindo temperaturas maiores que 6°C e menores que 20°C, e salinidades entre 34,6‰ a 36‰ (SILVEIRA et al., 2000). É possível encontrar na literatura pequenas variações da temperatura entre 6°C a 18°C e salinidades de 34,5‰ a 36‰ (SVERDRUP et al., 1942).

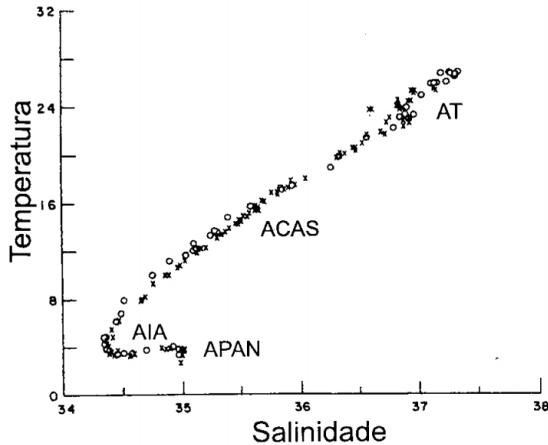


Figura 2.14.: Diagrama de temperatura versus salinidade para as massas d'água na região de Cabo Frio -RJ (19°S). Fonte: Evans, Signorini e Miranda (1983).

De acordo com Silveira et al. (2000) a ACAS faz parte do Giro Subtropical, circulando com as Correntes do Atlântico Sul e Benguela, e atinge a costa da América do Sul transportada pela Corrente Sul Equatorial localizada na região da pycnoclina entre 200m e 600m (SILVA, 2006; CASTRO; MIRANDA, 1998).

A parte inferior do sistema de CCO (entre 700 e 1500m de profundidade) está constituída pelo fluxo da AIA, cuja temperatura e salinidade variam entre 3°C a 6°C e 34,20‰ a 34,60‰ respectivamente. O escoamento associado à AIA, transportado pela Corrente de Contorno Oeste Intermediária(CCI), possui fluxo norte-nordeste no interior da Bacia de Santos (GABIOUX, 2008; SILVEIRA et al., 2000).

Abaixo da AIA, é encontrada a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). A APAN é caracterizada por valores de temperatura entre 3°C a 4°C e salinidades entre 34,6 ‰ a 35‰ (SILVA, 2006), ocupando níveis entre 1500 e 3000 m, ao largo do Sudeste brasileiro. Existe consenso na literatura de que, a APAN flui para o sul ao longo do contorno oeste até cerca de 32°S transportada pela Corrente de Contorno Profunda (CCP).

Na Figura 2.15 são representadas as posições relativas das massas d'água que compõem o sistema CCO.

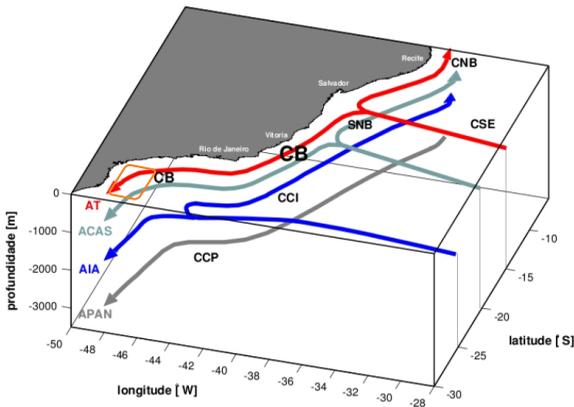


Figura 2.15.: Esquema das correntes de contorno oeste e massas d'água ao longo da costa sudeste brasileira. Fonte: Soutelino (2008).

O local de área de interesse do presente trabalho está representado pelo retângulo laranja na Figura 2.15. Latitude que possui ocorrência da AT, ACAS, AIA e IPAN.

2.4.3 Estruturas Oceanográficas

Mesmo dentro das massas d'água, é possível observar uma distribuição não homogênea dos parâmetros físico-químicos (WRIGHT; COLLING; BEARMAN, 1995).

Ao longo do transporte das massas d'água, a coluna d'água está sujeita a vários processos de misturas. Tais processos são conjuntos de fenômenos dinâmicos e resultando em efeitos e interação simultâneos, visto que ocorrem em diversas escalas e resultam em interações biológicas, químicas e geológicas (TALLEY, 2011; WRIGHT; COLLING; BEARMAN, 1995).

Na Figura 2.16 é possível observar alguns dos processos que ocorrem no oceano com foco nas estruturas em mesoescala.

Ondas e marés internas são fenômenos de dissipação de energia que possuem comprimento de onda entre dezenas até milhares de metros (SIEDLER et al., 2013). São frequentemente observadas quando as correntes de marés e estratificações ocorrem próximos à acidentes topográficos, como por exemplo: em regiões de quebra de plataforma (DIAS, 2013; APEL, 2002).

Como destacado por Dias (2013), são conhecidos por atenuar e gerar anormalidades na propagação do som. Contudo, existem poucos estudos sobre esses fenômenos na região sudeste do atlântico sul.

A quebra de plataforma é uma importante região de formação das marés internas e, por consequência, das ondas internas também. Os fluxos das correntes de maré interagem com a topografia do fundo produzindo um deslocamento das isopicnais¹³, gerando a propagação da maré interna durante as reversões de maré (SIEDLER et al., 2013). A quebra das ondas e marés internas são fontes de mistura turbulenta, no qual a dissipação de energia ocorre por meio de cisalhamento ou instabilidades convectivas.

¹³Linha que faz conexão entre os pontos de mesma densidade. Graficamente são apresentadas em camadas, semelhantes às linhas de contorno utilizados em mapas topográficos.

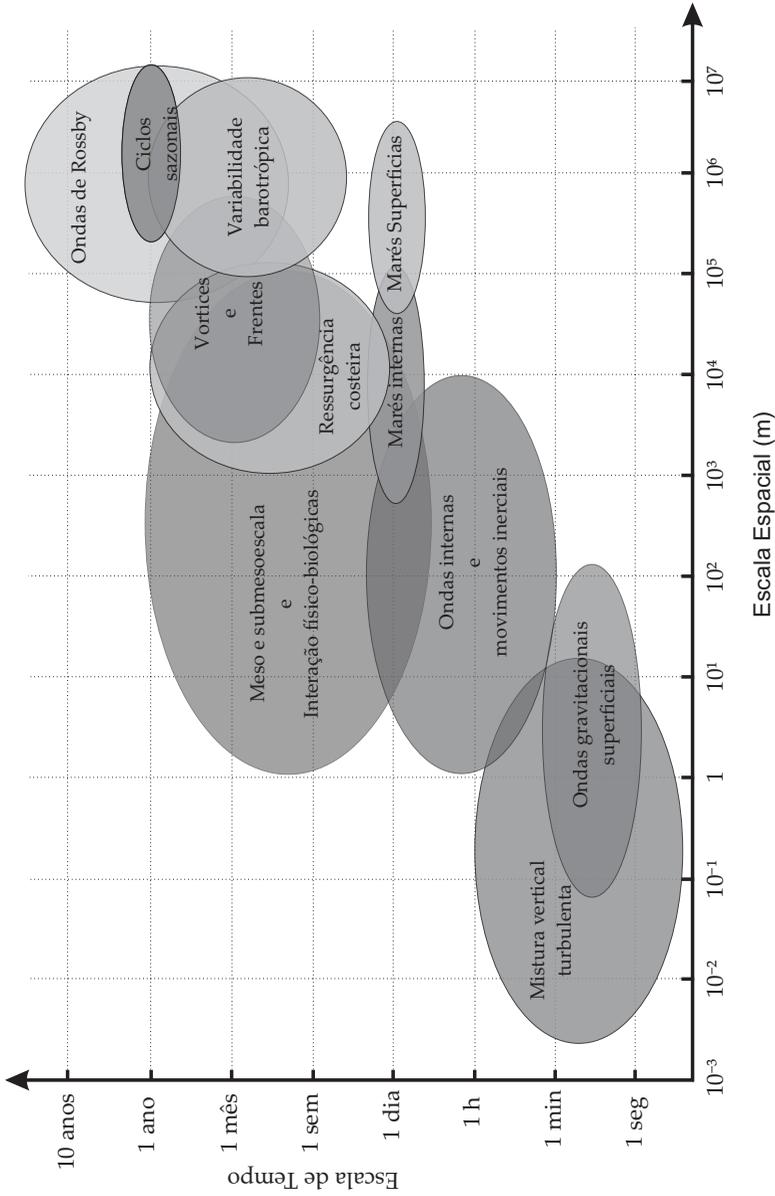


Figura 2.16.: Escala temporal e espacial dos processos oceanográficos, adaptado de Lampitt et al. (2010).

As estruturas de misturas verticais turbulentas estão relacionadas aos processos de mistura ativa no oceano. Nestes processos é possível destacar os tipos de mistura que formam estruturas finas: dedos de sal e convecção difusiva. De acordo com Schmitt (1994), as termoclinas de média e baixa latitude são instáveis para os dedos de sal e intrusão difusiva. Tais processos são importantes agentes de mistura lateral. Existe a evidência da relação temperatura/salinidade característica nas águas centrais. Há evidências sugestivas com relação à salinidade e temperatura nas Águas Centrais, onde esses processos causam taxas de mistura desiguais. Os resultados de modelo indicam que a presença dessas misturas tem profundas implicações para a circulação termohalina (SCHMITT, 1994; SIEDLER et al., 2013).

Os processos de mistura nessas escalas não são amplamente compreendidos. Desse modo, a melhoria nas capacidades de observação promoveria um maior avanço na compreensão desses processos.

3 Metodologia

A fim de alcançar o objetivo, o fluxo metodológico deste trabalho segue conforme apresentado na Figura 3.1. Ao longo da maior parte das etapas será constantemente referenciada a bibliografia para comparação dos métodos e busca de equações que são utilizadas no processamento sísmico. Tal abordagem possui o objetivo de aumentar a qualidade do resultado final, visto que não existe um fluxo fechado para o processamento sísmico e na bibliografia não é observada uma linha clara das etapas e algoritmos a serem aplicados aos dados.

O processamento dos dados sísmicos foi realizado no *software Seismic Unix*. Pacote que possui código aberto de *software* geofísicos mantido pelo *Center for Wave Phenomena (CWP)* no *Colorado School of Mines (CSM)*. Por ser uma ferramenta robusta e sem custo, é amplamente utilizada pelas universidades e centros de pesquisa. A escolha do *software* baseou-se nas publicações sobre OS em que o *software* utilizado é informado.

Para o embasamento dos processamentos aplicados foram utilizados como referências diretas os autores Claerbout (1979), Coffeen (1986), Khan (2010) e Yilmaz (2008). Para o processamento foram utilizados Forel, Benz e Pennington (2005). Para a aplicação do processamento à Oceanografia Sísmica foram utilizados como referências diretas os autores Quentel (2010), Buffett (2011), Kormann et al. (2010).

Para o processamento dos dados oceanográficos foram utilizados dois *software*, o Ocean Data View para análise das propriedades físicas e cálculo da velocidade do som e o Matlab para o cálculo da densidade e geração das figuras.

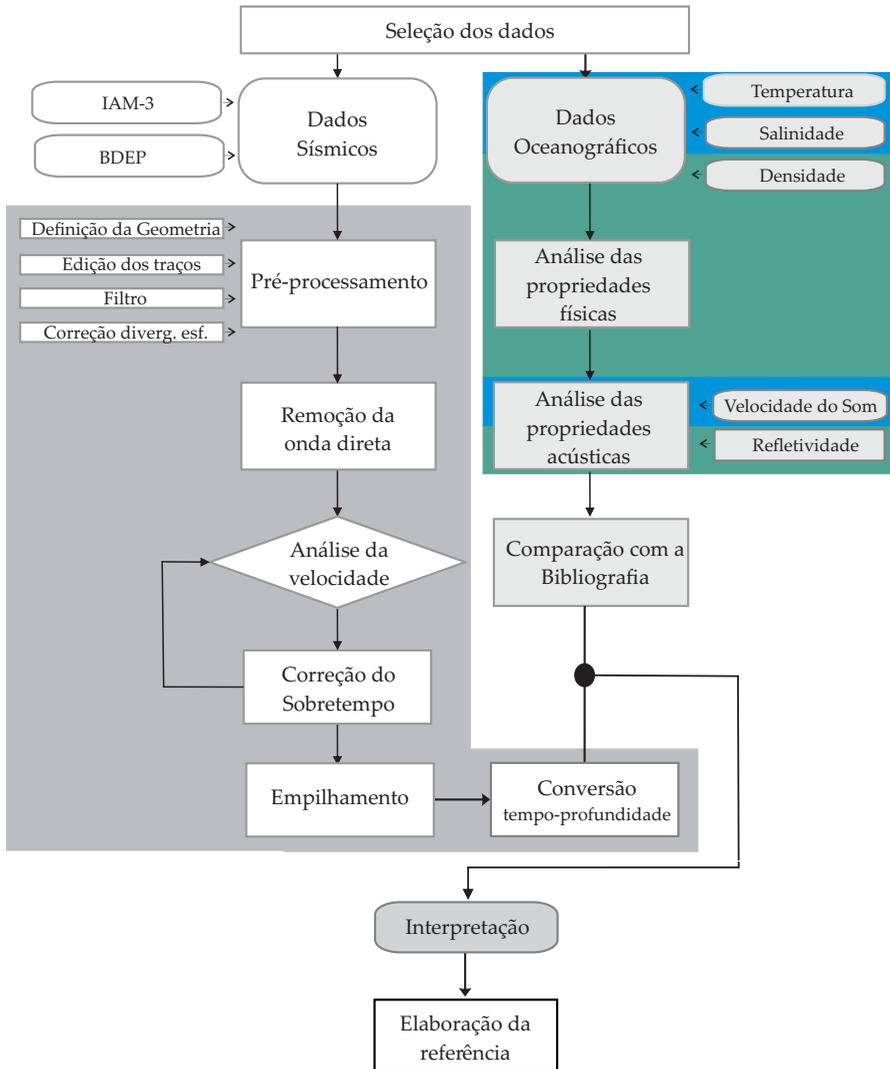


Figura 3.1.: Fluxograma das etapas aplicadas ao processamento de dados sísmicos e oceanográficos. A porção em cinza indica a parte do processamento realizado no Seismic Unix, a porção azul no Ocean Data View e a porção verde no Matlab.

3.1 Seleção dos dados

3.1.1 Linha IAM3

A linha sísmica IAM3 faz parte do levantamento realizado pelo *Iberian Atlantic Margins Project* realizado em 1993 no mar de Cadiz. Foi selecionado este dado devido à presença de fortes reflexões na coluna d'água ocasionadas por uma estrutura oceanográfica denominada *meddy*¹.

Para estabelecer um fluxo de processamento sísmico foi adquirida uma linha sísmica referência, trabalhada e processada por diversos autores (Buffett et al. (2009), Biescas et al. (2008)). Por meio da colaboração com a pesquisadora Ph.D Berta Biescas, do Instituto de Ciência Marinha de Bolonha- Itália, foi requerida a linha IAM3, cujos resultados estão publicados em Biescas et al. (2008).

3.1.2 Dados do BDEP

Existe um vasto acervo de dados sísmicos ao longo da região costeira e oceânica do Brasil, gerados a partir dos levantamentos realizados para prospecção e exploração de petróleo (PORSANI; PESTANA, 2009), com grande potencial de aplicação da metodologia da OS. Essa afirmação é devida aos dados utilizados em estudos anteriores na Oceanografia Sísmica apresentarem as características (configuração da fonte e dos hidrofones) bem próximas dos levantamentos sísmicos empregados na prospecção de petróleo.

É possível observar a distribuição desses levantamentos na *webpage* do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) regulado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) (Figura 3.2).

Diante da grande quantidade de dados, foram selecionados aqueles que possuem o levantamento em duas dimensões e aquisição em multicanal.

Na Figura 3.2, as linhas em destaque são os dados requisitados

¹Termo utilizado para denominar o redemoinho (*eddy*) originado no Mediterrâneo que possui um grande movimento giratório em sentido horário formado por lentes de água em forma oval.

ao BDEP. Foi aberto um processo de requerimento no mês de maio de 2015, com o Protocolo: FID 060283 e o número do Pedido: 7665. O processo foi aprovado e a fase de repasse ocorreu em dezembro do mesmo ano.

3.1.3 Dados oceanográficos

A obtenção dos parâmetros oceanográficos da coluna d'água no momento do levantamento sísmico é o procedimento ideal para aumento da relação sinal/ruído na imagem sísmica, visto que é possível obter mais precisamente a propagação do som. Tal fato permite melhorar a análise de velocidade e a correção do sobretempo no processamento sísmico e subsidiar uma correlação direta entre o sismograma e o perfil dos parâmetros físicos ao longo da coluna d'água.

Contudo, mesmo na ausência deste dados no momento do levantamento, é possível estimar a velocidade do som com grande proximidade por meio da análise de velocidade, ao longo do processamento sísmico (FORTIN; HOLBROOK, 2009) e ainda estabelecer comparações entre sismograma e perfil dos parâmetros utilizando dados coletados em outros momentos, como já realizado por Quentel et al. (2011).

Visando estabelecer uma relação sobre as reflexões na coluna d'água e identificar o padrão da salinidade e temperatura na região de estudo, foram utilizadas as estações presentes no banco de dados oceanográficos do *World Ocean Database* (WOD). Trata-se de um repositório criado pelo *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC) que é a maior coleção de dados oceanográficos disponíveis internacionalmente sem restrições.

O critério de escolha foi com base na proximidade de dois fatores:

- **Espacial:** Levando em conta a distância das linhas sísmicas processadas.
- **Temporal:** Levando em conta a proximidade temporal em relação à data de aquisição das linhas sísmicas. Quando essa

condição não foi observada, optou-se por utilizar dados de outros anos na mesma estação.

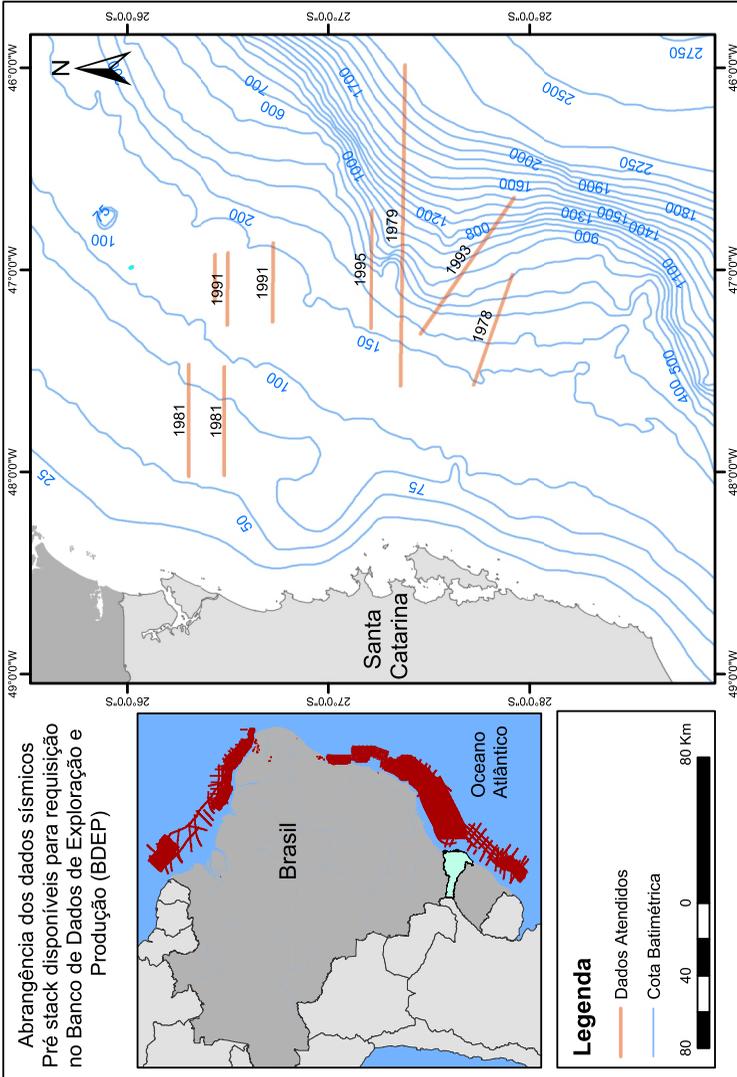


Figura 3.2.: Na imagem geral estão dispostos os acervos de dados sísmico 2D *pré-stack* em relação à costa brasileira. Ao lado estão dispostos os dados atendidos pela solicitação ao BDEP.

3.2 Processamento dos dados oceanográficos

Os dados oceanográficos foram tratados no *software* Matlab a fim de compará-los com os dados de sísmica marinha. Visto que os dados sísmicos são respostas formadas majoritariamente pela interação entre a impedância acústica e o pulso emitido, os principais parâmetros oceanográficos necessários para a comparação são os dados de temperatura (seção 3.2.1), salinidade (seção 3.2.2), densidade (seção 3.2.3) e profundidade.

A velocidade do som (seção 3.2.4) foi derivada no *software Ocean data View*² e utilizada para aprimorar o processamento sísmico.

Por fim, para estabelecer uma comparação entre os traços resultantes do processamento sísmico e as propriedades físicas da água do mar, foi calculada a impedância acústica sintética (seção 3.2.5).

3.2.1 Temperatura

Como descrito por Munk e Wunsch (1979) e também observado por Nandi et al. (2004) e Sallarès et al. (2009), a temperatura é o parâmetro que mais influência a refletividade na coluna d'água. Por isso, o perfil de temperatura ao longo de toda a coluna d'água permite ter um bom entendimento do comportamento da refletividade acústica.

No presente trabalho optou-se por não utilizar a temperatura potencial para as análises, já que este possui os mesmos valores de temperatura não convertidos.

A temperatura potencial é a medida da parcela d'água deveria ter caso ela não tivesse mudanças adiabáticas entre a sua posição de coleta e uma profundidade de referência, ou seja uma porção de água trazida do oceano profundo para a superfície expande-se e portanto tende a arrefecer. É uma usando uma profundidade de referência para compensar esse efeito quando são analisando amostras de águas profundas.

²*software* de exploração, análise e visualização de perfis oceanográficos e séries temporais georreferenciados.

A temperatura medida in-situ não leva em conta os efeitos da pressão e compressibilidade (TALLEY, 2011), efeitos que são mais perceptíveis em profundidades superiores a 1000 metros (Figura 3.3).

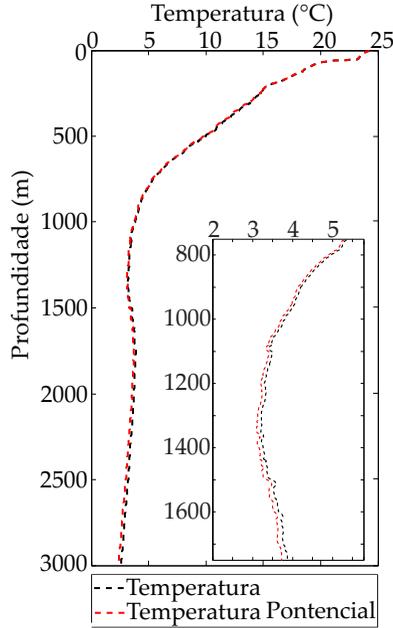


Figura 3.3.: Perfil de temperatura de uma estação aquisitada no verão de 1993, onde são comparados os valores de temperatura e temperatura potencial. No detalhe é possível observar que os valores começam a apresentar diferenças abaixo de 1000 m de profundidade.

3.2.2 Salinidade

Assim como os dados de temperatura, a salinidade foi tratada para identificar a sua distribuição vertical ao longo das estações analisadas. Apesar de ser um parâmetro que possui menor contribuição no que tange o contraste de impedância, o seu conhecimento é importante para trazer mais exatidão às próximas etapas. O perfil de salinidade também foi utilizado para identificar

as massas d'água por meio da assinatura termohalina e comparar com estudos anteriores.

A unidade de salinidade que foi utilizada é a salinidade prática (S_p) (PSS-78). Estabelecida em 1978, foi considerada pelo *Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards* e recomendada por todas as organizações oceanográficas.

Apesar de não ser a mais atualizada para determinar os parâmetros físicos proposta pela UNESCO (TEOS10)³, essa é a unidade que grande parte dos trabalhos publicados utilizam para descrever os parâmetros físicos e índices termohalinos das massas d'água.

3.2.3 Densidade

A medida da densidade da água do mar permite determinar a profundidade em que determinada parcela d'água estará em equilíbrio, sendo que, normalmente, as águas menos densas encontram-se em regiões superficiais e as mais densas em regiões mais profundas.

A determinação da densidade *in-situ* foi utilizada para a definição de Impedância Acústica Sintética (Seção 3.2.5) e calculado no Matlab a partir do algoritmo estabelecido no (TEOS-10).

O cálculo da densidade *in situ* (ρ) é obtido através da salinidade absoluta (S_A)⁴, temperatura conservativa (Θ)⁵ e pressão (p) (IOC; IAPSO, 2010).

³*Thermodynamic Equation Of Seawater - 2010 (TEOS- 10)* estabelecida pela Comissão Intergovernamental Oceanográfica em 2009.

⁴Medida da fração de sal na água do mar (g/kg) ao invés da medida da condutividade da água do mar (dado por partes por mil).

⁵A temperatura conservativa é semelhante à temperatura potencial. Em ambos os casos, toma-se uma amostra de água do mar a uma profundidade e pressão determinada e compensa-se na medida de temperatura a redução da pressão sobre a água do mar de forma adiabática e isohalina até atingir a pressão $p = 0$ dbar.

3.2.4 Velocidade do som

A partir dos dados físicos obtidos é possível obter a velocidade do som. Esse parâmetro foi obtido no *software Ocean Data View (ODV)*, o qual possui o algoritmo mais atualizado (*TEOS-10*) já implementado (IOC; IAPSO, 2010). Esse parâmetro foi utilizado no cálculo de impedância acústica sintética (próxima seção) e também para aprimorar a análise de velocidade do processamento sísmico e acrescentar mais precisão ao processamento.

3.2.5 Impedância Acústica Sintética e Refletividade

Parâmetros calculados afim de estabelecer subsídios para a comparação de entre os dados sísmicos marinhos e os dados oceanográficos. Como demonstrado anteriormente (Sessão 2.2.4), as reflexões na coluna d'água⁶ são contrastes de impedância acústica devido às diferenças de densidade e velocidade do som ao longo da propagação. Aplicando a Equação (2.4) ao dados oceanográficos ao longo de toda a coluna d'água obtêm-se:

$$Z = \frac{d}{dz}(\rho c), \quad (3.1)$$

$$Z = c \frac{d\rho}{dz} + \rho \frac{dc}{dz}. \quad (3.2)$$

A comparação entre os dados é realizada através da refletividade dada pela equação:

$$R = \frac{1}{c} \frac{dc}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz}. \quad (3.3)$$

⁶Considerando a propagação de uma onda plana.

3.3 Processamento dos dados sísmicos

3.3.1 Pré-processamento

De acordo com Yilmaz (2008), os dados de campo são gravados de forma multiplexada e podem ser gravados em diversos formatos. A preparação do dado para o processamento se dá pela demultiplexação. Matematicamente, esse processo é visto como a transposição de dados gravados em campo, visto que no levantamento, os dados são gravados de forma conjunta e não em um traço por vez (COFFEEN, 1986). O resultado desse processo é uma matriz onde cada coluna representa um traço sísmico gravado em diferentes *offsets* com um tiro comum. Neste estágio, os dados são convertidos para o formato conveniente que será utilizado ao longo do processamento. O tipo de arquivo é relacionado com o *software* que será empregado no processamento.

O formato SEG-Y é comumente utilizado na indústria sísmica, sendo estabelecido pelo *Society of Exploration Geophysicists* (YILMAZ, 2008) e é facilmente exportado para o formato de trabalho de cada *software*. Por esse motivo, esse foi o formato utilizado neste trabalho.

3.3.1.1 Definição da geometria

A definição correta da geometria é importante pois a localização real das fontes, receptores e distâncias relativas entre os traços e fonte-receptor são necessárias para a correta configuração dos traços e organização em arranjos. As informações necessárias estão inicialmente apresentadas no cabeçalho dos traços (Tabela 3.1) (YILMAZ, 2008) e devem ser complementadas com as informações presentes no relatório do observador.

Tabela 3.1.: Exemplo de cabeçalho de uma linha sísmica antes de inserir a geometria.

71040	Traces:
tracl	6-72890 (6 - 72890)
tracr	1-71040 (1 - 71040)
fldr	1-469 (1 - 469)
tracl	1-192 (1 - 192)
ep	1-370 (1 - 370)
ns	6401
dt	4000
year	1993

Na primeira linha é possível identificar a quantidade de traços que essa linha possui. Na primeira coluna são dispostas as palavra-chaves que esse cabeçalho possui. Os números em parênteses indicam o primeiro e último traços do arquivo.

São exemplos de chaves que são utilizadas no processamento são:

- **Tracl:** Sequência do traço dentro da linha;
- **Tracr:** Sequência do traço dentro na gravação (arquivo);
- **Fldr:** Número original de gravação de acordo com os disparos;
- **Tracf:** Número do traço em cada arquivo, caso o arquivo é de conjunto de tiro, por exemplo, este número está relacionado ao número de canais de aquisição;
- **Ep:** Número da fonte de energia: na maioria dos casos, é numericamente igual ao Fldr.

As informações contidas no relatório do observador são utilizadas para inserir novas chaves ou editar as informações contidas no cabeçalho. As chaves que devem ser inseridas são:

- **Sx:** Coordenada horizontal da fonte;

- **Gx**: Coordenada horizontal do hidrofone;
- **Offset**: Distância do ponto de emissão em relação a cada elemento do grupo de hidrofones ($offset = Gx - Sx$). Deve-se notar a ordem dos hidrofones em relação ao distanciamento da fonte;
- **CDP**: Número de conjuntos de pontos médios comuns que existem dentro do registro, onde cada $CDP = offset(i) / 2$ ⁷.

A partir desta etapa foi possível saber a distância de cada par emissor-receptor e a posição de cada arranjo e representá-las no quadro de empilhamento.

A construção de um quadro de empilhamento (Figura 3.4) possibilitou identificar a quantidade de traços que cada conjunto CMP possui, ou seja, a cobertura do levantamento. Assim definiu-se o intervalo de análise, visando processar os CMPs com maior quantidade de traços.

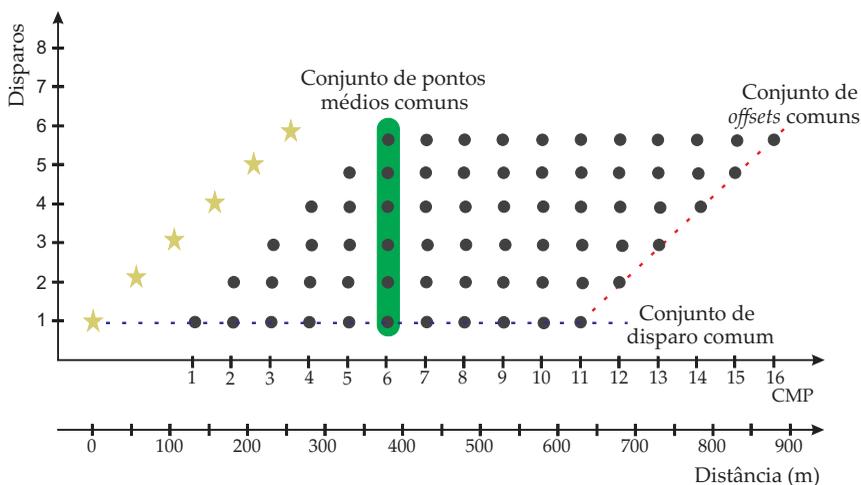


Figura 3.4.: Diagrama de empilhamento dos dados sísmicos de acordo com a disposição dos equipamentos no momento do levantamento.

⁷O CDP e CMP possuem valores iguais quando a posição dos refletores é considerada horizontal.

Na Figura 3.4 é representada uma configuração hipotética que possui 1 disparo a cada 50 metros, uma linha com 11 hidrofones posicionados a cada 50 m, sendo que o mais próximo da fonte está a 125 m de distância da fonte.

Na cobertura máxima (N_t), ou quantidade máxima de traços por CMP, é possível determinar por meio da equação descrita por Yilmaz (2008) :

$$N_t = \frac{N_c \Delta_c}{2\Delta_d}, \quad (3.4)$$

no qual Δ_c e Δ_d são as distâncias entre os canais e os disparos, respectivamente, e N_c é o número de canais utilizados no levantamento.

3.3.1.2 Edição dos traços

A etapa seguinte do pré-processamento é basicamente o controle de qualidade do dado que seguirá para o processamento. Os dados de campo podem conter registros ruins e dados falhos (KHAN, 2010). Efeitos gerados devido ao mau funcionamento momentâneo ou permanente dos hidrofones. No *software* de processamento é possível visualizar esses traços e realizar a edição de acordo com cada efeito observado (Figura 3.5) .

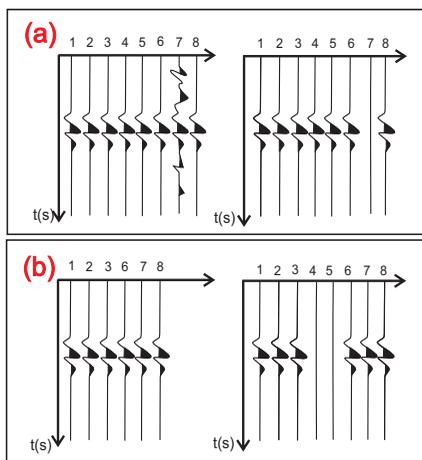


Figura 3.5.: Edição dos traços de acordo com registro ruidoso (a) e inserção de traços para ocupar o espaço dos faltantes (b).

Todos os traços ruins são silenciados em um processo onde as amplitudes são zeradas. As linhas faltantes são completadas pela inserção de traços nulos com a mesma configuração de amostragem (tempo e intervalo) das reais.

3.3.1.3 Filtragem

Yilmaz (2008) define que o processo de filtragem é a modificação de uma série temporal aplicando uma outra série temporal característica. A aplicação é realizada por meio da convolução das séries temporais no domínio do tempo ou por multiplicação no domínio da frequências.

A maioria dos levantamentos marinhos possui interferência ocasionada pelo rebocamento do *streamer* e pelo efeito da ondulação. Esses efeitos geram ruídos com energias de baixa frequência e apresentam altas amplitudes. Tais efeitos podem ser retirados logo nas fases iniciais do processamento. São reconhecidos no sismograma por apresentar um padrão distinto dos refletores (YILMAZ, 2008).

Dessa forma, um filtro pode ser aplicado na forma de filtro

passa-banda, rejeita-banda, passa-alta (corta baixa) ou passa-baixa (corta alta). Em geral, nos *softwares* de processamento, esses filtros são baseados no mesmo princípio, construção de uma Wavelet de fase zero e espectros de amplitude que possuam uma a quatro especificações (YILMAZ, 2008).

Os filtros utilizados neste trabalho são caracterizados como passa-banda. Nesse filtro é selecionada a faixa de frequências que se quer preservar, que são úteis para o processamento, e as frequências fora dessa faixa pré-determinada são removidas (KHAN, 2010).

3.3.1.4 Correção da divergência esférica

A amplitude do sinal sonoro decai a medida em que a onda se propaga. Esse efeito ocorre devido à divergência esférica na propagação da onda, causando um decaimento na amplitude proporcionalmente inverso ao raio de propagação (CLAERBOUT, 1979) (Figura 3.6). Essa perda ocorre em todas as direções, tanto lateralmente com *offset* e verticalmente, com profundidade (KHAN, 2010). Para corrigir esse fenômeno é necessário aplicar um ganho que utiliza uma função com escala exponencial (YILMAZ, 2008), visto que a densidade de energia decai na proporção de $1/r^2$ e a amplitude do decaimento é dada pelo quadrado da densidade de energia. A correção da amplitude foi obtida pela equação 3.5, no qual α é igual a 2, de acordo com Yilmaz (2008), pois ele é o fator de compensação do decaimento em função do tempo de propagação t .

$$G(T) = t^\alpha. \quad (3.5)$$

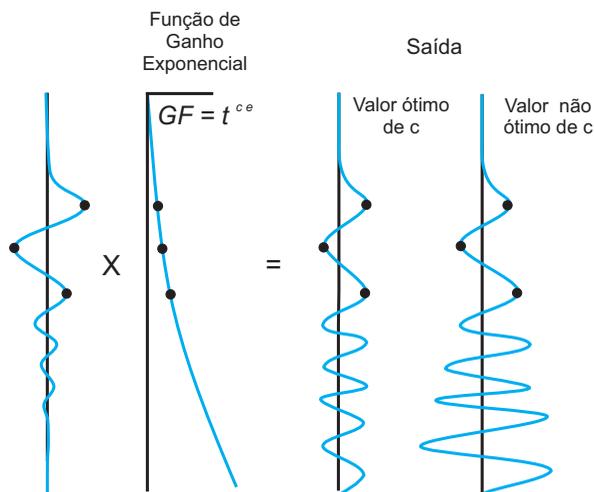


Figura 3.6.: Correção da divergência esférica. Fonte: Khan (2010). Modificado pelo autor.

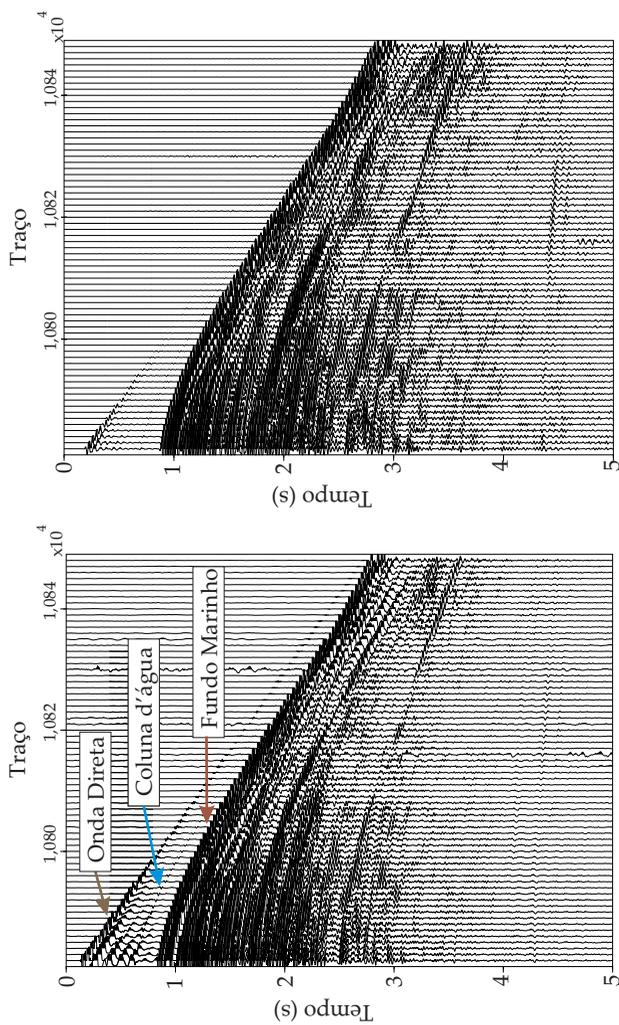
3.3.2 Remoção da onda direta

A remoção da onda direta é um dos principais desafios do processamento, visto que esse evento corresponde a várias ordens de magnitude maiores que as reflexões na coluna d'água e sobrepõe os possíveis eventos termohalinos quando analisa-se regiões iniciais do sismograma (primeiros segundos).

Como é possível observar na Figura 3.7, a total supressão desse evento não é trivial. Contudo, ao longo de todo o processamento, busca-se atenuar o seu efeito ao máximo.

No sismograma Figura 3.7 (a) foi possível identificar a onda direta, as reflexões que correspondem à coluna d'água e o fundo marinho. Na Figura 3.7 (b) é possível observar que o efeito da onda direta é reduzido consideravelmente.

A remoção da onda direta neste trabalho foi realizada por meio do método de subtração adaptativa, que foi desenvolvido e compartilhado por Dr. Dirk Klaeschen do Centro Helmholtz de Pesquisa Oceânica de Kiel.



(a) Conjunto de traços do disparo 150 com a identificação dos eventos.

(b) Atenuação do efeito da onda direta.

Figura 3.7.: Remoção da onda direta realizada pelo método de subtração adaptativa aplicada na linha sísmica 93.

A aplicação deste método pode ser observada nos trabalhos de Krahmann et al. (2008), Ruddick et al. (2009) e Huang et al. (2012) como anteriormente apresentado na Tabela 2.1.

3.3.3 Análise da velocidade

Essa etapa tem como objetivo determinar a velocidade sísmica nas diferentes camadas ao longo da propagação. Essas velocidades serão usadas em diversas etapas do processamento e interpretação como: correção do sobretempo, empilhamento, determinação de velocidade interna, migração e conversão de tempo para profundidade (MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011).

Para aplicar a correção do sobretempo, desenvolvida na etapa seguinte, é necessário conhecer as velocidades de empilhamento em cada porção dos dados.

Pelo fato da velocidade mudar verticalmente, é necessário elaborar um espectro de velocidade para determinar a velocidade de cada refletor em função do tempo de propagação (Figura 3.8).

Em relação a mudança lateral é preciso realizar a análise de velocidade para diferentes conjuntos CMPs, onde um único conjunto CMP irá analisar somente a variação vertical e interpolá-los para vários conjuntos CMPs.

O *semblance* é uma medida quantitativa da coerência dos dados sísmicos de vários canais que é igual à energia de um traço empilhado dividido pela energia de todos os traços que formam o empilhamento (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002; NORMAN, 1991). Os valores de *semblance* variam entre 1 e 0. O valor máximo é quando os valores de todos os canais são perfeitamente coerentes, ou mostram continuidade traço a traço em um conjunto CMP.

Através do painel *semblance* são escolhidas as velocidades de propagação em função do tempo

Nas camadas presentes dentro da coluna d'água, diferente da crosta marinha, a velocidade de propagação varia em escalas menores (ALVES, 2009; BUFFETT, 2008). No entanto, é possível observar uma variação na velocidade e uma melhora significativa

na qualidade do empilhamento do dado por meio da correção dinâmica.

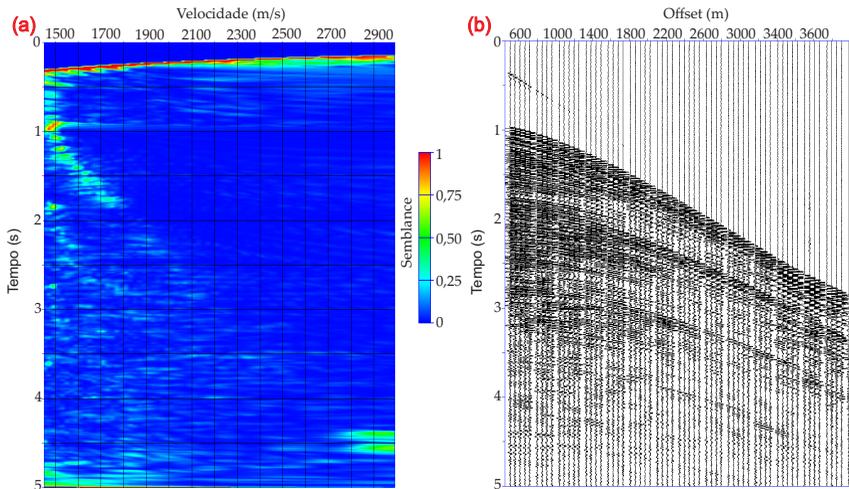


Figura 3.8.: Análise da velocidade realizada por meio do painel *semblance* (a) de um arranjo CMP 200 da linha 93 (b) aplicada na linha sísmica 93.

Para implementar essa etapa foi utilizada como base a rotina elaborada e compartilhada pelo professor Renato Prado, professor da Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) na Universidade do Estado de São Paulo (USP). O resultado desse processo é um modelo de campo de velocidade que será utilizado nos processos seguintes.

3.3.4 Correção do sobretempo

O campo de velocidade é utilizado na correção do sobretempo normal (*normal moveout* -NMO) do conjunto CMP. Baseado na premissa que, nos conjuntos de CMP, os tempos de propagação de um pulso refletido como uma função da distância (*offset*) seguem trajetórias hiperbólicas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). O processo de correção NMO remove o efeito do sobretempo na propagação dos pulsos refletidos (YILMAZ, 2008). Isto é, a correção

NMO corrige as diferenças de tempo das reflexões causadas pelo aumento da distância entre fonte e receptor de um CMP, de modo que os tempos de chegada de um determinado refletor sejam os mesmos em todos os traços de um CMP. Dessa forma, os tempos das reflexões são observados como se estivessem no *offset* zero (Figura 3.9).

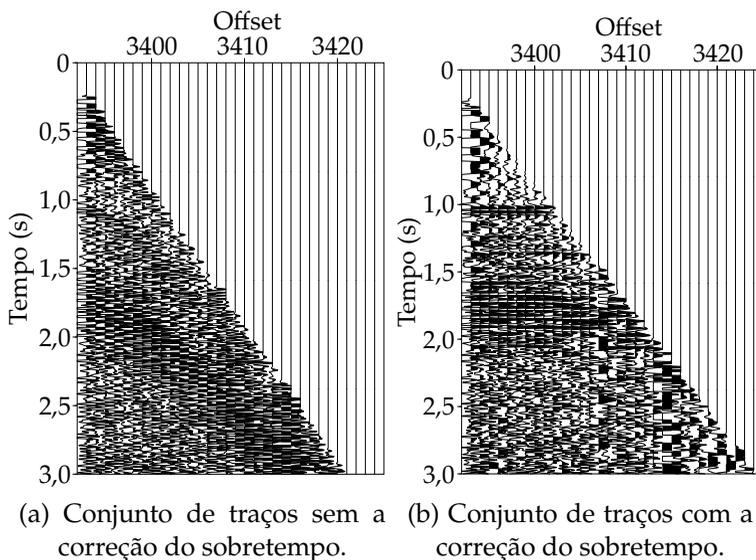


Figura 3.9.: Correção do sobretempo de chegada de acordo com o distanciamento do *offset* aplicado no arranjo CMP 800 da linha sísmica IAM3.

A Figura 3.9 é sequência do processo interior ilustrado na Figura 3.8, sendo que apenas foi limitada a visualização em função do tempo em 3,0 segundos.

A representação numérica da correção NMO definida por Yilmaz (2008) pode ser descrita como:

$$\Delta t_{\text{nmo}} = t_0 \left\{ 1 + \left[\left(\frac{x}{v_{\text{nmo}} t_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\}, \quad (3.6)$$

no qual t_0 é o tempo de trânsito ao longo de um trecho vertical e v_{nmo} é a velocidade do som no meio antes da interface refletora. No *software* de processamento é possível realizar a delimitação das hipérbolas ao longo da reflexão para fazer uma medição direta das velocidades, e assim a correção para toda a seção. De acordo com Alves (2009), apesar de requerer uma atenção maior para traçar as hipérbolas e tempo no processamento, é possível obter uma boa função de velocidades.

É importante ressaltar o efeito de estiramento (*stretching*) da forma de onda. Esse efeito resulta em descaracterização dos refletores mais próximos da superfície em *offsets* mais distantes e é mitigado pelo silenciamento automático no próprio processamento (YILMAZ, 2008).

3.3.5 Empilhamento

A proposta desta etapa é aumentar a relação sinal-ruído através da soma dos traços que possuem o CMP. A redundância do levantamento possibilita a soma de vários traços de mesmo valor CMP, possibilitando a eliminação do ruído, devido à combinação destrutiva, e melhor qualidade no sinal devido à combinação construtiva ao longo da soma dos traços (MOUSA; AL-SHUHAIL, 2011; BUFFETT, 2008). Esse processo tem como resultado uma imagem aproximada das estruturas em subsuperfície.

De acordo com a correção das reflexões da etapa anterior, é possível obter o empilhamento do CMP (Figura 2.8), reduzindo assim o volume dos dados. O processo é exibido na Figura 3.10.

O empilhamento consiste na transformação dos dados em seções de *zero -offset*, como se o ponto de reflexão estivesse logo abaixo da fonte, isto é, os traços que amostram um mesmo lugar são somados para aumentar a relação sinal/ruído.

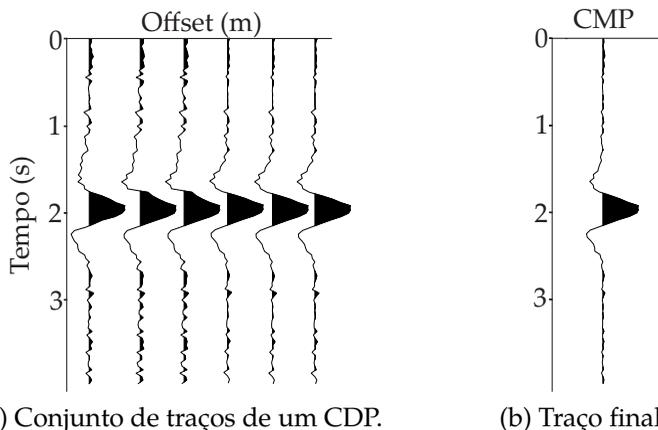


Figura 3.10.: Empilhamento dos traços que compõe um CMP.

O resultado do processo é um único traço para cada CDP (Figura 3.10 (b)).

Para isso é feita uma soma dos traços contidos em cada CMP, definida pela equação (HATTON; WORTHINGTON; MAKIN, 1986):

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i(t). \quad (3.7)$$

no qual N é a cobertura, quantidade de vezes que o mesmo ponto foi amostrado e $a_i(t)$ os sinais temporais do traço sísmico i .

3.3.6 Análise dos traços empilhados

Nesta etapa foi realizada a análise dos traços sísmicos e identificação do comportamento das amplitudes nessas porções.

Foram analisados três janelas temporais com a mesma duração: região com reflexão; região sem reflexão de um mesmo traço e onda direta.

Optou-se por comparar com a onda direta porque o evento contém as informações do pulso emitido de maneira mais íntegra,

ou seja, possui menos interação com o ambiente ao longo da propagação.

Dessa forma foi possível identificar o padrão da amplitude do sinal das reflexões na coluna d'água de acordo com as regiões onde não tem reflexões e a onda direta.

3.3.7 Conversão do tempo para profundidade

Usualmente, o aumento de resolução de uma seção sísmica e a conversão de tempo de propagação para profundidade é realizada pelo processo de migração. Yilmaz (2008) define que migração é o processo de reconstrução de um plano de seção sísmica de modo que os eventos de reflexão sejam reposicionados sob suas corretas localizações em superfície e nos tempos de reflexão verticais corretos. Esse processo aumenta a resolução das seções sísmicas por atenuar padrões de difração produzidos por refletores pontuais e camadas que possuem falhas (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

A migração requer um conhecimento inicial do campo de velocidades de propagação nas estruturas. Informação que pode ser obtida interativamente por meio da análise de velocidade. De acordo com (BUFFETT, 2008), medições simultâneas da velocidade do som ao longo do levantamento sísmico, permite aplicar a migração com mais acurácia do que somente a análise de velocidade interativa.

Foram levantados os tipos de migração e algoritmos empregados na OS e constatou-se que a aplicação desta etapa nos dados empilhados adicionou efeitos que interferem na resolução da imagem obtida. Como observado também por Moncada (2015), Quentel (2010) e Alves (2009), tal efeito é decorrente da ausência de conhecimento preciso do campo de velocidade do som no momento do levantamento sísmico. Para Moncada (2015) e Quentel (2010) a migração não proporciona melhoria para o sinal que está na coluna d'água uma vez que o empilhamento foi realizado.

Dessa forma, a migração não foi aplicada no presente trabalho. Para a determinação das profundidades dos refletores será utilizada

a conversão do eixo do tempo em profundidade de acordo com a equação seguinte.

$$d_z = v \cdot \frac{dt}{2} , \quad (3.8)$$

no qual t e v especificam as velocidades em função do tempo. Interpolação linear e extrapolação constante são usadas para determinar as velocidades intervalares nos tempos não especificados.

3.3.8 Interpretação

Nesta etapa, os eventos de reflexão observados nos dados sísmicos foram interpretadas por meio de correlação com estudos oceanográficos descritivos da região sudeste do Brasil e com dados físicos históricos da região disponíveis no WOD. Dessa forma, é possível identificar possíveis correlações das estruturas oceanográficas com as reflexões na coluna d'água.

Serão comparadas também as resoluções horizontal e vertical dos levantamentos sísmicos com dados das estações oceanográficas, assumindo que a resolução horizontal das estações oceanográficas é igual à distância entre as amostragens verticais.

3.3.9 Comparação com a Bibliografia

Essa etapa procurou identificar as massas d'água por meio da análise dos dados oceanográficos e da comparação com trabalhos já realizados na região de estudo. A análise está contida nas profundidades de 100 a 1000 m, por ser a região de abrangência dos levantamentos sísmicos processados. Dessa forma, como classificado por Emery (2003), o presente trabalho está contemplando as massas d'águas:

- Superiores: Água tropical e Água Central do Atlântico Sul;
- Intermediárias: Água intermediária da Antártica.

3.4 Elaboração da referência

Afim de consolidar as pesquisas em Oceanografia Sísmica, as etapas de processamento foram documentadas detalhadamente para consulta bibliográfica em língua portuguesa. As etapas de processamento utilizaram ferramentas já implementadas no software.

O documento foi elaborado pela compilação das rotinas e detalhamento das etapas no processamento dos dados para a Oceanografia Sísmica.

4 Processamento dos dados oceanográficos

A escolha dos dados utilizados levou em consideração a menor distância temporal e espacial das linhas sísmicas obtidas. Considerando a disponibilidade dos dados oceanográficos, a escolha abrangeu caracterizar a região de acordo com a estação do ano (Tabela 4.1).

Tabela 4.1.: Distribuição dos dados oceanográficos de acordo com as estações do ano em que foram realizados os levantamentos sísmicos.

Linhas sísmicas		Dados oceanográficos	
Data	Levantamento	Data	Campanha
31/01/1993	0247_CARAVELA_1993	31/dez/1992	A10_06MT22_5
		01/jan/1991	AR15_06MT15_1
25/07/1995	0247_CARAVELA_1995	03/jun/1991	WOD13_BR
		29/out/2011	WOD13_US

Assim, para a linha sísmica 0247_CARAVELA_93 foram analisados os dados oceanográficos dos verões de 1991 e 1993. Para a linha 0247_CARAVELA_95 os dados de inverno do ano de 1993 e primavera do ano 2011. Na Figura 4.1 é observada a distribuição espacial de acordo com a estação do ano.

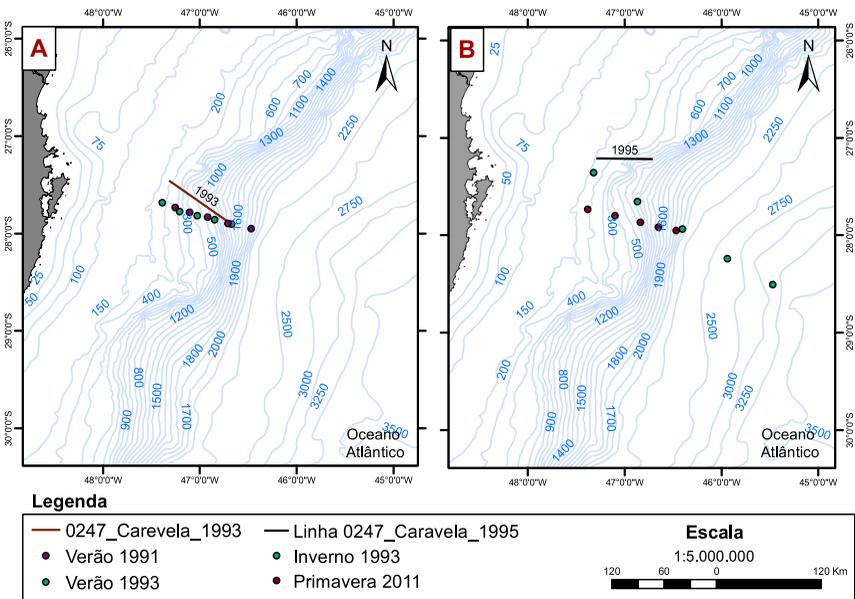


Figura 4.1.: Localização das estações onde foram obtidos os dados de temperatura e salinidade.

Na Figura 4.1 (A) observam-se os dados coletados nos verões de 1991 e 1993. Na Figura 4.1 (B) é observada a posição das linhas sísmicas em relação aos dados coletados no inverno de 1993 e primavera 2011. Optou-se por usar um conjunto de dados da primavera devido à ausência de dados na região para essa época do ano.

A visualização das propriedades físicas e acústicas foram limitadas em 800 metros de profundidade para compreender as profundidades em que as linhas sísmicas foram aquisitadas.

4.1 Análise das propriedades físicas

Temperatura e Salinidade

Considerando os valores de temperatura e salinidade ao longo das estações selecionadas, na Figura 4.2 é possível observar o padrão decrescente dos valores de temperatura e variável da

salinidade a medida que aumenta a profundidade.

De maneira geral para os dados de verão de 1993 (Figura 4.2 (A)) e 1991 (Figura 4.2 (B)), os valores de temperatura apresentaram uma pequena camada de mistura nos primeiros 40 m de profundidade, onde a temperatura permaneceu constante (25°C).

Abaixo dessa camada, a temperatura apresentou uma taxa de decaimento mais significativa nos pontos 4 e 5 coletados no verão de 1991, com variação de $4,0^{\circ}\text{C}$ na profundidade de 50 metros.

Considerando os dados coletados no verão de 1993, foi observada uma variação de 2°C na profundidade de 470 metros do ponto 4 e 1°C nas profundidades de 240m e 500m no ponto 3. Nas demais partes do perfis, o decréscimo nos valores de temperatura foi gradual até o final da amostragem.

A salinidade apresentou valores crescentes até a profundidade de 50 metros em todos os pontos chegando ao valor médio de 37,2 ‰. Após essa camada, foram verificados valores decrescentes até o fundo. Diferentemente dos outros pontos, o ponto 4, coletado no verão de 1993, apresentou uma rápida variação de salinidade de 0,4 ‰ na profundidade de 450 metros e o ponto 5, coletado no verão de 1991, apresentou variação de salinidade de 0,4 ‰ na profundidade de 160 metros.

Considerando os dados de inverno de 1993 (Figura 4.2 (C)) e primavera de 2011 (Figura 4.2 (D)), foi possível observar que a temperatura e salinidade possuem valores constantes de ($23,0^{\circ}\text{C}$) e 37,0 ‰, respectivamente, quando são levados em consideração os pontos mais distantes da costa (pontos 3, 4 e 5), representando assim uma camada mistura nos primeiros 100 m de profundidade.

Abaixo dessa camada nos dados de Inverno de 1993, a temperatura apresentou uma taxa de decaimento mais significativa nos pontos mais distantes da costa com variação de $5,0^{\circ}\text{C}$ na profundidade de 85 metros e $1,0^{\circ}\text{C}$ na profundidade de 180 metros no ponto 3. No ponto 4 variou $3,0^{\circ}\text{C}$ na profundidade de 100 metros e no ponto 5 variou $1,0^{\circ}\text{C}$ na profundidade de 330 metros. Os dados de primavera de 2011 apresentaram uma taxa gradual de decaimento da temperatura.

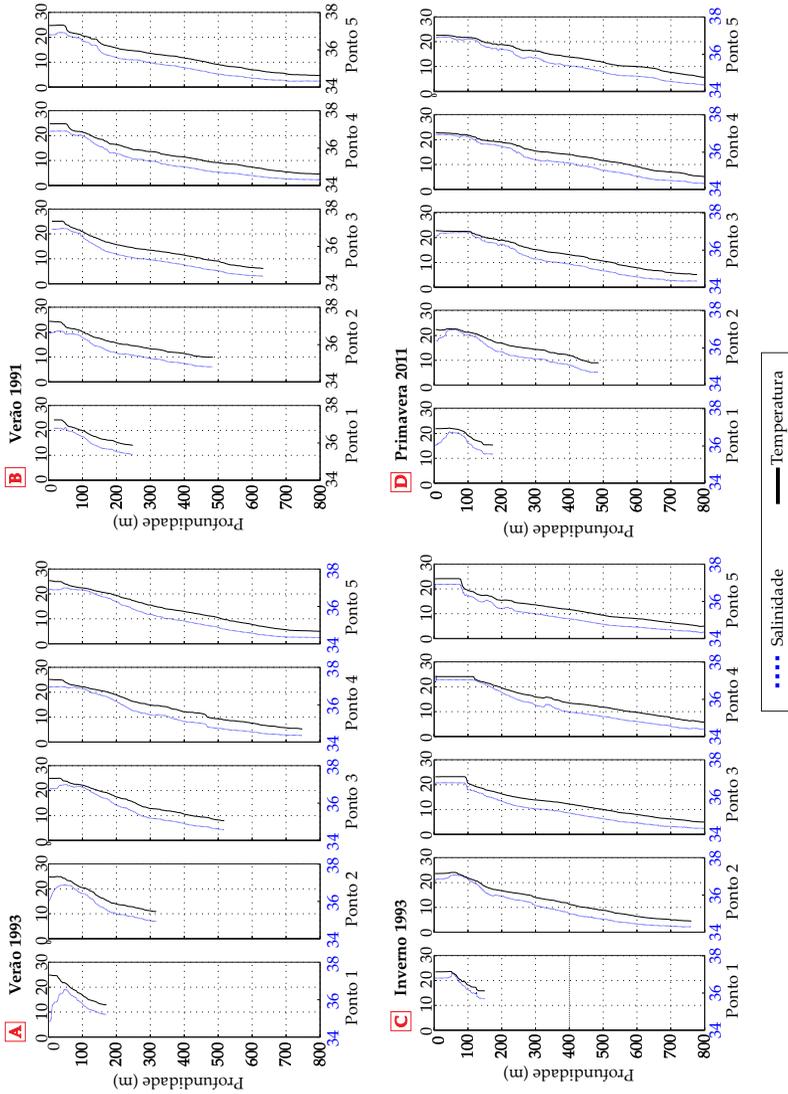


Figura 4.2.: Variação da temperatura e salinidade ao longo da coluna d'água.

Com relação a salinidade, foi observado nos dados de inverno de 1993 que os valores decresceram significativamente abaixo da camada de mistura, com variação de 0,6 ‰ na profundidade de 85 metros e 0,4 ‰ na profundidade de 180 metros no ponto 3, 0,4 ‰ na profundidade de 100 metros no ponto 4 e 0,2 ‰ na profundidade de 330 metros. As mesmas profundidades nas quais foi observado o decaimento mais significativo da temperatura.

Nos dados de primavera de 2011 não foi possível observar variações significativas na salinidade, visto que apresenta um decaimento gradual.

Densidade

Considerando os valores de densidade para as estações estudadas, na Figura 4.3 é possível observar, como já esperado, o padrão crescente dos valores a medida em que aumenta a profundidade.

Os dados dos verões de 1993 (Figura 4.3 (A)) e 1991 (Figura 4.3 (B)) mostraram comportamento semelhante ao apresentar valores constantes nos primeiros 40 metros. No primeiro conjunto de dados é possível observar, na profundidade 470 m, uma rápida variação de $0,2 \text{ kg/m}^3$ ao longo de 10 metros.

Os dados do inverno de 1993 (Figura 4.3 (C)) também apresentaram valores constantes, porém em uma camada mais espessa da coluna d'água. Considerando os pontos mais distantes da costa (pontos 3, 4 e 5) pode-se alcançar a profundidade de 100 metros.

Já nos dados de 2011 (Figura 4.3 (D)) não foi observado uma estratificação tão pronunciada como observado nos dados anteriores, apresentando assim um aumento gradual ao longo de toda a coluna d'água.

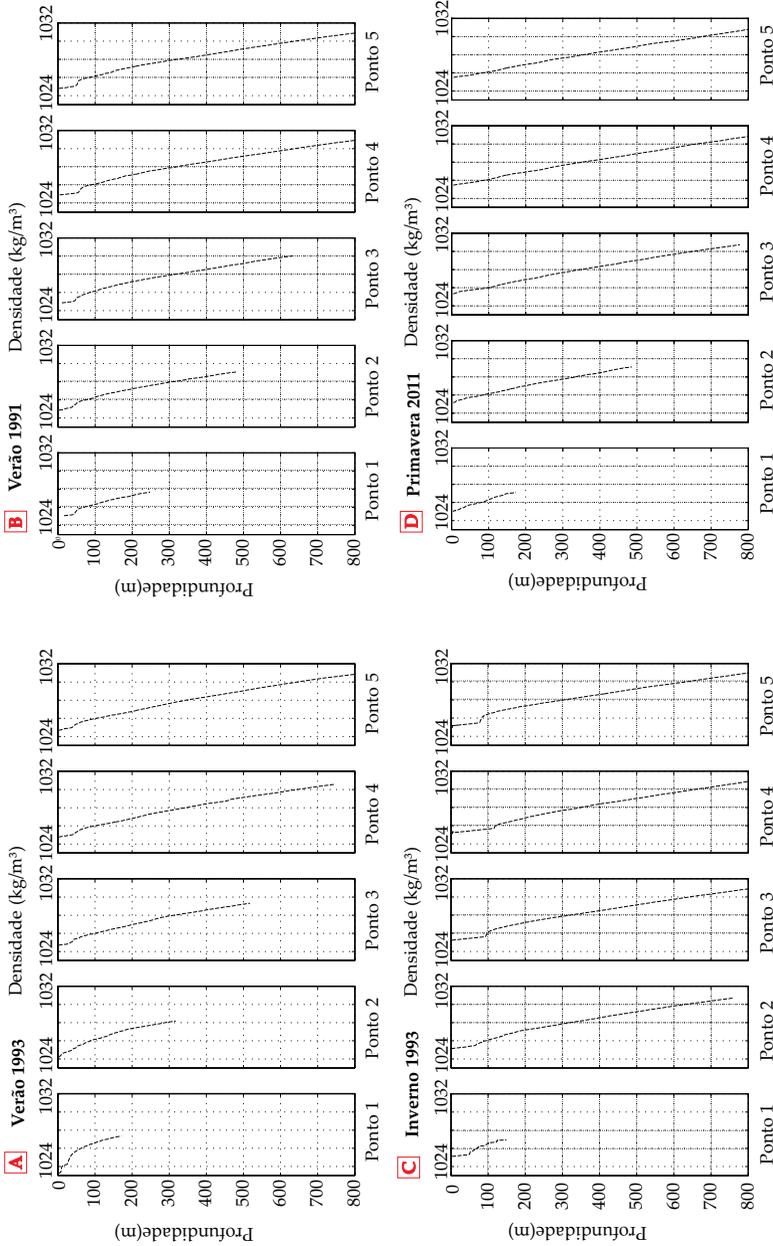


Figura 4.3.: Variação da densidade ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.

4.2 Análise das propriedades acústicas

Perfil do som na coluna d'água

O som possui uma ótima propagação no ambiente marinho devido à pouca resistência à propagação na coluna d'água. Como é possível observar na Figura 4.4, a velocidade do som apresentou valores decrescentes ao longo de todos os perfil nas profundidades analisadas.

Os dados da Figura 4.4 (A) e Figura 4.4 (B) apresentaram os valores constantes nos 40 metros de profundidade de 1537,00 m/s. Abaixo dessa camada, a velocidade decaiu gradualmente até 1483,00 m/s no seu ponto mais profundo (ponto 5). Em Figura 4.4 (A) foi possível notar também uma rápida mudança no valor de velocidade em 10 m/s ao longo de 10 metros na profundidade 470 m (ponto 4).

Os dados da Figura 4.4 (C) apresentaram uma camada de valores de velocidade constante (1535,00 m/s) com profundidade média de 100 m. Abaixo dessa camada a velocidade decaiu gradualmente até 1485,00 m/s em seus pontos mais profundos (ponto 4 e 5).

Os dados da Figura 4.4 (D) não apresentaram uma camada de valores constantes. Foi apenas constatado o decaimento gradual de 1530 m/s na superfície até 1480 m/s nos pontos mais profundos (ponto 4 e 5).

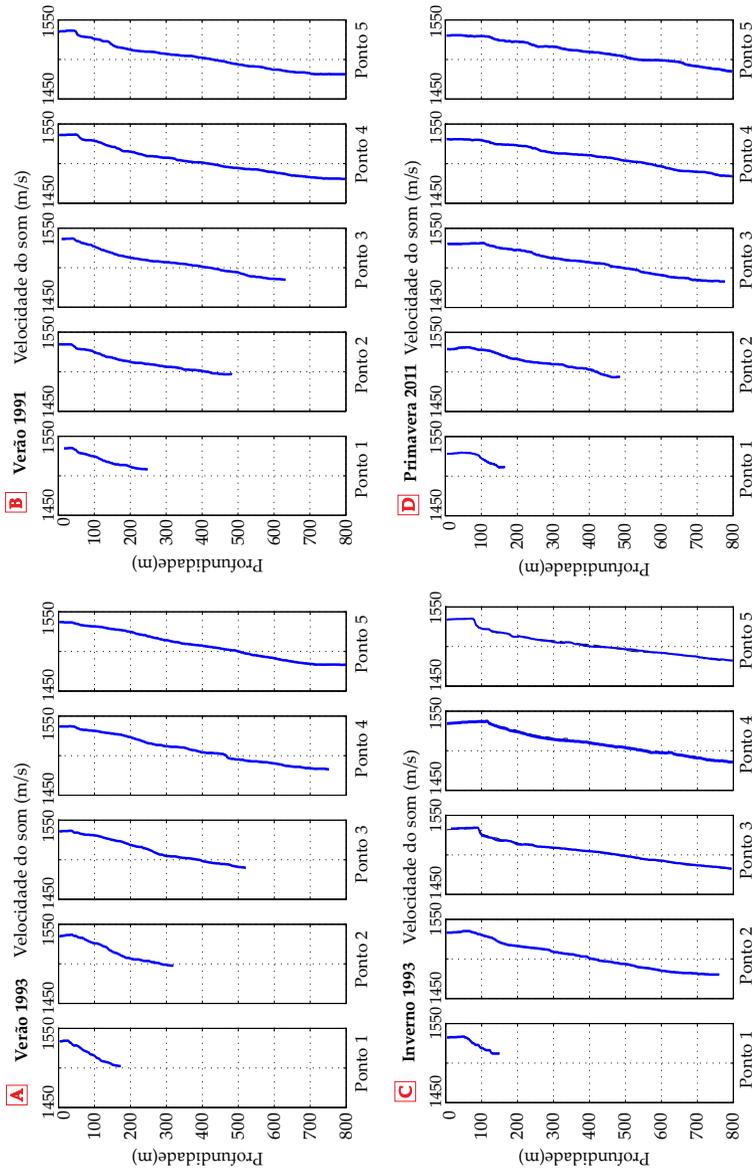


Figura 4.4.: Perfil da velocidade do som ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.

Comportamento acústico da coluna d'água

A refletividade sintética permitiu estabelecer um meio de comparação com os dados sísmicos. Mesmo que não sejam correspondentes no espaço e tempo, esses dados trazem informações das estruturas na coluna d'água.

A refletividade é proporcional à diferença de impedância, isto é, quanto maior for a diferença dos parâmetros físicos entre duas porções d'água, maior será a refletividade.

Mesmo com a variação reduzida das propriedades, quando comparado com as variações em subsuperfície, é possível notar que existem valores de refletividade consideráveis na coluna d'água.

Na Figura 4.5 (A) é possível observar uma grande variação nos perfis perto da região costeira (ponto 1 e 2) e nas camadas superficiais de todos os pontos. Importante notar no ponto 4 o elevado valor de refletividade na profundidade de 470 m.

Os dados de verão de 1991 Figura 4.5 (B) mostraram grandes valores de refletividade logo abaixo da camada de 50 metros de profundidade em todos os pontos. Importante notar que as profundidades de 160 m - 330 m do ponto 4 e 150 do ponto 5 apresentaram também valores elevados de refletividade.

Considerando os pontos 4, 5 e 6 dos dados de inverno de 1993 Figura 4.5 (C), foi possível observar que por volta dos 100 metros de profundidade existe uma grande refletividade. Foram observados valores elevados entre as profundidades: de 300 m-400 m e 700 m no ponto 2; 100 m-240 m e 350 m no ponto 4 e; 300 m-360 m e 750 m no ponto 5.

Os dados de primavera de 2011 Figura 4.5 (D) mostraram perfis diferentes de distribuição dos valores de refletividade. Observaram-se valores elevados muito próximos um dos outros, indicando uma alta variação entre pequenas porções de água.

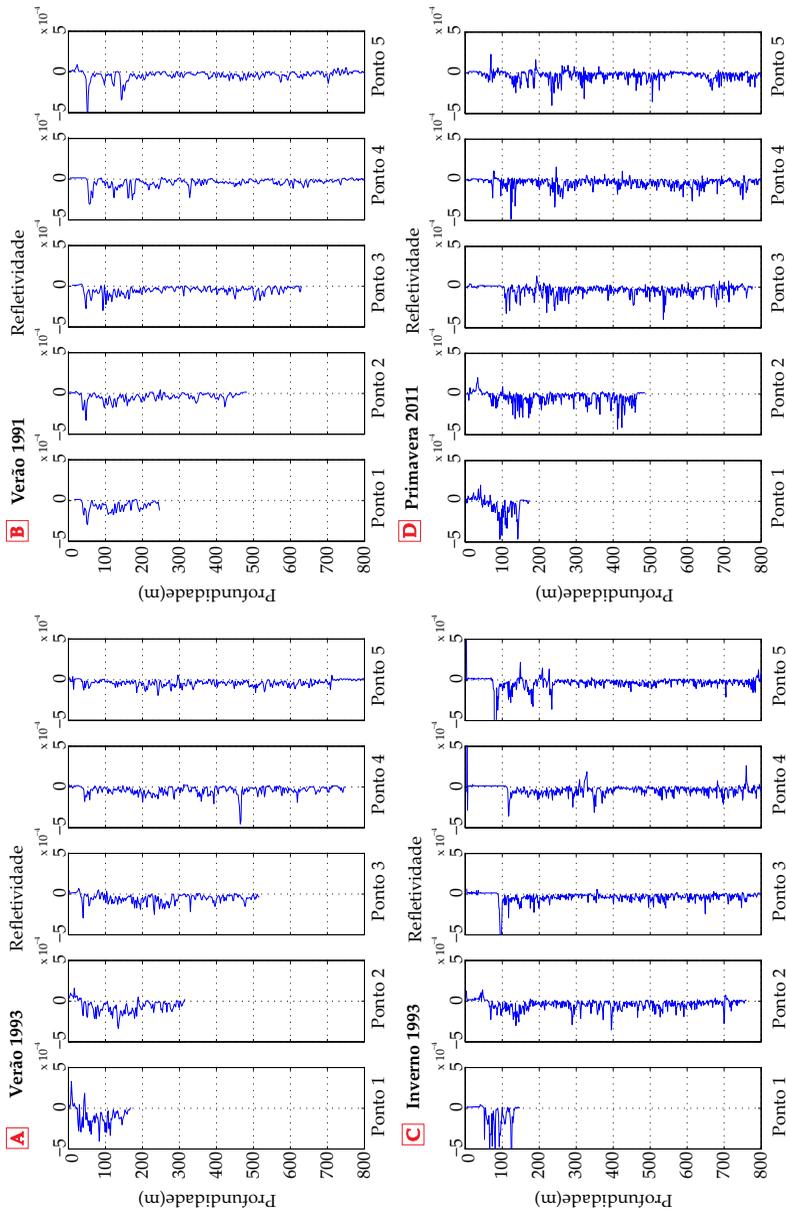


Figura 4.5.: Variação da refletividade ao longo da coluna d'água de acordo com as estações selecionadas.

Ainda na estação oceanográfica de primavera de 2011, é possível destacar as seguintes regiões: 100 m de profundidade no ponto 1; entre as profundidades de 120 m - 180 m e 400 m - 450 m no ponto 2; 110 m, entre as profundidades de 220 m - 280 m e 530 m no ponto 3; entre as profundidades 120 m - 140 m e 220 m - 260 m no ponto 4 e; 190 m, 230 m, 320 m e 500 m no ponto 5.

4.3 Comparação com a Bibliografia

Foram levantadas as principais massas d'água e suas respectivas assinaturas termo-halinas, presentes na região das linhas sísmicas analisadas. As informações foram extraídas dos autores Gabioux (2008), Silva (2006), Silveira et al. (2000), Campos, Gonçalves e Ikeda (1995), Sverdrup et al. (1942) e estão apresentadas na Tabela 4.2.

Os dados de temperatura e salinidade permitiram construir o diagrama TS para cada estação do ano (Figura 4.6), gráfico que auxiliou a identificação das massas d'água que estavam presentes no momento do levantamento.

Na Figura 4.6, é possível observar que as medições realizadas foram agrupadas de acordo com a temperatura, salinidade e profundidade. As isopicnais mostram as linhas de mesma densidade de acordo com as medições ao longo da coluna d'água.

Analisando os dados físicos da região, observou-se a mesma estrutura identificada pela bibliografia. De acordo com os dados de temperatura e salinidade apresentados anteriormente, foi possível classificar as massas d'água de acordo com os índices termo-halinos propostos por Sverdrup et al. (1942) e corroborados com por Silva (2006) e Castro et al. (2006).

As massas d'água identificadas nesse perfil de acordo com a sua assinatura termohalina são:

- Água Tropical (AT) : localizada na região superficial da coluna d'água, podendo atingir a profundidade de 200 m, apresenta uma camada superficial de mistura que varia entre 20 m e 90 m;

- Água Central do Atlântico Sul (ACAS): compreende a porção logo abaixo da AT, estendendo-se até a profundidade 700 m e ;
- Água Intermediária da Antártica (AIA): está limitada superficialmente pela ACAS e sua profundidade limite é de 1500 m.

Tabela 4.2.: Assinatura termo-halina das massas d'água que são encontradas na região oceânica do estado de Santa Catarina aplicadas para classificação de massas d'água em todas as estações oceanográficas analisadas. Elaborado pelo autor.

Autores	Massas d'água											
	AT		ACAS				AIA					
	T(°C)	S(‰)	Prof. (m)	T(°C)	S(‰)	Prof. (m)	T(°C)	S(‰)	Prof. (m)	T(°C)	S(‰)	Prof. (m)
Gabieux (2008)	> 20,0	> 36,4	-	6,0-20,0	34,6-36,4	-	3,0-6,0	34,2- 34,6	-	3,0-6,0	34,2- 34,6	-
Silva (2006)	> 20,0	> 36,0	177,3	8,0-18,0	34,5-36,0	177,0-603,2	3,0-6,0	34,2- 34,6	603,0-973,0	3,0-6,0	34,2- 34,6	700-1500
Silveira et al. (2000)	> 20,0	> 36,4	-	6,0-20,0	34,6-36,4	400-700	3,0-6,0	34,2- 34,6	-	3,0-6,0	34,2- 34,6	-
Campos, Gonçalves e Ikeda (1995)	> 18,5	> 36,0	200	6,0-18,5	34,5 -36,0	200-750	-	-	-	-	-	700-1500
Sverdrup et al. (1942)	> 18,5	> 36,0	-	6,0-18,5	34,5-36,0	Até 750	3,0-6,0	34,2- 34,5	800-1500	3,0-6,0	34,2- 34,5	800-1500

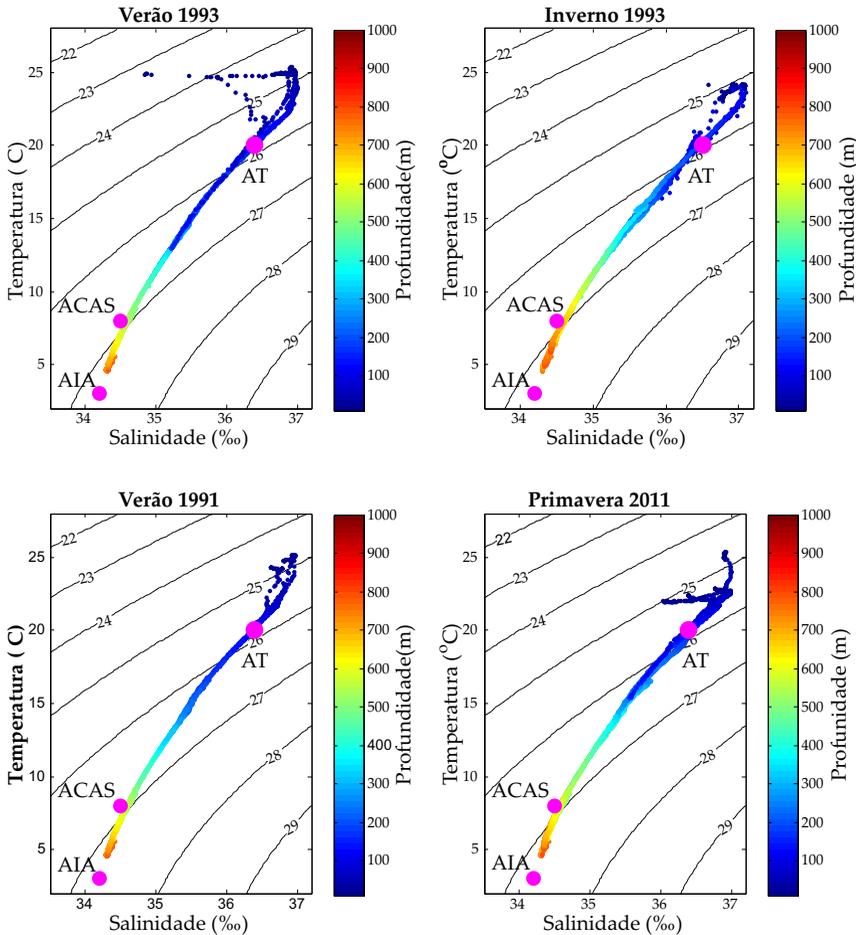


Figura 4.6.: Diagrama de temperatura e salinidade das estações oceanográficas de acordo com a profundidade da medição. As isolinhas indicam os valores das isopicnais e os círculos em rosa representam os valores mínimos dos índices termohalinos para as massas d'água AT, ACAS e AIA.

4.4 Discussões e Conclusões

A caracterização das massas d'água deu-se com base em 20 estações oceanográficas de CTD no total. Foram seleccionados 5

estações oceanográficas mais próximas ao levantamento sísmico para cada período analisado. Os períodos são nos anos de 1991 (inverno), 1993 (verão e inverno) e 2011 (primavera) localizadas na região da quebra da plataforma e talude de Santa Catarina.

Foi possível identificar gradientes de temperatura e salinidade ao longo de todos os perfis na camada superficial e em pontos específicos ao longo da coluna d'água.

Foi observada a presença da halocina e termoclina sazonal bem marcantes nos dados de inverno e verão no entorno da quebra da plataforma continental. Como já relatado por Castro, Miranda e Miyao (1987), no inverno essa camada é mais profunda e o gradiente de temperatura é menor. Situação inversa do que foi observado no verão, onde foi possível notar a presença da ACAS nas camadas mais profundas perto da costa. As variações entre as épocas do ano são ocasionados por processos climáticos locais durante o período de coleta de dados, como por exemplo, a incidência de radiação solar, pluviosidade e padrões de vento (CASTRO et al., 2006; SILVA; ARAÚJO; BOURLÈS, 2005).

De acordo com as características termo-halinas, é possível afirmar que a região de estudo abriga 3 principais massas d'água: Água tropical; Água Central do Atlântico Sul e Água intermediária da Antártica.

Com o objetivo de identificar o padrão de refletividade de acordo com as massas d'água, foram cruzados os dados da refletividade com as informações sobre as massas d'água. Foi possível ter uma clara ideia das regiões da coluna d'água que apresentam maiores valores de refletividade (Figura 4.7). Na Figura 4.7 é possível notar que a espessura das massas d'água AT e ACAS tenderam a reduzir a medida que aproximam-se da costa no verão. A elevação da camada limite entre AT/ACAS e ACAS/AIA esta associada às condições climáticas da região nessa época do ano e ao relevo da quebra da plataforma (CASTRO et al., 2006).

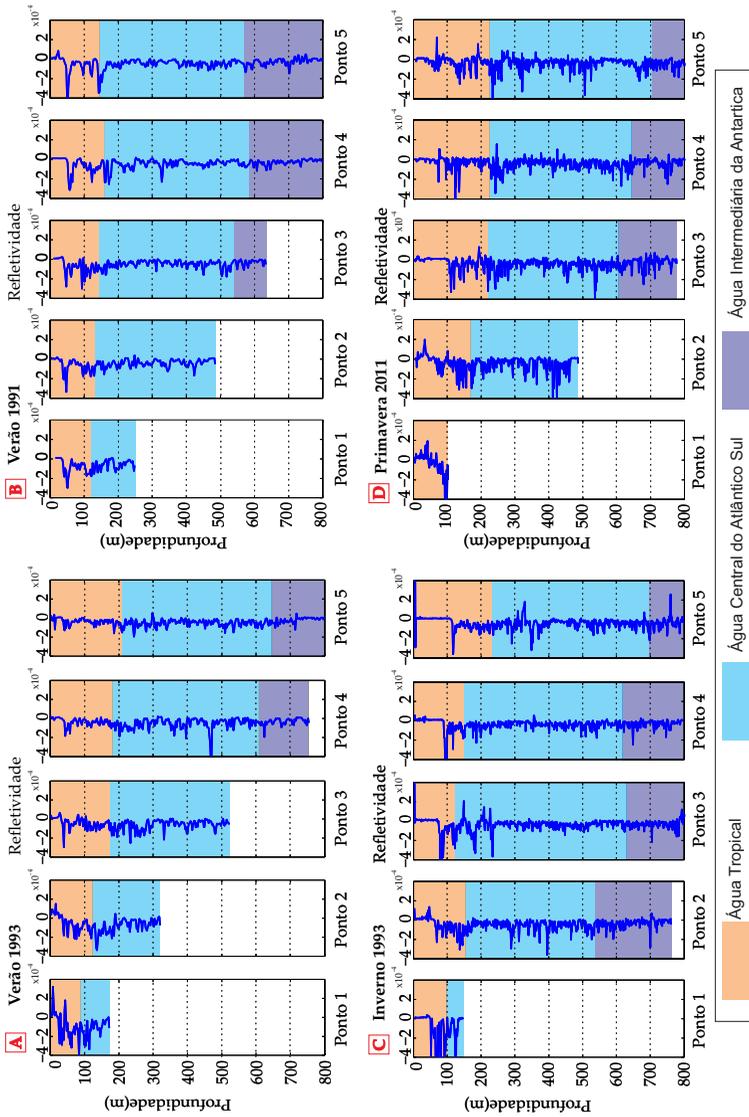


Figura 4.7.: Comparação da refletividade e as massas d'água utilizando os índices termohalinos descritos na literatura por Sverdrup et al. (1942) e corroborado com o trabalho de Silva (2006).

Os mecanismos que auxiliam a elevação do limite entre AT/A-CAS no verão são bem conhecidos. Como destacado por Campos, Gonçalves e Ikeda (1995), Castro et al. (2006), são os ventos de nordeste, típicos nesta época do ano, e os efeitos da topografia do fundo que causam a intrusão da ACAS na plataforma continental.

Na Figura 4.7 é possível notar que a espessura das massas d'água AT e ACAS tenderam a reduzir a medida que aproximam-se da costa no verão. A elevação da camada limite entre AT/ACAS e ACAS/AIA esta associada às condições climáticas da região nessa época do ano e ao relevo da quebra da plataforma (CASTRO et al., 2006).

Os mecanismos que auxiliam a elevação do limite entre AT/A-CAS no verão são bem conhecidos. Como destacado por Campos, Gonçalves e Ikeda (1995), Castro et al. (2006), são os ventos de nordeste, típicos nesta época do ano, e os efeitos da topografia do fundo que causam a intrusão da ACAS na plataforma continental.

A distribuição dos valores de refletividade na Figura 4.7 são resultado da variação térmica e salina ao longo d'água. Foi observado que os maiores valores de refletividade não estão situados na mesma profundidade que os limites estabelecidos entre as massas d'água. Silva (2006) relata um comportamento diferenciado nas profundidades que delimitam as massas d'água, sugerindo que existam processos específicos atuando sobre cada uma separadamente.

Considerando os estudos de propagação acústica submarina, a determinação da profundidade da AIA possui grande relevância. Esta massa d'água está fortemente associada ao canal SOFAR, região onde a energia sonora é aprisionada e permite que ela se propague por centenas de quilômetros no oceano. Tal característica é muito importante uma vez que afeta a propagação de qualquer pulso sonoro. Fisch e Resende (1996 apud SILVA, 2006) mostram que a localização deste canal está associada aos valores mínimos de salinidade da água do mar. Sendo assim é possível conhecer a forma deste canal através do acompanhamento da AIA.

Os resultados indicam que a massa d'água está estruturada

da seguinte forma: Água Tropical (AT) localizada na porção superficial da coluna d'água, na profundidade de até 200 m com uma camada superficial de mistura que varia entre 20 m e 90 m, Água Central do Atlântico Sul (ACAS) compreendida entre o limite inferior da AT e superior da AIA, estendendo-se até a profundidade 700 m e Água Intermediária da Antártica (AIA) que está limitada superficialmente pela ACAS e cuja profundidade limite é de 1500 m.

Foi possível observar que os picos positivos e negativos de refletividade não estão situados somente na mesma profundidade dos limites entre as massas d'água, mas também em porções dentro destas. Podemos citar como exemplo a porção inferior da camada de mistura e porções internas da ACAS e AIA. Tal comportamento sugere que existam processos específicos atuando sobre cada massa d'água separadamente, constatando assim a heterogeneidade da propagação acústica nesses meios.

5 Processamento dos dados de referência IAM3

O presente capítulo contou com a colaboração da Dr. Berta Biescas, a qual cedeu gentilmente a linha sísmica utilizada em trabalhos como Buffett (2008), Biescas et al. (2008) e Biescas et al. (2010), a IM3. O processamento dessa linha sísmica permitiu aplicar as etapas do processamento de dados sísmicos voltadas à OS proposta neste trabalho.

5.1 Pré-processamento

Inserir a Geometria

Os dados foram obtidos no formato .SEG Y. Foi necessário realizar a conversão para o formato de trabalho do *software*, a extensão .SU.

Para inserir as informações do levantamento sísmico nos traços, foram utilizados os dados descritos em Biescas et al. (2008) e Buffett et al. (2009) referentes à linha IAM–03, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1.: Parâmetros de aquisição IAM03.

Parâmetros	IAM-3
Volume da Fonte (cu.in)	4343,704
Pico de energia (Hz)	20-50
Nº de Canais	192
Distância entre canais (m)	25,00
Intervalo entre disparos(m)	75,00
Offset mínimo (m)	254,00
Cobertura dos CMPs	32
Profundidade (m)	450-4000

Este levantamento contou com um arranjo de *air gun* com volume total de 4343,704 in³ realizando disparos a cada 75 m e um *array* de 4775 m com 192 canais, sendo que o mais próximo está a 254 m da fonte. A região de levantamento possui uma coluna d'água com a profundidade variando entre 450 e 4000 metros.

Filtro

Visando remover os ruídos fora da frequência de interesse, foi utilizado um filtro passa-banda com largura de banda de 100 Hz com subida limitada de 0 a 10 Hz e descida limitada de 90 a 100 Hz.

As frequências escolhidas tiveram com objetivo reduzir o efeito de ruídos ocasionados pela ondulação na superfície, do *streamer* rebocado e das bolhas devido ao efeito de cavitação após o pulso principal.

O filtro é caracterizado por ser um polígono de zero fase com as vértices definidas pelo vetor de frequências, onde os valores selecionados foram 0, 10, 90 e 100 Hz e truncamento com seno quadrado (Figura 5.1).

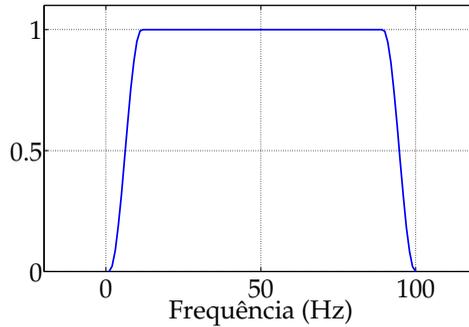
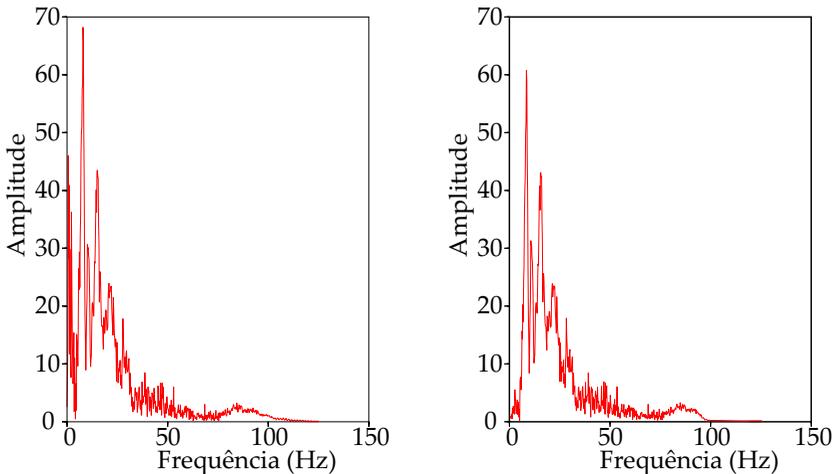


Figura 5.1.: Design do filtro passa-banda utilizado.

Na Figura 5.2 observa-se a aplicação desse filtro no traço 800.



(a) Espectro de amplitude do traço 800 antes de aplicar filtro.

(b) Espectro de amplitude do traço 800 após aplicar o filtro.

Figura 5.2.: Mudança no espectro de amplitude por meio da aplicação do filtro passa-banda com frequências 0 a 100 Hz.

Na Figura 5.2 (a) e possível identificar que a parte do sinal que possui maior amplitude está localizada nas frequências abaixo de 20 Hz. A aplicação do filtro permitiu a atenuação de parte do espectro que não condiz com a assinatura espectral da fonte (20 a 50 Hz).

Edição dos traços e Correção da divergência esférica

A edição de traços e a etapa de aplicação de ganho para compensar a redução de amplitude do sinal foram implementadas de maneira conjunta.

Na edição foram retirados os traços que apresentavam ruídos associados ao mau funcionamento dos hidrofones, ou seja, ruído aleatório ao longo de toda a amostragem visando não reduzir a relação sinal/ruído.

Considerando a porção que representa a coluna d'água, nesta etapa foi selecionada a porção superior do sismograma por meio do janelamento de todos os traços no tempo, contemplando os traços com o tempo duplo de propagação de 0 a 3s. Permanecendo assim, a seção sísmica que representa a coluna d'água.

Para corrigir a perda de amplitude sinal devida ao espalhamento geométrico, foi aplicado ganho quadrático no domínio do tempo (Figura 5.3).

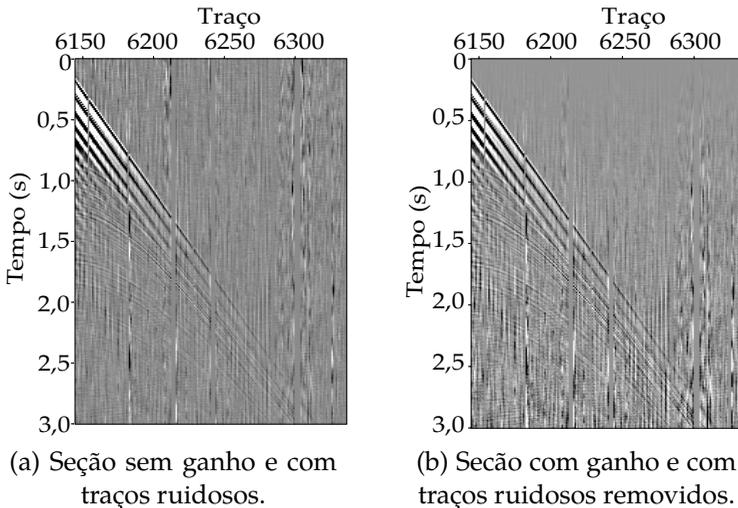


Figura 5.3.: Diferenças entre a aplicação da função ganho no domínio do tempo e remoção dos traços ruidosos.

O ganho foi de acordo com a Equação 3.5, sendo que α é igual 2. Na Figura 5.3, pode ser observada a edição dos traços e o aumento na amplitude do sinal em regiões mais profundas.

Na Figura 5.3 (b) constata-se a melhoria na visualização das estruturas abaixo de 1,0 s resultado da aplicação do ganho. A melhoria deu-se também em função da identificação e remoção dos traços que apresentavam ruído, como por exemplo os traços 6175, 6176, 6225, 6240 e 6273 na Figura 5.3 (a).

5.2 Remoção da onda direta

A remoção da onda direta (Figura 5.4), realizada por meio da transformada de Radom, empregou o Método de Subtração Adaptativa elaborado por Dr. Dirk Klaeschen (KRAHMANN et al., 2008). Este método possibilitou a redução do efeito da onda direta e melhor identificação das estruturas na coluna d'água.

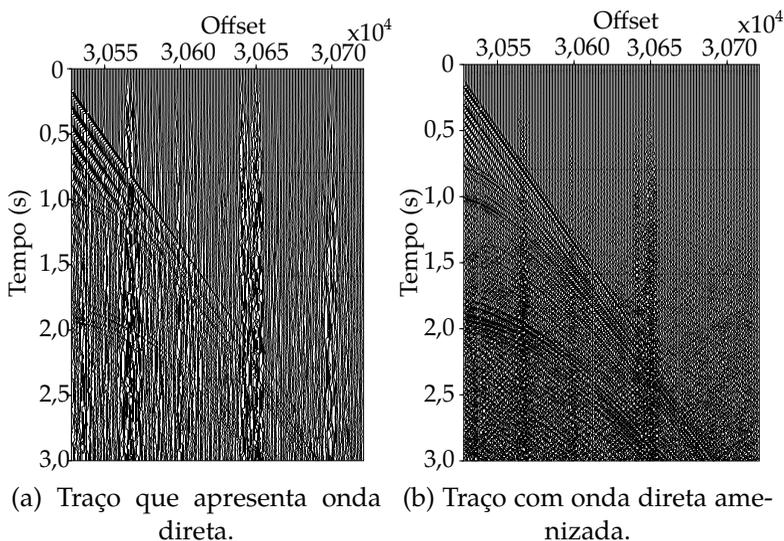


Figura 5.4.: Comparação dos traços antes e após a remoção da onda direta do CDP 800.

Na Figura 5.4 (b) é possível constatar a atenuação da onda direta,

processo que resultou em uma maior visualização dos eventos de reflexão localizados abaixo de 2,0 s, que antes da aplicação estavam mascarados. Contudo, ainda após essa etapa, foi possível constatar a continuidade de parte do efeito da onda direta.

5.3 Análise da velocidade

A análise de velocidade é realizada no arranjo dos traços de acordo com o CDP, dessa forma é necessário reorganizar os dados que, até o presente momento, estão organizados por conjuntos de disparo.

Apesar da execução desta etapa não apresentar muita complexidade, optou-se por aplicar a rotina de análise de velocidade cedida pelo Dr. Renato Prado, que permite a interação do usuário com uma interface gráfica, agregando assim, qualidade no processamento.

Na Figura 5.5 (a) é apresentado a análise *semblance* e as velocidades escolhidas (*picking*) de acordo com sua coerência. Na Figura 5.5 (b) é apresentado o conjunto CMP analisado. Considerando os primeiros traços do arranjo como base para as escolhas, é possível destacar que as velocidades que possuem maior valor de *semblance* (Figura 5.5 (a)) correspondem às posições dos refletores no tempo (Figura 5.5 (b)). Esse fato auxiliou a escolha das velocidades ao longo dos traços analisados.

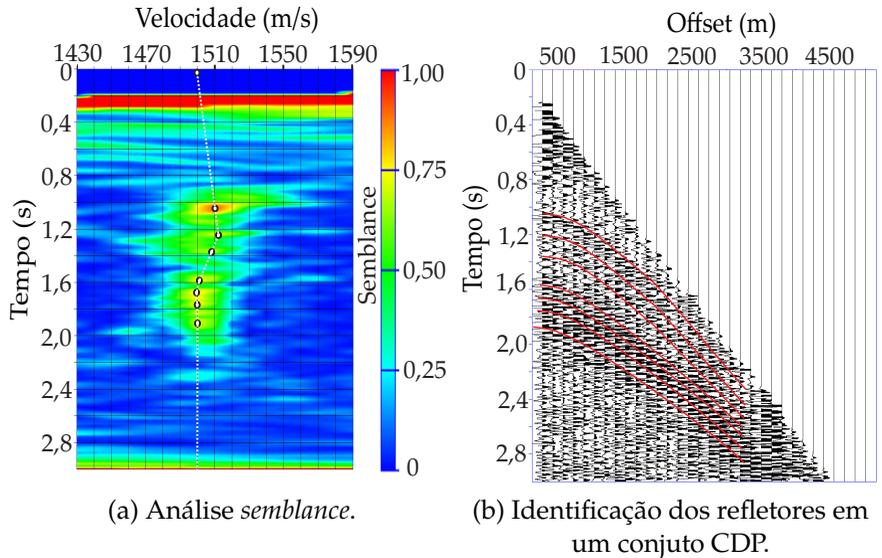


Figura 5.5.: Análise de velocidade da linha sísmica IAM3 aplicado no CMP 800.

As linhas vermelhas na Figura 5.5 (b) representam os refletores utilizados para o *picking* na Figura 5.5 (a).

O perfil analisado mostrou a velocidade variando entre 1499 e 1512 m/s. A análise assumiu o valor de 1500 m/s na porção inicial do registro ($t=0$ s), observou-se valores crescentes até 1,2 s com velocidade de 1512 m/s. Após esse ponto, o valor decresceu até 1499 m/s em 1,65 s. Na porção restante da análise, o valor da velocidade estabilizou-se em 1500 m/s, valor também assumido até o final do registro.

Em toda a linha IAM3 foram realizados 15 análises de velocidade. Devido à impossibilidade de aplicar esta análise ao longo de todos os conjuntos CDPs, os valores de velocidade foram interpolados considerando os valores dessas 15 análises.

As velocidades selecionadas para cada CDP analisado são apresentadas em Tabela B.1, Tabela B.2 e Tabela B.3 no Apêndice B.

5.4 Correção do sobretempo

As velocidades obtidas são utilizadas para correção do sobretempo de chegada de todos conjuntos CMP. Como resultado, um mesmo refletor é reposicionado para um mesmo tempo de chegada em todos os traços desse conjunto CDP, como se cada traço possuísse o valor de *offset*=0. Nesse processo os perfis de velocidade são interpolados espacialmente e temporalmente para correção do sobretempo em todos os conjuntos CMPs da linha sísmica.

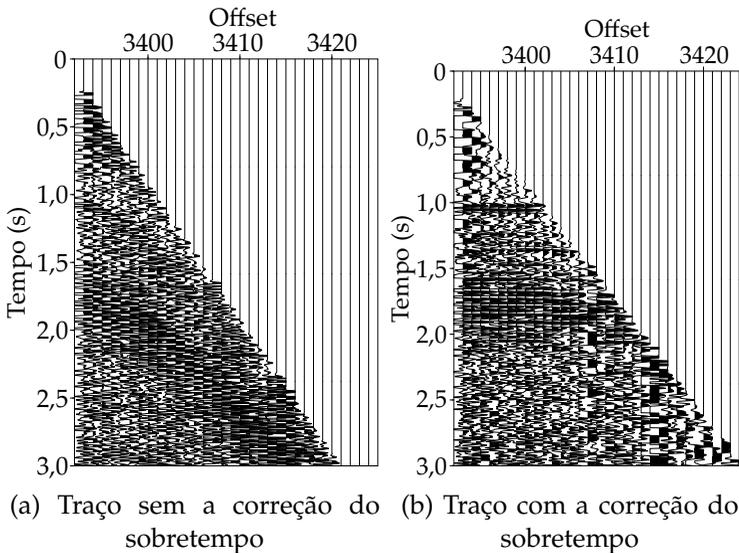


Figura 5.6.: Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicado no arranjo CMP 800 da linha sísmica IAM3.

5.5 Empilhamento

Nesta etapa os conjuntos CMPs corrigidos no processo anterior foram empilhados (somados).

Considerando eventos no domínio no tempo, a soma resulta na interação construtiva dos eventos coerentes e interação destrutiva em eventos não correlacionados, refletindo diretamente no aumento da relação sinal/ruído.

Visando reduzir o efeito que ainda resta da onda direta, é possível ajustar a extensão de *offsets* que foi empilhada, ou seja, no empilhamento não foi considerado os *offsets* mais próximos da fonte. Assim, considerou-se os *offsets* de 500 a 5029 m ao invés de 254 a 5029 m.

A Figura 5.7 é o resultado do empilhamento dos conjuntos CDPs, onde foi destacado o CDP 3580 para identificar os padrões espectrais das regiões com e sem reflexão.

Após o empilhamento, é possível identificar duas principais estruturas: os refletores que formam uma estrutura circular nos primeiros 6000 CDPs e outro refletores na porção final (últimos 2000 CDPs).

O refletor circular possui 1000 metros de diâmetro e foi identificado como a estrutura oceanográfica *Meddy*. O refletor na porção final da crosta oceânica é relacionada à crosta oceânica no sopé do talude do Golfo de Cadiz. Os refletores que se estendem do início do sismograma na profundidade de 1400 metros são interrompidos no *Meddy*, mas continuam até alcançar o sopé do talude. Tais refletores são denominados estruturas finas e são associados a contrastes termohalinos, como por exemplo: frentes oceanográficas.

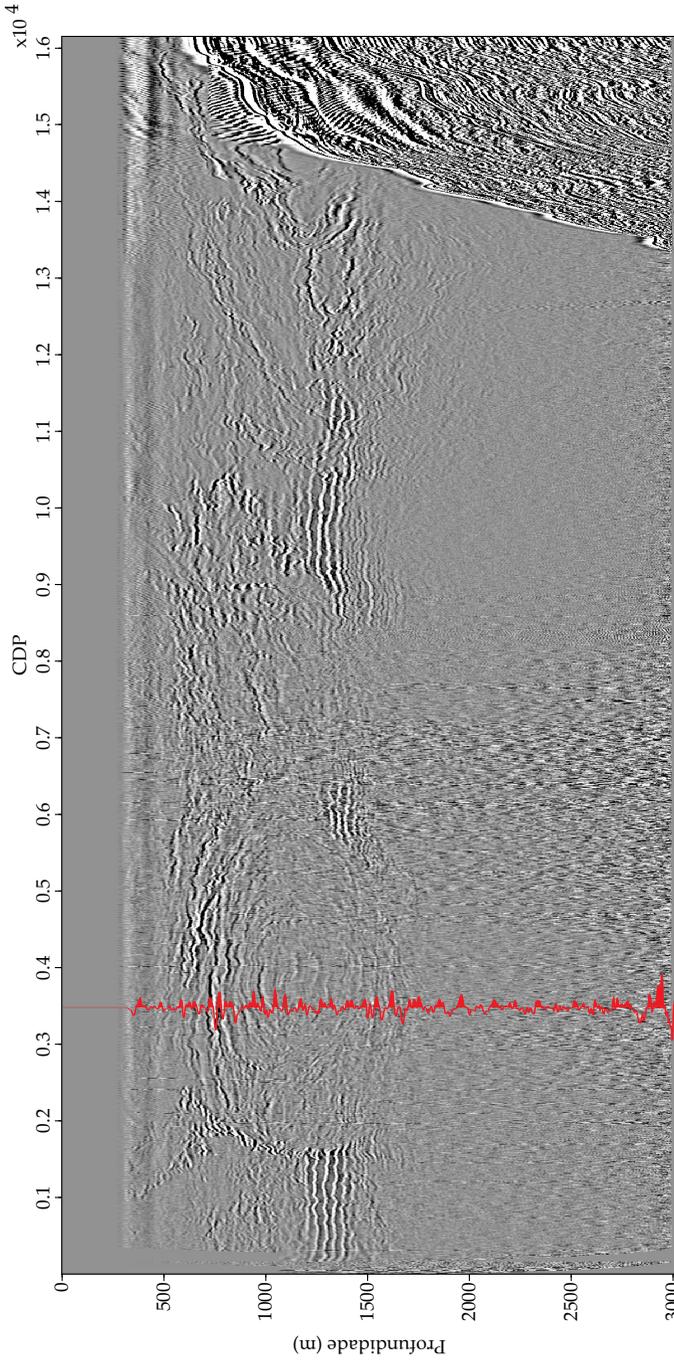


Figura 5.7.: Empilhamento de todos os CDPs da linha sísmica IAM3. Em vermelho, é apresentado o traço sísmico utilizado para análise das reflexões.

5.5.1 Análise das reflexões na coluna d'água

Procurando fazer uma avaliação do espectro de amplitude do traço, o traço 3580 (linha em vermelho na Figura 5.7) foi subdividido em duas regiões: porção com reflexão e sem reflexão (Figura 5.8). Para comparação dos espectros da reflexão em relação a outros eventos, foi analisada também a porção do traço 160 (traço apenas com a geometria inserida) que compreende somente a onda direta.

Visando explorar cada evento de maneira isolada, as regiões de análise tiveram uma janela de tempo de 25 ms. A ausência do eixo da ordenada nas janelas temporais da Figura 5.8 foi devida à limitação gráfica do software. Contudo, o valor de amplitude do sinal janelado é proporcional ao espectro de amplitude da transformada de Fourier.

Esta análise permitiu identificar que a magnitude das amplitudes das componentes das frequências de interesse na porção do traço que possui reflexão (Figura 5.8(b)) é cerca de 300 vezes menor quando comparada com as amplitudes do espectro da porção onde a onda direta foi selecionada (Figura 5.8(a)). Ela pode ficar até quatro vezes maior quando comparada com as amplitudes do espectro da porção na qual não há reflexões (Figura 5.8(c)) em uma primeira análise.

Analisando o espectro de amplitude normalizada (Figura 5.9), observou-se que a reflexão possui o espectro mais semelhante à onda direta que quando comparada à região sem reflexão, evidenciando assim uma diferença espectral entre regiões com e sem reflexão.

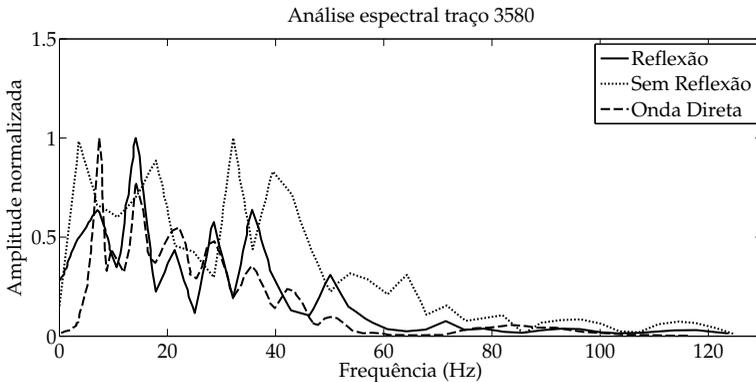


Figura 5.9.: Análise espectral da reflexão e ruído do traço 3580 empilhado juntamente com a onda direta.

5.6 Discussões e Conclusões

O processamento da linha sísmica IAM3 do *Iberian Atlantic Margins Project* permitiu aplicar a base para o processamento sísmico em um registro previamente analisado e contou com cinco etapas:

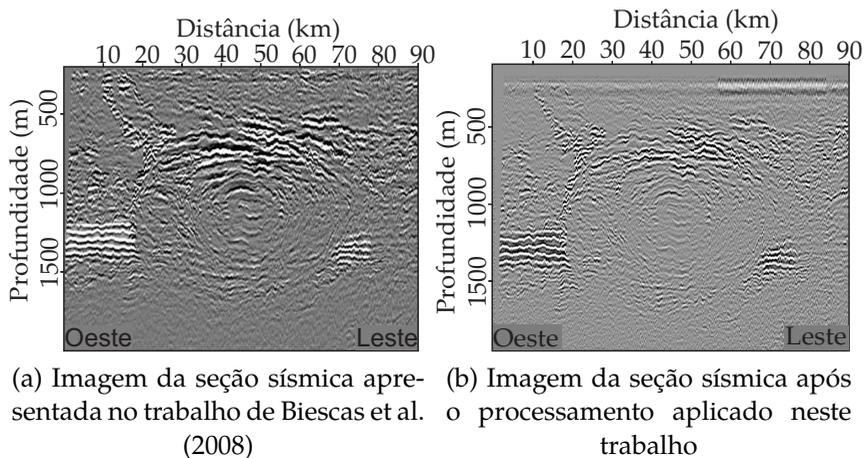
- Pré-processamento;
- Remoção da onda direta;
- Análise da velocidade;
- Correção do sobretempo e;
- Empilhamento.

Ao longo de todo processamento buscou-se evidenciar o máximo possível as reflexões na coluna d'água, já que o sinal nesse ambiente possui amplitudes apenas quatro vezes maior que o ruído de fundo.

A remoção da onda direta é de fundamental importância para evidenciar as estruturas na coluna d'água. Esse evento possui alta amplitude e compromete a visualização de refletos que estão mais superficiais (400 metros de profundidade).

Dessa forma, o processamento da linha IAM3 permitiu estabelecer os princípios de funcionamento dos métodos de processamento sísmico de reflexão na OS e estabeleceu o fluxo de processamento aplicado aos demais dados.

A imagem gerada pelo processamento foi comparada com o resultado publicado por Biescas et al. (2008). Na Figura 5.10 é possível destacar a relativa proximidade entre os resultados.



(a) Imagem da seção sísmica apresentada no trabalho de Biescas et al. (2008) (b) Imagem da seção sísmica após o processamento aplicado neste trabalho

Figura 5.10.: Comparação dos traços empilhados entre o trabalho publicado por Biescas et al. (2008) e o processado por esse trabalho.

O processamento da linha IAM3 aplicado neste trabalho teve êxito ao imagear as reflexões na coluna d'água, pois as estruturas observadas são coerentes com os resultados apresentados por Biescas et al. (2008) e Buffett et al. (2009), como exemplificado pela Figura 5.10 (b) onde o *Meddy* observado possui as mesmas dimensões que na Figura 5.10 (a). Nas duas imagens é possível observar claramente os refletores horizontais nos primeiros 15 km do levantamento que possuem a profundidade limite de 14000 metros e o *Meddy* com diâmetro horizontal aproximadamente de 60 km.

Foi possível notar também algumas diferenças entre as duas

imagens, como por exemplo: efeitos gerados no processamento e o contraste da imagem final. Como efeitos adicionados pelo processamento, é possível observar a região a partir de 55 a 85 km, onde a identificação de refletores foi comprometida na profundidade de 250 metros na Figura 5.10 (b), região de influencia da onda direta.

O contraste na imagem final pode estar ligado à capacidade de diferentes *software* apresentarem distintos recursos para o processamento da imagem final. O *software* utilizado nesse trabalho apresenta robustez no processamento sísmico. Entretanto, possui algumas limitações no processamento de imagem.

Considerando os resultados obtidos, é possível afirmar que a utilização do fluxo de processamento, aplicado nesse trabalho aos dados da literatura, é capaz de identificar os eventos oceanográficos em um levantamento sísmico.

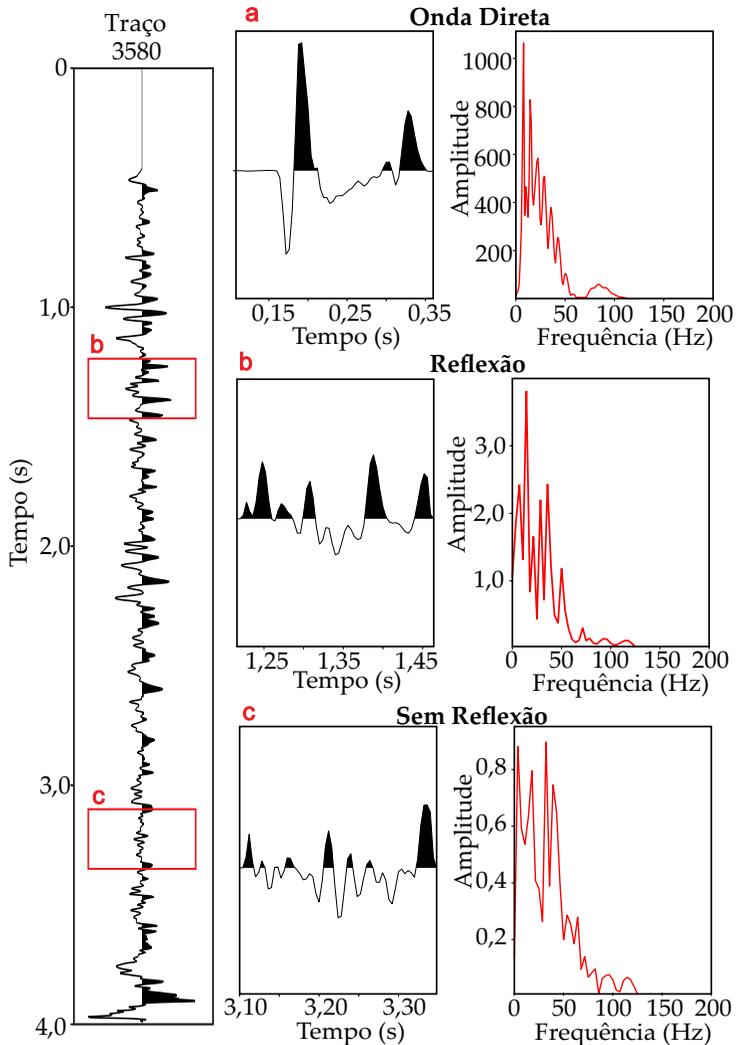


Figura 5.8.: Análise após empilhamento do traço 3580. Na porção direita da imagem, está representado a porção dos dados e espectros de amplitude da região da onda direta do traço não empilhado 193 (a) da região que possui reflexão (b) e da região sem reflexão (c) do traço empilhado 3580.

6 Processamento dos dados do BDEP

O presente capítulo e o seguinte, contaram com a colaboração da Agência Nacional do Petróleo (ANP), que cedeu as linhas sísmicas por meio do protocolo FID 060283 do pedido: 7665. Apesar de serem considerados antigos por alguns autores, os dados aqusitados entre as décadas de 70 e 90 não são menos importantes que os atuais. Tal fato é comprovado por meio do reproprocessamento, onde novas informações podem ser obtidas aplicando novos métodos de filtragem, empilhamento e migração (PORSANI; PESTANA, 2009).

Afim de explorar as configurações dos dados repassados, na tabela 6.1, são apresentadas as características da fonte e dos receptores dos dados solicitados e disponibilizados.

Tabela 6.1.: Informações sobre os dados que foram repassados por meio da solicitação ao BDEP. As informações foram extraídas a partir do registro do observador.

Identificação	Mês/ano	Extensão (km)	N° de Fontes	Volume da Fonte (cu.in)	Pico de energia (Hz)	N° de Canais	Distância entre Profundidade canais (m)	
0048_SANTOS	Junho/1978	41,2	15	1450	8-62	48	50,00	150 - 500
0061_SANTOS	Janeiro/1980	156,7	8	-	8-62	48	50,00	150 - 2000
0111_SANTOS	Agosto/1981	-	-	-	-	-	-	100 - 100
0111_SANTOS	Agosto/1981	55,0	-	-	-	-	-	50 - 80
0111_SANTOS	Agosto/1981	53,4	-	-	-	-	-	50 - 80
0241_SANTOS	Maió/1991	26,9	36	4000	6-188	204	20,00	100 - 150
0241_SANTOS	Maió/1991	37,24	36	4000	6-188	204	20,00	100 - 150
0241_SANTOS	Maió/1991	42,7	36	4000	6-188	204	20,00	120 - 150
0247_CARAVELA	Janeiro/1993	83,80	36	4000	15-50	150	26,67	150 - 1330
0247_CARAVELA	Julho/1995	58,22	32	3000	6-188	150	26,67	160 - 650

Ao longo do processamento foi observado que a presença das informações como geometria do levantamento, volume da fonte e profundidade do levantamento são essenciais para o processamento e podem representar uma limitação na aplicabilidade do método.

Considerando a geometria do levantamento, algumas vezes preenchida manualmente dos documentos, pode resultar em falta de informações importantes para o processamento ou interpretações duvidosas quando essas informações estão ausentes ou ilegíveis. As informações mais importantes de serem extraídas são: quantidade de canais, distância entre canais, distância entre disparos e; disparos faltantes.

A segunda causa é o volume da fonte utilizada nessa época, representada pela quantidade e capacidade limitada dos *airguns* empregados no levantamento. As décadas de 70 e 80 apresentam baixa amplitude do sinal para identificar as reflexões na coluna d'água.

A terceira causa é a profundidade do leito marinho, pois é necessário que exista registro da coluna d'água abaixo da zona de influência da onda direta. A influência da onda direta está associada à distância que os hidrofones estão da fonte (região do *offset* mínimo).

Considerando as limitações apresentadas foi possível aplicar o processamento sísmico somente nas linhas 0247_Caravela_1993 e 0247_Caravela_1995, que a partir de agora serão chamadas de linha 93 e linha 95, respectivamente.

6.1 Processamento da linha 93

6.1.1 Pré-processamento

Inserindo a Geometria

Os dados foram repassados no formato .SEGD, sendo assim necessário realizar a conversão para o formato de trabalho do *software*, a extensão .SU. Para inserir as informações do levantamento sísmico nos traços, foram utilizados os dados descritos no registro

do observador.

Com as informações de *offset*, posição do hidrofone e posição da fonte inseridas no cabeçalho, foi possível inserir a geometria do levantamento, essencial para iniciar o processamento.

Tabela 6.2.: Parâmetros de aquisição linha 93 .

Parâmetros	linha 93
Volume da Fonte (cu.in)	4000,00
Pico de energia (Hz)	15 -50
Formato	SEGD
N° de Canais	150
Distância entre canais (m)	26,67
Intervalo entre os disparos (m)	26,67
<i>Offset</i> Mínimo (m)	241,10
Cobertura dos CMPs	75
Profundidade (m)	175,00 - 750,00

Este levantamento contou com um arranjo de *air gun* com volume total de 4000,00 in³ realizando disparos a cada 26,67 m e um *array* de 4000,50 m com 150 canais, sendo que o mais próximo está a 241,00 m da fonte. De acordo com o *shapefile*¹ da linha sísmica, a região de levantamento possui profundidades variando entre 200 e 1350 metros. Contudo, no processamento identificou-se que a profundidade máxima atingiu 750 metros de coluna d'água.

Filtro

Visando remover os ruídos fora da frequência de interesse, foi utilizado um filtro passa-banda Butterworth, com largura de banda de 90 Hz, subida limitada de 5 a 20 Hz e descida limitada de 80 a 95 Hz. As frequências escolhidas tiveram com objetivo reduzir o efeito de ruídos ocasionados pela ondulação na superfície, do

¹Arquivo que contém as coordenadas geográficas do levantamento sísmico em forma de vetor, comumente utilizado em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Apresentado na Figura 3.2.

streamer rebocado e das bolhas, efeito ocasionado pela cavitação após o pulso principal.

O filtro é caracterizado por ser um polígono de mínima fase com as vértices definidas pelo vetor de frequências com valores de 5, 20, 80 e 95 Hz (Figura 6.1)

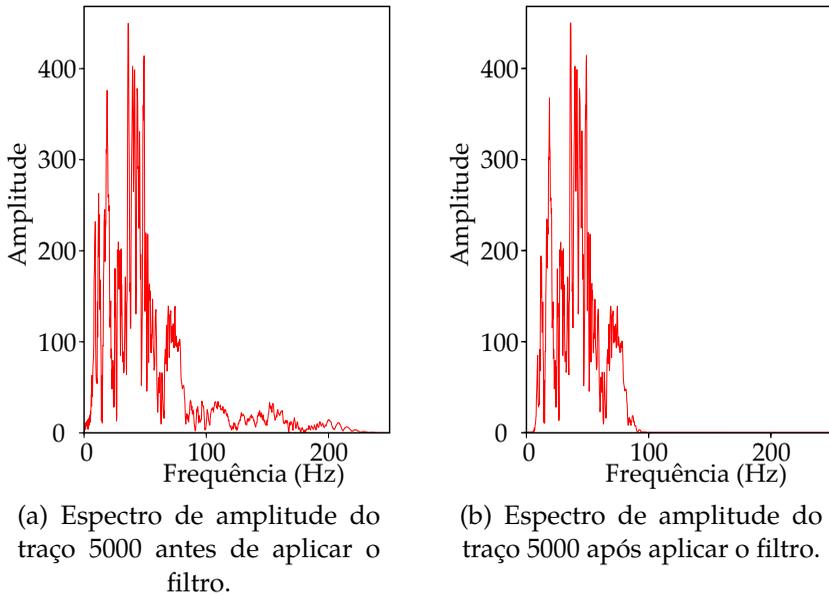


Figura 6.1.: Mudança no espectro de amplitude por meio da aplicação do filtro passa-banda com frequências 5 a 95 Hz.

A Figura 6.1 (a) exibe o espectro de amplitude do traço 5000, onde é possível observar os ruídos com componentes de baixas (< 15 Hz) e altas frequências (> 95 Hz). Na Figura 6.1 (b) observa-se o resultado após a aplicação do filtro.

A escolha do filtro de mínima fase foi devida à apresentação de melhores resultados na seção empilhada quando comparada com o filtro de fase zero aplicado no capítulo anterior (Capítulo 5). Foi observado que, quando mantido o filtro de fase zero, a reflexão correspondente ao fundo marinho apresentava deformidades, fato que interferiu na visualização dos eventos próximos ao fundo.

Edição dos traços e correção da divergência esférica

Conforme aplicado no capítulo anterior, a edição de traços e a etapa de aplicação de ganho para compensar a redução de amplitude do sinal foram implementados de maneira conjunta.

Na edição foram retirados os traços que apresentavam ruídos associados ao mau funcionamento dos hidrofones. Foi removida também a porção do sismograma que não amostrava a coluna d'água por meio do janelamento de todos os traços no tempo. O tempo duplo de propagação utilizado foi de 0 a 2s, contemplando assim a seção que possui informações da coluna d'água e pequena parte das camadas abaixo do fundo marinho.

Para corrigir a perda de amplitude do sinal de acordo com a distância da fonte foi aplicado ganho exponencial quadrático no domínio do tempo. O ganho foi de acordo com a Equação 3.5, sendo que α é igual a 2. Na Figura 6.2, pode ser observada a edição dos traços e o aumento na amplitude do sinal em regiões mais profundas.

Como observado na Figura 6.2 (b), não foi constatado melhoria significativa com a aplicação do ganho, nesse modo de visualização, dos refletores. Sendo necessária a visualização traço a traço para melhor representação desse ganho.

Visando melhorar o imageamento e identificação dos refletores, foram removidos os traços que apresentavam ruído, como por exemplo os traços 75500, 75501, 75502, 75532, 75533, 75611 e 75612 na Figura 6.2 (a).

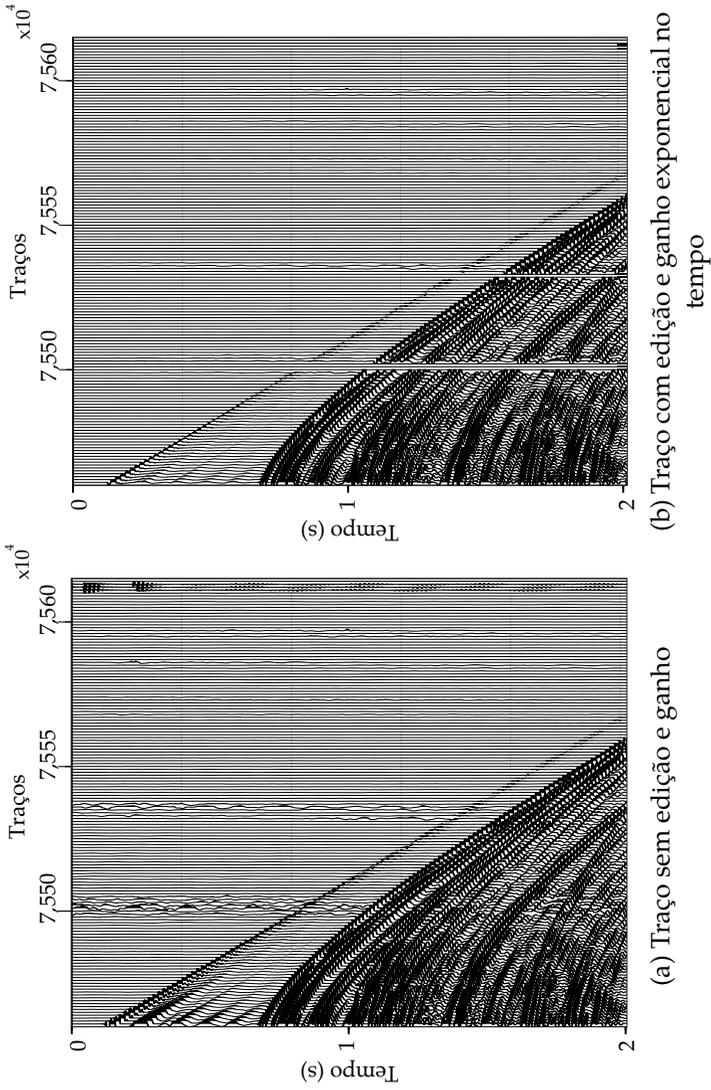
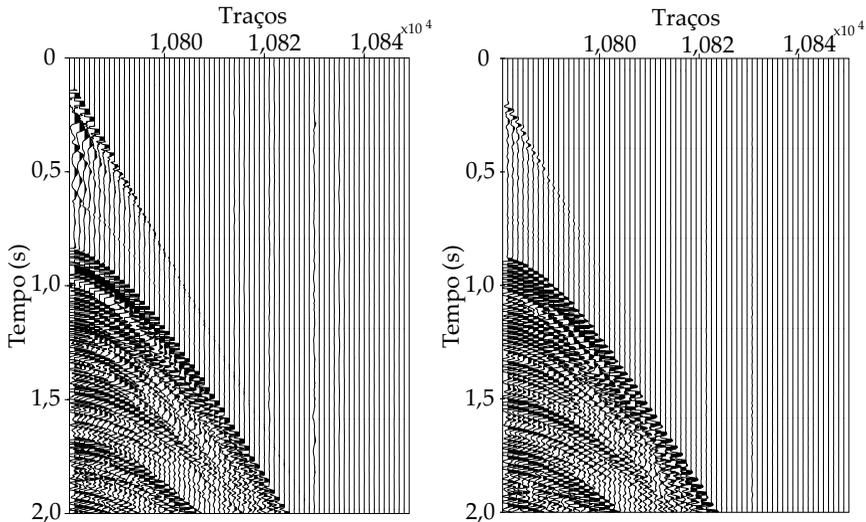


Figura 6.2.: Aplicação da função ganho no domínio do tempo e remoção dos traços ruidosos no arranjo de disparo 500.

6.1.2 Remoção da onda direta

A remoção da onda direta seguiu o método que foi aplicado no capítulo anterior. Este método permitiu reduzir o efeito da onda direta no sismograma e melhorou a identificação das estruturas na coluna d'água no sismograma final (gerado após o empilhamento).



(a) Traços que apresentam onda direta. (b) Traços com onda direta amenizada.

Figura 6.3.: Comparação dos traços do disparo 800, antes e após a remoção da onda direta.

6.1.3 Análise da velocidade

Na Figura 6.4 (a) é apresentada a análise *semblance* e as velocidades escolhidas (*picking*) de acordo com sua coerência. Na Figura 6.4 (b) é apresentado o conjunto CMP analisado. Considerando os primeiros traços do arranjo como base para as escolhas, é possível destacar que as velocidades que possuem maior valor de *semblance* correspondem às posições dos refletores no tempo. Esse fato auxiliou a escolha das velocidades ao longo dos

traços analisados.

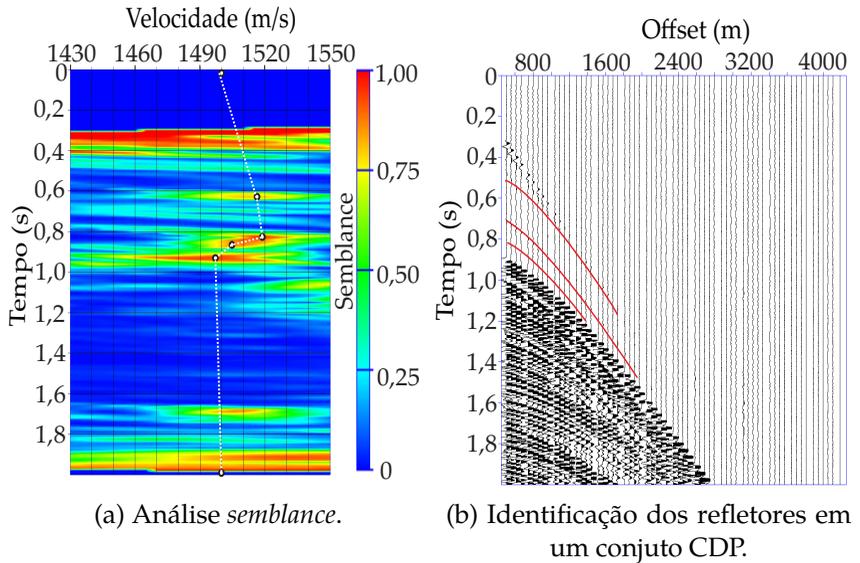


Figura 6.4.: Análise da velocidade de propagação aplicada aos traços do arranjo CMP 1000.

O conjunto analisado mostrou a velocidade variando entre 1430 e 1550 m/s. A análise assumiu o valor de 1500 m/s na porção inicial do registro ($t=0$ s). Observou-se valores crescentes até 0,8 s com velocidade de 1520m/s. Após esse ponto, o valor decresceu até 1495 m/s em 0,9 s. Na porção restante da análise, assumiu-se o valor da velocidade igual a 1500 m/s.

Como padrão estabelecido na linha IAM3, foram também realizadas 15 análises de velocidade na linha 93. Devido à impossibilidade de aplicar esta análise ao longo de todos os conjuntos CDPs, os valores de velocidade foram interpolados considerando os valores dessas 15 análises.

As velocidades selecionadas para cada CDP analisado são apresentadas em Tabela B.4, Tabela B.5 e Tabela B.6 no Apêndice A.

6.1.4 Correção do sobretempo

Na Figura 6.5 é apresentada a correção do sobretempo a partir das velocidades obtidas na etapa anterior.

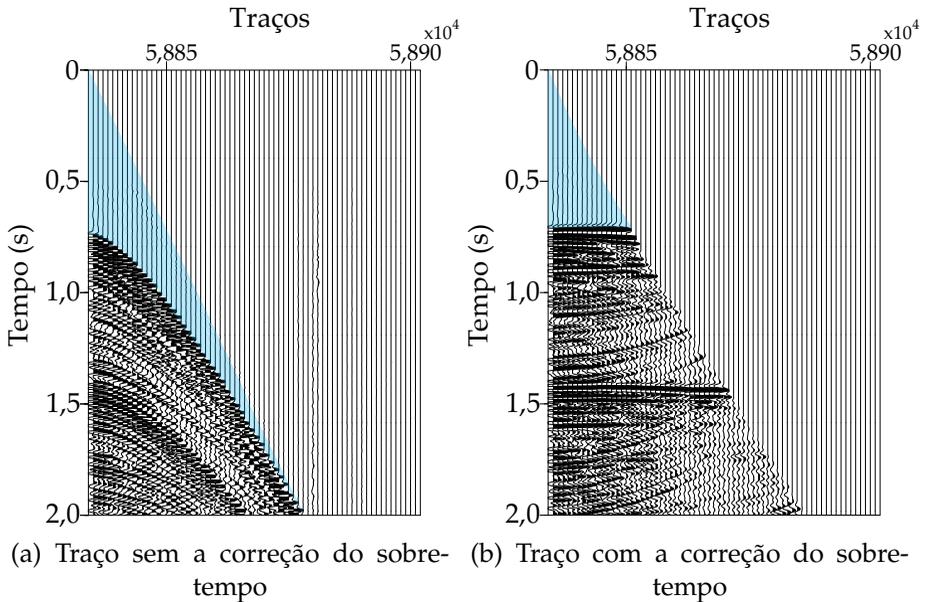


Figura 6.5.: Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicada aos traços do conjunto CMP 1000. A região em azul representa a porção do registro que contém informações da coluna d'água

Neste processo, os perfis de velocidade foram interpolados espacialmente e temporalmente para correção do sobretempo em todos os traços da linha sísmica. Na Figura 6.5 (b) observa-se que a coluna d'água está sendo representada somente nos *offsets* mais próximos, já que a coluna d'água não possui uma amostragem ao longo de todos os traços. Nos *offsets* mais distantes as reflexões são influenciadas pelo estiramento e por isso não são observadas nessa região.

6.1.5 Empilhamento

Considerando os *offsets* de 300,00 a 4241,00 m ao invés de 241,00 a 4241,00 m, a Figura 6.6 apresenta o resultado do empilhamento de todos os CDPs da linha 0247_Caravela_93.

Ao longo do processamento observou-se que a remoção do fundo possibilitou a melhoria da visualização dos refletores na coluna d'água.

Com o objetivo de apresentar a porção da linha sísmica que corresponde à coluna d'água, na Figura 6.8 é apresentada a região de interesse que está localizada na porção final do levantamento.

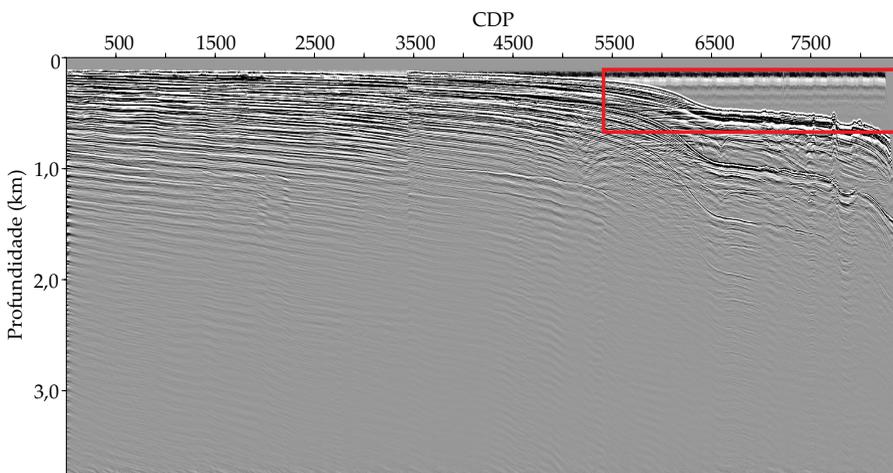


Figura 6.6.: Empilhamento dos CDP considerando toda a linha sísmica.

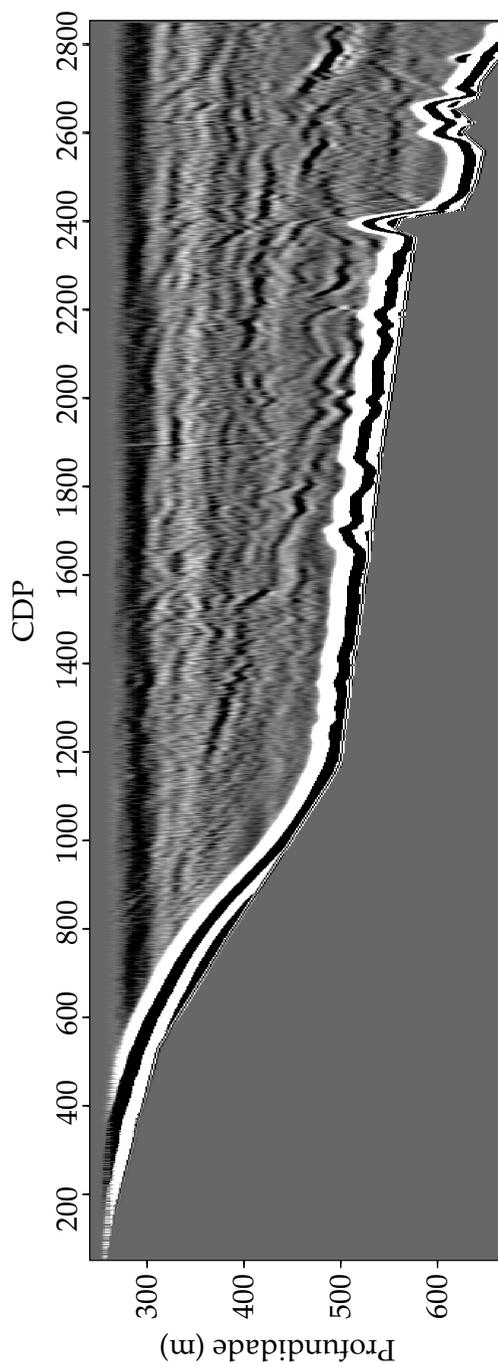


Figura 6.7.: Empilhamento dos CDP da linha 93 considerando somente a coluna d'água.

6.2 Discussões e Conclusões

6.2.0.1 Interpretação

De acordo com o volume das fontes utilizadas nos trabalhos de Biescas et al. (2008), Biescas et al. (2010) e Holbrook e Fer (2005) e considerando as reflexões na coluna d'água entre 100 a 1000 vezes mais fracas que as reflexões em subsuperfície (HOLBROOK et al., 2003), é possível afirmar que as informações contidas do registro de observador, volume do conjunto da fonte e profundidade do levantamento representam limitações de aplicabilidade da metodologia.

O processamento sísmico aplicado à linha 93 permitiu identificar refletores que possuem padrões ondulatórios entre as profundidades de 320 e 550 metros de profundidade e continuidade na ordem de 1000 metros.

A ausência de refletores na coluna d'água nas regiões mais rasas que 300 metros foi resultado do processamento sísmico aplicado na tentativa de reduzir a visualização da onda direta. Processo que necessita de mais estudos para a remoção da onda direta de maneira mais eficiente sem comprometer parte dos dados.

Além de focar na região que possui informações da coluna d'água, a diferença entre a Figura 6.6 e Figura 6.7 é a remoção dos refletores abaixo do leito marinho. A remoção foi realizada por meio do selecionamento manual de um vetor, cujos pontos estão de acordo com a localização do assoalho marinho nos eixos de profundidade e CDP. Esse processo é semelhante ao *picking* realizado na análise de velocidade. Esse fato permitiu melhorar a identificação e interpretação por meio da mudança da faixa dinâmica da visualização.

Os refletores observados na coluna d'água apresentam formatos ondulados entre as profundidades de 320 e 550 metros. Os refletores estão localizados entre os CDPs 1150 a 2850 e possuem continuidade horizontal na ordem de 1000 metros.

Esse padrão apresentado pelos refletores foi também observado por Biescas et al. (2014) e Moncada (2015), que confirmam esse

formato por meio da construção de modelos com variação lateral e vertical de temperatura e comparam com os trabalhos anteriores em OS.

Relacionando os dados físicos *in situ* do verão de 1993 com o sismograma gerado a partir do processamento da linha 93 é possível observar uma possível correspondência entre os refletores na coluna d'água e as regiões que possuem alta refletividade (Figura 6.8).

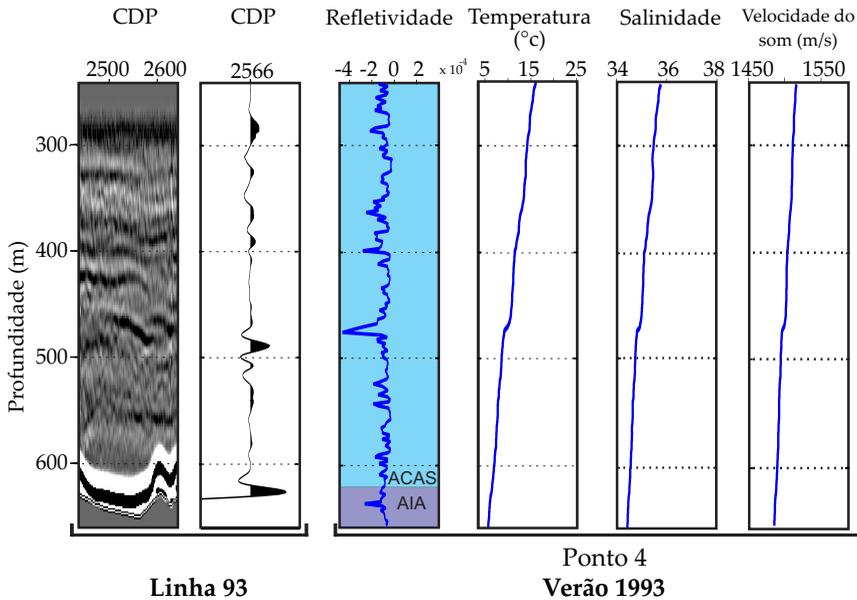


Figura 6.8.: Comparação da linha sísmica 93 com os dados oceanográficos do verão de 1993.

As regiões comparadas estão nas mesmas profundidades e são espacialmente próximas em 12km e temporalmente em 30 dias. Dessa forma, foi possível estabelecer uma comparação com esses dois tipos de dados.

Analisando os dados do sismograma e os dados *in situ* é possível destacar a presença de refletores na coluna d'água em ambos. No dados do sismograma é possível observar eventos de reflexão nas profundidades de 350 e 550 m. Nos gráficos da refletividade é

possível constatar que essa mesma região da coluna d'água possui valores altos, indicando a presença de refletores dentro da ACAS.

Interação com o relevo

Foi possível notar uma mudança na profundidade do refletor a medida que aproxima-se da costa. Dessa forma supõem-se que existe uma interação entre os eventos que causam as reflexões com a topografia do fundo marinho.

6.2.0.2 Relação entre as frequências observadas e estruturas

A presente relação foi realizada por meio da comparação entre os dados de amostragem e resolução dos dados sísmicos com os processos oceanográficos que ocorrem na região.

Amostragens verticais e horizontais

Considerando as amostragens verticais e horizontais entre os dados sísmicos e oceanográficos, na Tabela 6.6 são expostas as comparações entre esses dados.

Tabela 6.3.: Amostragem vertical e horizontal da linha sísmica 93 e da estação oceanográfica coletada no verão de 1993.

	Linha 93	Estação Oceanográfica	Relação
Vertical (m)	3,05	2,00	0,66
Horizontal (m)	13,34	19110,27	1433,09

A amostragem vertical foi obtida por meio da taxa de amostragem das estações oceanográficas e levantamento sísmico. Foi observado que a linha sísmica apresentou valores ligeiramente maiores quando comparados com os dados das estações oceanográficas, possuindo menor capacidade de discretização vertical da coluna d'água.

A amostragem horizontal foi obtida por meio da distância entre os CMPs nas linhas sísmicas e distância entre as coletas nas estações oceanográficas. Foi observado que os dados sísmicos permitiram uma amostragem mais de 1400 vezes maior que os dados convencionais, evidenciando assim uma das grandes potencialidades da OS.

Resolução vertical e horizontal

A resolução dos dados sísmicos evidencia a capacidade de identificar dois eventos próximos. Na Tabela 6.4 são expostos os valores das resoluções vertical e horizontal considerando as frequências que possuem as maiores amplitudes na linha 93 por meio das equações Equação (2.13) e Equação (2.14).

Tabela 6.4.: Resolução horizontal e vertical da linha 93.

	Resolução	
	Min	Max
Vertical (m)	25,44	7,63
Horizontal (m)	133,44	73,09

Analisando os picos de energia que estão entre 15 a 50 Hz, é possível determinar uma resolução horizontal entre 73,09 a 133,44 m, considerando uma velocidade média de propagação de 1526,22 m/s a uma profundidade de 350 m. O presente resultado indica que a distância mínima para distinguir dois refletores separadamente é de 73,09 metros, que de acordo com Biescas et al. (2010) e Ruddick et al. (2009) representam duas ordens de magnitude maior que as técnicas convencionais.

Considerando a mesma velocidade média de propagação, a resolução vertical indica que a distância para distinguir dois refletores separadamente foi de 7,63 a 25,44 m.

Relação com estruturas oceanográficas

Para relacionar o sismograma com as estruturas que ocorrem na região, foram destacadas as reflexões mais coerentes e separadas em dois setores de acordo com a profundidade que ocorrem (Figura 6.9).

De acordo com o conhecimento das estruturas que ocorrem na região, é possível afirmar a possibilidade do registro sísmico do fenômeno de intrusão da ACAS em direção à porção mais rasa da plataforma continental. Tal fenômeno é devido ao ajuste baroclínico ocasionado pelas forçantes climatológicas da região, com explicado anteriormente (Sessão 2.4.3).

Os refletores que estão localizados no centro da coluna d'água, setor B, estão localizados na porção centro-superior da ACAS e podem ser relacionados aos processos de mistura vertical que ocorrem dentro dessa massa d'água, resultado da interação com a AT. Tal mistura pode ser associada à difusão vertical.

O setor A pode ser interpretado como uma intrusão termohalina, pois ele está na região limite entre a ACAS e AIA na sua porção mais profunda. Esse processo é resultado da intrusão da ACAS sobre a plataforma nessa época do ano e da presença da AIA no talude. A intrusão da ACAS sobre regiões mais rasas da plataforma, associada às variações de fluxo corrente do Brasil, pode estar elevando o limite superior da AIA devido ao ajuste a nível baroclínico, como observado no trabalho de Silva, Araújo e Bourlès (2005).

As intrusões termo-halinas são estruturas possíveis de serem identificadas por meio de reflexão como observado nos trabalhos Holbrook et al. (2003) e Ruddick (2003), onde é possível notar a correspondência nas dimensões dessa estrutura encontradas no presente trabalho.

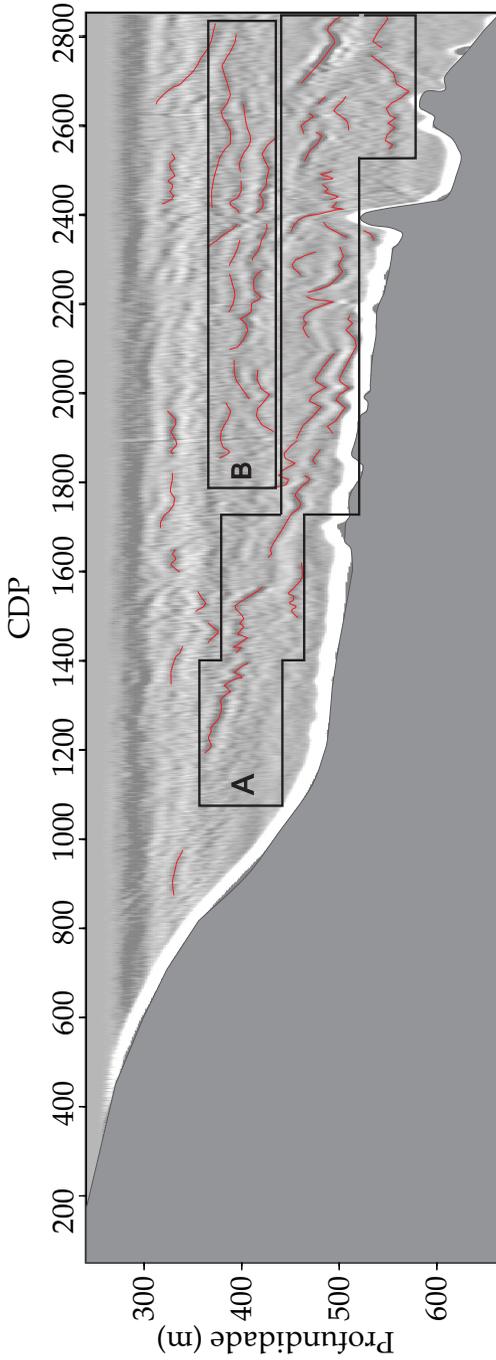


Figura 6.9.: Interpretação dos refletores da linha 93 em grupos, onde o setor **A** refere-se à região de intrusão da ACAS e o setor **B** refere-se à zona de mistura entre ACAS e AT.

Na parte inferior do setor A, entre os CDP 1700 e 2800, foi possível observar uma forte interação dos refletores com o fundo, apresentando uma maior variação vertical nessa região. O efeito do fundo interagindo com os refletores já foi observado por Biescas et al. (2010) e Vsemirnova et al. (2009) e pode ser associado ao processo de mistura turbulenta e também a ondas internas (HOLBROOK; FER, 2005), estrutura que propaga-se entre meios estratificados e sua origem está associada a topografia da quebra da plataforma.

6.3 Processamento da linha 95

Visando confirmar a potencialidade da OS em dados sísmicos do acervo da indústria do petróleo, o processamento da linha sísmica permitiu confirmar a viabilidade do processamento estabelecido nos dados da literatura (IAM3) e aplicado à linha 93.

A linha 95 possui características de aquisição semelhantes às da linha anterior. Porém foi aquisitada dois anos após a linha 93 e estão 40 km distantes uma da outra.

6.3.1 Pré-processamento

Inserindo a Geometria

Esses dados também foram repassados no formato .SEGD, sendo necessário realizar a conversão para o formato de trabalho do *software*, a extensão .SU. Para inserir as informações do levantamento sísmico nos traços, foram utilizados os dados descritos no registro do observador do próprio levantamento.

Com as informações de CDP, *offset*, posição do hidrofone e posição da fonte inserida no cabeçalho, é possível inserir a geometria do levantamento, essencial para iniciar o processamento.

Tabela 6.5.: Parâmetros de aquisição linha 95.

Parâmetros	linha 95
Volume da Fonte (cu.in)	3000
Pico de energia (Hz)	20-50
Formato	SEGD
Nº de Canais	150
Distância entre canais	26,67
Intervalo entre os disparos (m)	26,67
<i>Offset</i> mínimo (m)	215,00
Cobertura dos CMPs	75
Profundidade	150-650

Este levantamento contou com um arranjo de *air gun* com volume total de 3000,00 in³ realizando disparos a cada 26,67 m e um *array* de 4000,50 m com 150 hidrofones, sendo que o mais próximo está a 215,00 m da fonte. De acordo com o *shapefile* da linha sísmica, a região de levantamento possui profundidades variando entre 150 e 650 metros.

Filtro

Visando remover os ruídos fora da frequência de interesse, nessa linha sísmica também foi utilizado o filtro passa-banda Butterworth, com largura de banda de 90 Hz, subida limitada de 5 a 15 Hz e descida limitada de 85 a 95 Hz. As frequências escolhidas tiveram com objetivo principal de reduzir o efeito de ruído de alta frequência (< 100 Hz) ocasionado pela ondulação na superfície, fato descrito no momento do levantamento e registrado pelo observador, e das bolhas devido ao efeito de cavitação após o pulso principal.

O filtro é caracterizado por ser um polígono de mínima fase com vértices definidas pelo vetor de frequências, onde os valores selecionados foram 5, 15, 85 e 95 Hz (Figura 6.10)

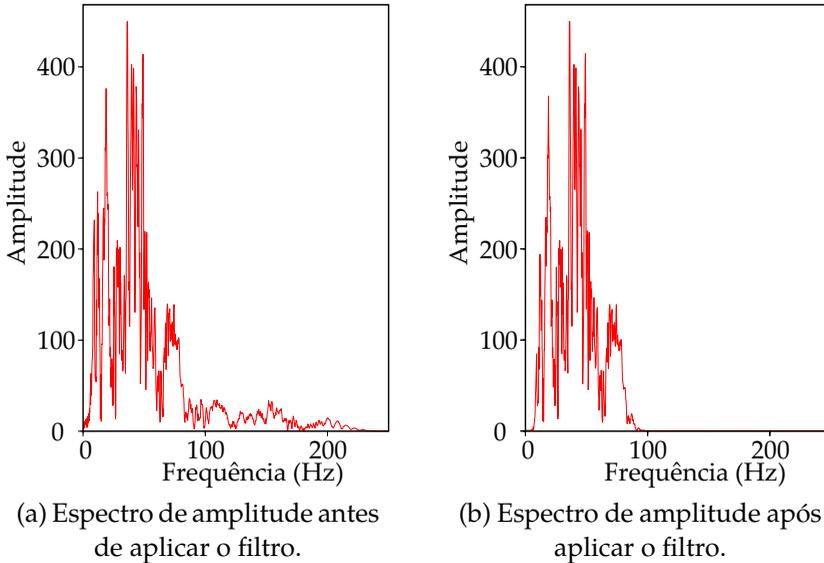


Figura 6.10.: Diferenças no espectro de amplitude do traço 5000 por meio da aplicação do filtro passa-banda Butterworth com faixa central de 15 a 95 Hz.

A Figura 6.1 (a) exibe o espectro de amplitude do traço 5000, onde é possível observar os ruídos com componentes de baixas (< 5 Hz) e altas frequências (> 95 Hz). Na Figura 6.1 (b) observa-se o resultado após a aplicação do filtro.

A escolha da fase do filtro seguiu o mesmo procedimento apresentado no processamento da linha 93: a visualização do efeito do tipo de filtro no sismograma final (após o empilhamento).

Edição dos traços e correção da divergência esférica

Conforme aplicado aos capítulos anteriores, a edição de traços e a etapa de aplicação de ganho para compensar a redução de amplitude do sinal foram implementados de maneira conjunta.

Na edição foram retirados os traços que apresentavam ruídos associados ao mau funcionamento dos hidrofones. Foi removido também a porção do sismograma que não amostrava a coluna

d'água por meio do janelamento de todos os traços no tempo, ou seja, foram considerados apenas a parte dos traços que representam a coluna d'água. O tempo duplo de propagação utilizado foi de 0 a 2s, contemplando assim a seção que possui informações da coluna d'água e pequena parte das camadas abaixo do fundo marinho.

Para corrigir a perda de amplitude do sinal de acordo com a distância da fonte, foi aplicado ganho exponencial quadrático no domínio do tempo. O ganho foi de acordo com a Equação 3.5, sendo que α é igual 2. Na Figura 6.11, pode ser observada a edição dos traços e o aumento na amplitude do sinal em regiões mais profundas.

Como observado na Figura 6.11b, não foi constatado melhoria significativa com a aplicação do ganho nesse modo de visualização dos refletores. Sendo necessária a visualização traço a traço para melhor rerepresentação desse ganho.

Visando melhorar o imageamento e identificação dos refletores, foram removidos os traços que apresentavam ruído, como por exemplo os traços 75500, 75501, 75502, 75532, 75533, 75611 e 75612 na Figura 6.11a.

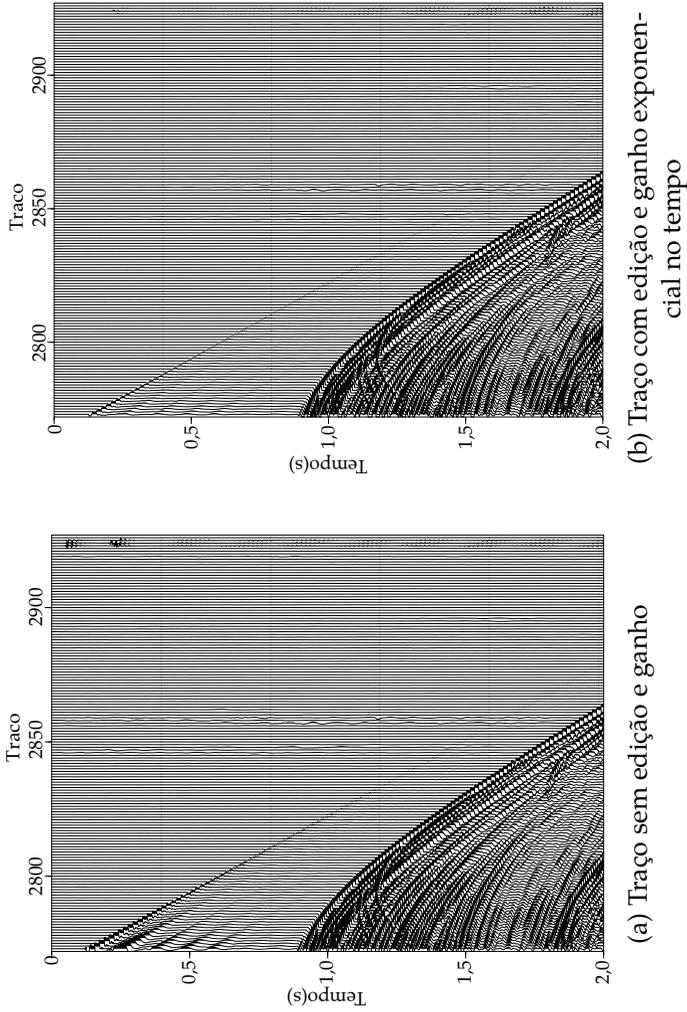
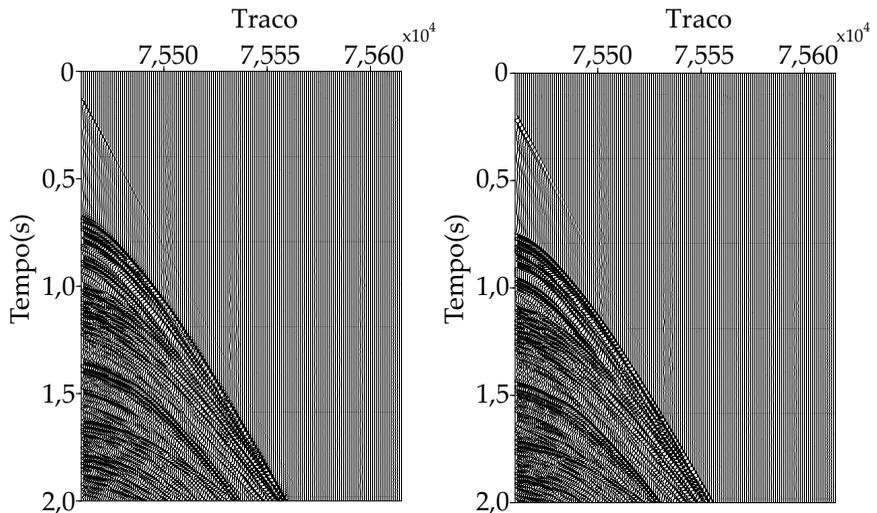


Figura 6.11.: Aplicação da função ganho no domínio do tempo e remoção dos traços ruidosos no arranjo de disparo 25.

6.3.2 Remoção da onda direta

A remoção da onda direta seguiu o método que foi aplicado nos capítulos anteriores. Conforme observa-se na Figura 6.12, este método permitiu reduzir moderadamente o efeito da onda direta no sismograma. Contudo, auxiliou a visualização das estruturas na coluna d'água.



(a) Traço que apresenta onda direta. (b) Traço com onda direta amenizada.

Figura 6.12.: Comparação dos traços do disparo 500, antes e após a remoção da onda direta.

6.3.3 Análise da velocidade

A análise de velocidade é realizada nos conjuntos CDP, dessa forma é necessário reorganizar os dados que, originalmente, estão organizados por conjuntos de tiros.

Na Figura 6.13 (a) observa-se a análise *semblance* e as velocidades escolhidas de acordo com o valor de coerência. Na Figura 6.4 (b) é apresentado o conjunto CMP analisado. Considerando os

primeiros traços do arranjo como base para as escolhas, é possível destacar que as velocidades que possuem maior valor de *semblance* correspondem às posições dos refletores no tempo. Esse fato auxiliou a escolha das velocidades ao longo dos traços analisados.

Contudo, foi possível notar que ao longo da linha 95 os refletores na coluna d'água são muito fracos (0 - 0,7 s), visto que somente os *offsets* mais próximos contêm a informação das reflexões na coluna d'água (Figura 6.13 (a) na coluna d'água).

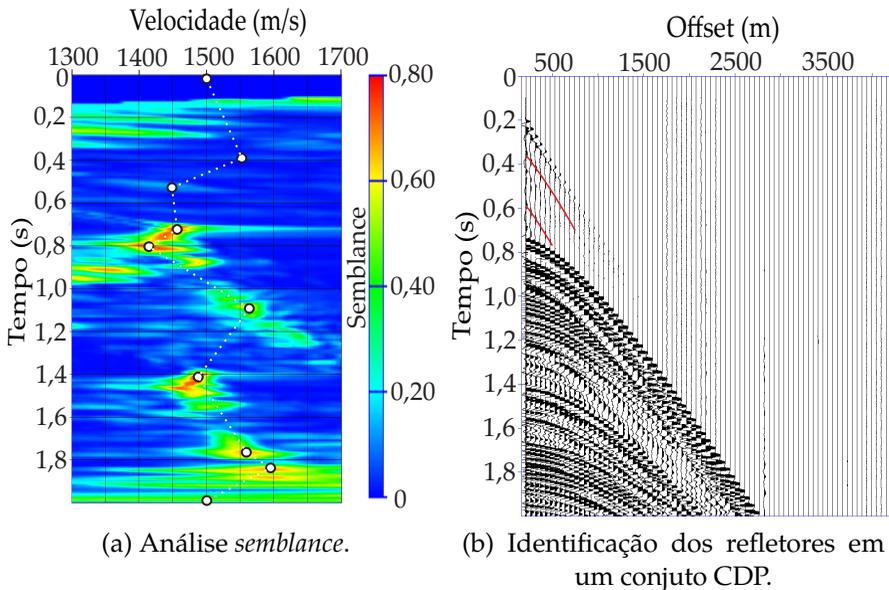


Figura 6.13.: Análise da velocidade de propagação do pulso aplicado aos traços do arranjo CMP 1300.

O perfil analisado mostrou a velocidade variando entre 1416,55 e 1597,84 m/s. A análise assumiu o valor de 1500 m/s na porção inicial do registro ($t=0$ s). Observou-se valores crescentes até 0,4 s com velocidade de 1560,10 m/s. Após esse ponto, o valor decresceu até 1449,16 m/s em 0,5 s e assumiu-se constante até atingir o leito marinho (0,75 s).

Na porção abaixo do leito marinho, a análise apresentou o menor

valor de velocidade em 0,8 s com o padrão de crescimento até 1,8 s onde observa-se a região com a maior velocidade do perfil. Para o restante da análise assumiu-se o valor da velocidade igual a 1500 m/s.

Foram realizadas 13 análises de velocidade concentradas na porção da linha sísmica que possui a camada d'água. Devido à impossibilidade de aplicar esta análise ao longo de todos os conjuntos CDPs, os valores de velocidade foram interpolados considerando os valores dessas 13 análises.

As velocidades selecionadas para cada CDP analisado são apresentadas em Tabela B.7, Tabela B.8 e Tabela B.9 no Apêndice A.

6.3.4 Correção do sobretempo

As velocidades obtidas são utilizadas para correção do sobretempo de chegada em todos os traços ocasionados pelo *offset*. Como resultado, um mesmo de reflexão é reposicionado para um mesmo tempo de chegada em todos os traços desse conjunto CDP, como se cada traço possuísse o valor de *offset*=0 (Figura 6.14).

Neste processo, os perfis de velocidade foram interpolados espacialmente e temporalmente para correção do sobretempo em todos os traços da linha sísmica. Na Figura 6.14 (b) observa-se que a coluna d'água está sendo representada somente nos *offsets* menores devido a coluna d'água não possuir uma amostragem suficiente ao longo de todos os traços e são influenciados pelo estiramento.

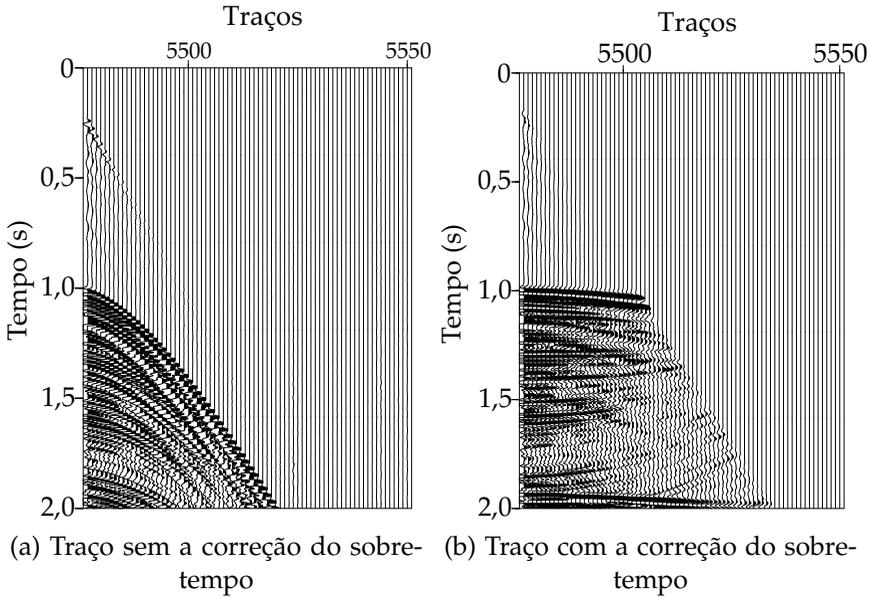


Figura 6.14.: Comparação dos traços antes e após a correção do sobretempo aplicada aos traços do arranjo CMP 150.

6.3.5 Empilhamento

Nesta etapa os traços corrigidos no processo anterior foram empilhados para representar um Ponto Médio Comum (CMP).

Considerando eventos no domínio no tempo, a soma resulta na interação construtiva dos eventos coerentes e interação destrutiva em eventos não correlacionados, refletindo diretamente no aumento da relação sinal/ruído.

Visando reduzir o efeito que ainda resta da onda direta, é possível ajustar a amplitude de *offset* que foi empilhada, ou seja, no empilhamento não foram considerados os *offsets* mais próximos da fonte. Assim, foram considerados os *offsets* de 300,00 a 4215,00 m ao invés de 215,00 a 4215,00 m.

A Figura 6.15 é o resultado do empilhamento dos arranjos CDPs e apresenta todos os disparos da linha 0247_Caravela_95.

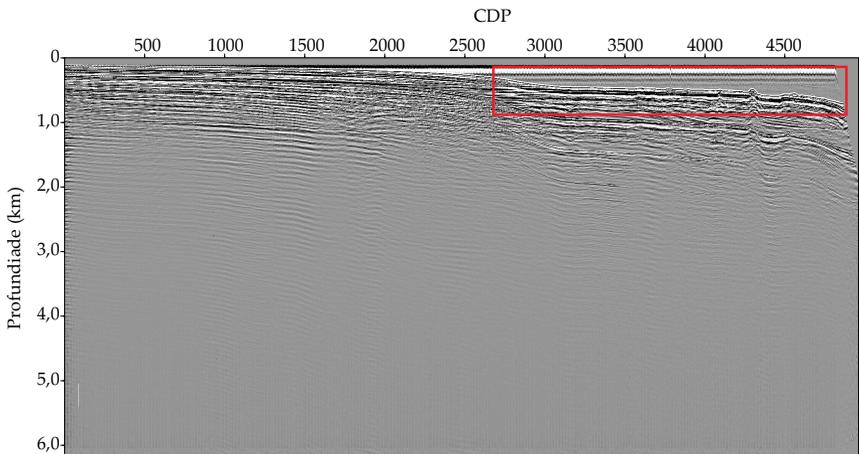


Figura 6.15.: Empilhamento dos CDP considerando toda a linha sísmica.

Ao longo do processamento observou-se que a remoção do fundo possibilita a melhoria da visualização dos refletores na coluna d'água. Na figura Figura 6.16, é apresentado o empilhamento somente para a região de interesse que está na porção final do levantamento.

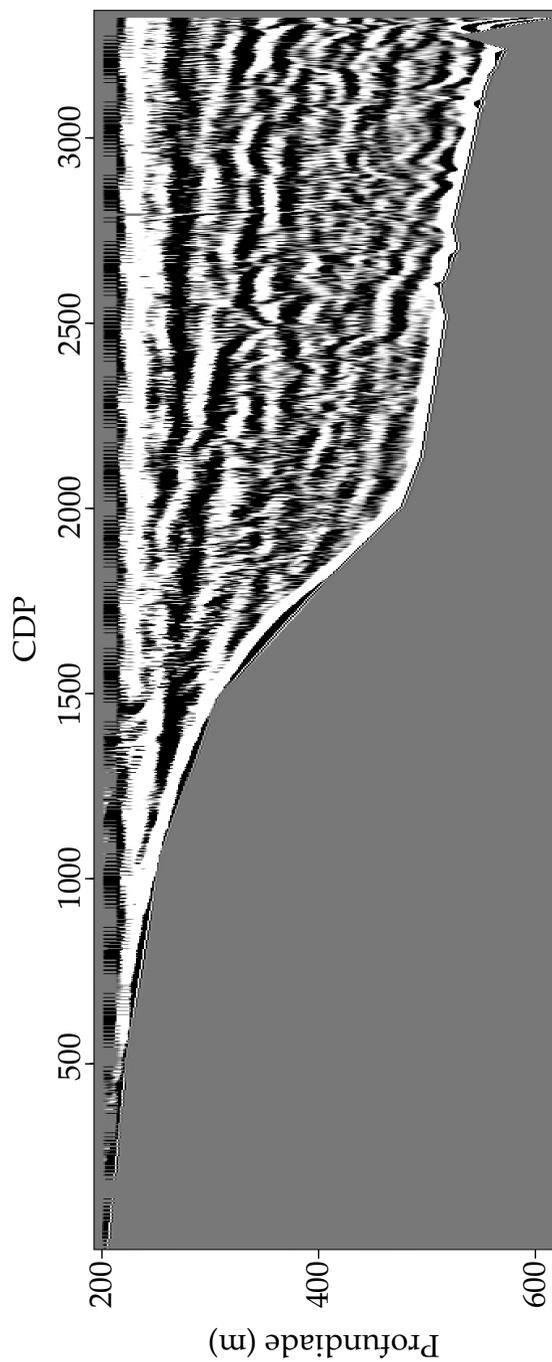


Figura 6.16.: Empilhamento dos CDP da linha 95 considerando somente a coluna d'água.

O processamento dos traços sísmicos permitiu identificar refletores que possuem padrões ondulatórios entre as profundidades de 270 - 540 metros de profundidade.

6.4 Discussões e Conclusões

O processamento sísmico aplicado a linha 95 com objetivo de extrair informações da coluna d'água permitiu a visualização de refletores.

6.4.0.1 Interpretação

Nesta linha, foram identificados refletores que possuem padrões ondulatórios entre as profundidades de 270-540 metros e, como também observado na linha anterior, continuidade na ordem de 1000 metros. Os refletores observados na coluna d'água apresentaram formatos ondulados, com o mesmo padrão observado nas linhas sísmicas anteriores e descrito por Biescas et al. (2014) e Moncada (2015)

Observou-se que a ausência de refletores na coluna d'água nas regiões mais rasas agora foi de 230 metros. Novamente, a parte do processamento sísmico aplicado para reduzir a visualização da onda direta pode estar influenciando a visualização na porção superficial dos dados.

Como observado na Figura 6.16, foi constatado mais uma vez que a remoção dos refletores abaixo do leito marinho permitiu melhorar a qualidade de visualização e auxiliar a interpretação.

Relacionando os dados físicos *in situ* do inverno de 1993 com o sismograma gerado a partir do processamento da linha 95, é possível observar que existem refletores na coluna d'água de acordo com as regiões que possuem alta refletividade (Figura 6.17) e os traços sísmicos.

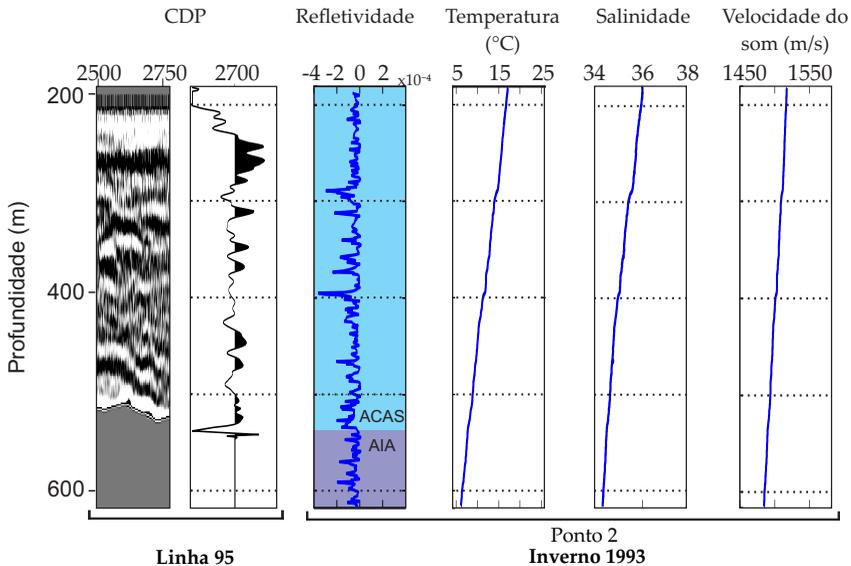


Figura 6.17.: Comparação da linha sísmica 95 com os dados oceanográficos do inverno de 1993.

As regiões comparadas estão espacialmente próximas em 50km e temporalmente em 2 anos.

Não foi possível estabelecer uma comparação direta com esses dois tipos de dados em razão de serem temporalmente muito distantes. Contudo, é possível destacar a presença de refletores na coluna d'água em ambos. No dados do sismograma é possível identificar eventos de reflexão nas profundidades de 360 e 490 m. No gráfico da refletividade é possível destacar que essa região da coluna d'água possui alguns picos de valores altos, indicando a presença de refletores dentro da ACAS como observado na linha 93.

Interação com o relevo

Foi possível notar uma mudança na profundidade do refletor a medida que aproxima-se da costa. Dessa forma, novamente foi verificada a suposição que existe uma interação dos refletores com

a topografia do fundo marinho.

6.4.0.2 Relação entre as frequências observadas e estruturas

Como aplicada no dado anterior, a relação entre as estruturas que podem ser observadas foi realizada por meio da comparação entre os amostragens dos dados *in situ* e sísmico. Foi também realizada a comparação entre a resolução dos dados sísmicos com os processos oceanográficas que ocorrem na região.

Amostragens verticais e horizontais

Considerando as amostragens verticais e horizontais entre os dados sísmicos e oceanográficos, são expostas na Tabela 6.6 as comparações entre esses dados.

Tabela 6.6.: Amostragem vertical e horizontal da linha sísmica 95 e da estação oceanográfica coletada no inverno de 1993.

	Linha 95	Estação Oceanográfica	Relação
Vertical (m)	3,03	1,00	0,33
Horizontal (m)	13,34	55460,27	4158,98

Considerando a amostragem vertical, foi observado que a linha sísmica apresentou valor ligeiramente menor (1/3) quando comparado com os dados das estações oceanográficas, o que reflete um menor poder de discretização vertical da coluna d'água.

Com relação à amostragem horizontal, foi observado que os dados sísmicos permitiram uma amostragem mais de 4100 vezes maior que os dados convencionais, evidenciando assim uma das grandes potencialidades da OS.

Resolução vertical e horizontal

A resolução dos dados sísmicos evidencia a capacidade de identificar dois eventos próximos. Na Tabela 6.4 são expostos

os valores da resoluções vertical e horizontal considerando as frequências que possuem as maiores amplitudes na linha 93 por meio das equações Equação (2.13) e Equação (2.14).

Tabela 6.7.: Resolução horizontal e vertical da linha 95.

	Resolução	
	Min	Max
Vertical (m)	18,92	7,57
Horizontal (m)	115,07	72,78

Analisando a faixa de frequência entre 20 a 50 Hz que são os picos de energia para a linha 95, foi possível obter uma resolução horizontal entre 72,78 a 115,07 m². O presente resultado indica que a distância mínima para distinguir dois refletores separadamente é de 72,78 metros.

Considerando a mesma velocidade média de propagação, a resolução vertical indica que a distância para distinguir dois refletores separadamente foi de 7,63 a 25,44 m.

Relação com estruturas oceanográficas

Para relacionar o sismograma com as estruturas que ocorrem na região, foram destacadas as reflexões mais coerentes e separadas em dois setores de acordo com a profundidade que ocorrem (Figura 6.9).

De acordo com o conhecimento das estruturas que ocorrem na região, é possível afirmar que as reflexões estão dentro da ACAS localizada sobre a quebra da plataforma continental. Tal fenômeno é devido ao ajuste baroclínico ocasionado pelas forçantes climatológicas da região, como explicado anteriormente (Sessão 2.4.3).

²Considerando também uma velocidade média de propagação de 1526,22 m/s a uma profundidade de 350 m.

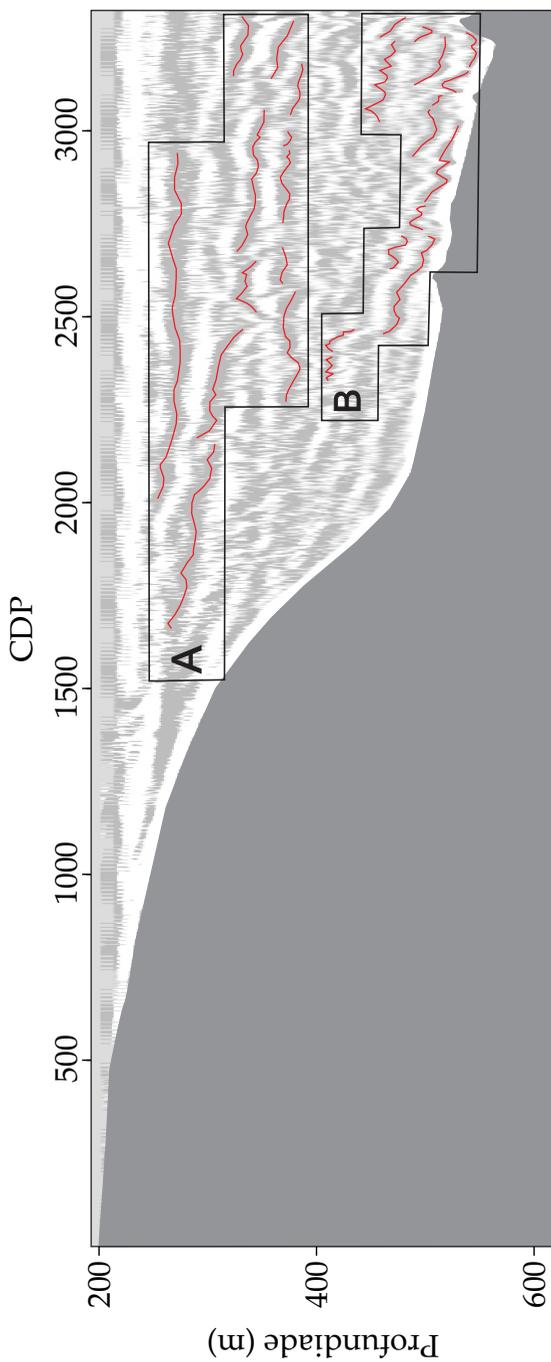


Figura 6.18.: Interpretação dos refletores da linha 95.

As reflexões mais superficiais, setor A, podem ser interpretadas como a região que sofre influencia da AT, visto que para essa época do ano a região de interação AT/ACAS apresenta-se mais profunda. Configurando assim uma região de mistura vertical.

O setor B contempla os refletores que possuem forte interação com o fundo, fato que pode ser explicado pelos refletores com maior variação vertical e associado à mistura turbulenta da ACAS nessa região. Também não descarta-se a ocorrência de ondas internas na região central do setor B, pois apesar do limite da ACAS/AIA estar mais profunda nessa época do ano, é provável que exista a propagação visto que sua ocorrência está associada a topografia da quebra da plataforma (DIAS, 2013; APEL, 2002).

7 Considerações finais

7.1 Conclusão

Ao longo da implementação do método foram encontrados diversos contratempos em relação ao processamento de dados sísmico da indústria do petróleo, visto que não existe um material norteador de como explorar os dados passo a passo. As duas principais limitações foram a não compreensão das partes manuscritas e ausência de materiais que identifiquem as siglas nos registros do observador.

Considerando os dados utilizados nesse trabalho e de acordo com o volume das fontes utilizadas nos trabalhos anteriores, é verificado que as reflexões na coluna d'água possuem duas a três ordens de grandeza menores que as reflexões em subsuperfície. Tal fato evidencia as limitações que os dados da indústria do petróleo possuem para aplicação da OS (Tabela 7.1).

Tabela 7.1.: Requisitos mínimos dos dados sísmicos da Indústria do Petróleo para aplicação na OS.

Parâmetro	Requisitos mínimos
	Quantidade de canais
(1) Informações da geometria	Distância entre os canais Distância entre os disparos Disparos faltantes
(2) Volume (pés ³)	2000
(3) Frequência (Hz)	20-100
(4) Profundidade da coluna d'água	$Ri_{od}=\textit{offset}$ mínimo + $\lambda/4$

1. Informações da geometria: Presente no registro do observador, são essenciais para dar início ao processamento sísmico. É importante apresentar no mínimo informações de maneira clara e legível.
2. Volume da fonte: É necessário verificar se o pulso emitido pela fonte possui amplitude suficiente para que a sua reflexão na coluna d'água possua amplitude suficiente para ser identificada no sismograma, visto que o volume do conjunto de fontes altera proporcionalmente a intensidade do pulso emitido. Não foi observada a utilização de fontes com valores menores que 2000 pés³ em trabalhos da OS anteriores.
3. Frequência: É importante levar em consideração dois fatores. O primeiro é que a atenuação do sinal aumenta com a frequência, ressaltando a vantagem da utilização das baixas frequências. O segundo é a resolução, onde de maneira geral, a mínima resolução vertical é aproximadamente equivalente a um quarto do comprimento de onda. Por exemplo, um pulso de 20 Hz não será capaz de perceber as mudanças na impedância acústica menores que 17,8 m. Neste caso, considerando o levantamento em águas profundas, sugere-se

o uso de frequências não menores que 20-100 Hz. Assim, estes valores podem mudar de acordo com a resolução desejada.

4. Profundidade da coluna d'água: É necessário que exista um registro da coluna d'água abaixo da região de influência da onda direta (Ri_{od}). A influência da onda está associada às frequências utilizadas e o *offset* mínimo. Observou-se nos três dados processados que essa região pode ser determinada pela soma do *offset* mínimo e 1/4 do comprimento de onda das frequências emitidas.

Outro ponto importante, mas não limitante, é o número reduzido de canais que propicia uma menor relação sinal-ruído, geralmente visualizado em levantamentos mais antigos.

As informações disponibilizadas entre *shapefile*, dados sísmicos e relatório do observador algumas vezes não apresentaram coerência em relação aos detalhes do levantamento. Como por exemplo na linha 93, onde o extensão do levantamento é menor quando os dados sísmico são comparados com o *shapefile* extraído no sistema de solicitação do dado sísmico.

A OS mostrou a viabilidade do uso dos dados sísmicos multicanais do acervo da indústria do petróleo que atendam os requisitos mínimos, evidenciando assim uma nova maneira de usá-los para extração de informações contidas na coluna d'água. Dessa forma, a melhor configuração para aplicação seria em levantamentos multicanais que possuam o registro do observador com todas as informações claras e legíveis, com o volumes do conjunto de fontes maior que 2000 pés³, bandas de frequências mínima entre 20 a 100 Hz e profundidades maior que a região de influência da onda direta.

Essas informações possibilitam aumentar a compreensão dos processos oceanográficos se aliados ao acervo de dados oceanográficos existentes.

É importante ressaltar que seu domínio é público e caracteriza-se como uma fonte de informações com baixos custos de aquisição quando comparado à execução de uma campanha oceanográfica.

7.1.1 Processamento

O processamento da linha IAM3 proporcionou o entendimento da aplicação do método e as etapas envolvidas no processamento sísmico com objetivo de extrair informações da coluna d'água. Foi possível imagear o *meddy* descrito pela literatura com as mesmas dimensões e características relatadas pela bibliografia. Tal fato possibilitou estabelecer uma base inicial para o processamento das linhas 93 e 95.

O processamento sísmico aplicado à linha 93 permitiu visualizar refletores entre as profundidades de 320 e 550 metros. Já o processamento sísmico aplicado à linha 95 permitiu identificar refletores um pouco mais rasos, entre 270 e 540 m de profundidade.

Nas duas linhas foi possível observar que os refletores possuem padrões ondulatórios e continuidades na ordem de 1000 metros.

A ausência de refletores na coluna d'água nas regiões mais rasas, 270,0 m para a linha 93 e 240,0 para a linha 95, é devido ao fato de estar na região de influencia da onda direta. A remoção desse efeito proporcionou uma melhor visualização dos eventos reflexivos na coluna d'água. Contudo, necessita de mais estudos para aprimorar a remoção e implementá-la de maneira mais eficiente.

7.1.2 Interpretação

Com base nos dados das estações oceanográficas foi possível caracterizar as massas d'água da região do levantamento sísmico de acordo com os índices termohalinos determinados pela bibliografia. Para a profundidade das linhas sísmicas 93 e 95, é possível identificar três massas d'água: Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Intermediária Antártica (AIA).

Comparando as linhas sísmicas com os dados *in situ*, foi possível identificar a presença de refletores na coluna d'água em ambos.

Na linha 93, considerando a região com profundidades entre 350 e 550 m, foi possível identificar eventos de reflexão que correspondem aos elevados valores de refletividade.

Já na linha 95, apesar de ter sido possível identificar eventos

de reflexão na coluna d'água e ter sido observados altos valores de refletividade, não foi possível relacioná-los devido à distância temporal entre os dois tipos de dados.

7.1.3 Relação das estruturas

Para a linha 93 as reflexões podem ser separadas em dois setores: "A" mais próximo ao fundo e "B" na porção central da coluna d'água. Os refletores no setor "A" foram interpretados como a região limite entre a ACAS e AIA na sua porção mais profunda. Resultado da intrusão da ACAS sobre a plataforma nessa época do ano, elevando o limite superior da AIA devido ao ajuste a nível baroclínico. Sugere-se que a parte mais profunda desses refletores possuam interação com o fundo, podendo conter ondas diretas e mistura turbulenta.

Os refletores no setor "B" estão localizados na porção central da ACAS e podem ser relacionados com os processos de mistura vertical dessa massa d'água com a parte inferior da AT.

Para a linha 95 as reflexões também podem ser separadas em dois setores: "A" na região mais superficial do sismograma e "B" na região mais perto do fundo. Os refletores no setor "A" foram relacionados como a região de mistura vertical entre AT e ACAS, visto que para essa época do ano a camada limite entre essas duas regiões está mais profunda. O setor "B" contempla os refletores dentro da ACAS, região que pode estar associada à mistura turbulenta. Fenômeno que é resultado da interação dessa massa d'água com o fundo.

Na parte inferior de ambas as linhas, foi possível constatar a interação dos refletores com a topografia da quebra da plataforma, fato que pode ser explicado pelos refletores apresentarem uma maior variação vertical, indicando a possibilidade da ocorrência de ondas internas.

7.1.4 Proposta de aprimoramento

Foi observado que existe uma expressiva melhora na visualização dos traços quando as informações abaixo do assoalho marinho são removidas. Tal afirmação é devido às altas amplitudes das sessões geológicas atuarem como uma máscara sobre as reflexões da coluna d'água. Ao retirar o fundo, alteramos também a faixa dinâmica da visualização, isto é, retiramos parte dos dados que estão fora da escala de amplitude que nos interessa, permitindo assim a visualização dos eventos com amplitudes reduzidas.

Outra etapa que promove a melhoria na visualização é a redução dos traços que serão empilhados no conjunto CDP.

O processo da remoção da onda direta aplicado nesse trabalho conseguiu reduzir consideravelmente a sua amplitude. Contudo, ainda permaneceram resíduos localizados nos CDPs com menores *offsets*. Tais resíduos possuem amplitudes que estão no nível das reflexões da coluna d'água. Visando reduzir ainda mais o efeito da onda direta, não são considerados os primeiros traços do CDP no momento do empilhamento. Apesar da redução da relação sinal/ruído, qualitativamente é possível perceber que há uma melhora nos traços empilhados.

7.2 Trabalhos Futuros

Apesar do presente trabalho iniciar a aplicação da OS em dados da indústria do petróleo no Brasil, não foi possível extrair todas as informações possíveis na coluna d'água. São necessários mais trabalhos para explorar as aplicabilidades e limitações para obtenção das informações na coluna d'água de maneira remota. Desta forma, nesta seção, são sugeridos alguns pontos relevantes a serem considerados nos trabalhos futuros para comprovação.

7.2.1 Processamento dos dados sísmicos

É notável a quantidade de dados sísmicos quando somente considerarmos os levantamentos 2D alocados no acervo da ANP

e a potencialidade de extração de informações. Essa potencialidade pode ser ampliada se somarmos os levantamentos realizados também por empresas particulares.

Frente a grande disponibilidade, é necessário atentar aos fatores limitantes, para que não seja investido tempo em dados que não apresentem informações na coluna d'água. A verificação das informações contidas no cabeçalho dos dados, registro do observador e, quando disponível, o *shapefile* são essenciais para assegurar a capacidade do processamento em extrair informações na região de interesse.

Sugere-se que seja utilizado mais dados sísmicos da indústria do petróleo para confirmação dos requisitos mínimos de aplicabilidade do método nesses dados.

7.2.2 Interpretação e identificação

Como o objetivo de realizar a análise espectral dos eventos reflexivos, sugere-se a análise dos deslocamentos verticais dos refletores.

Como relatado nos trabalhos de Biescas et al. (2014) e Moncada (2015), essa análise permite a determinação de número de onda dos refletores que apresentam padrões oscilatórios. Essa abordagem considera que a continuidade das reflexões ao longo dos traços adjacentes correspondem a um mesmo refletor. Dessa forma é possível calcular a variação espacial desse refletor ao longo dos traços.

Com o objetivo de comparar os dados oceanográficos, sugere-se a aplicação da convolução da refletividade calculada pelos dados oceanográficos com um pulso parecido com a da fonte. Desta forma amplia-se a base de comparação entre os dois tipos de dados.

Visando estabelecer uma melhor relação entre os dados oceanográficos e sísmicos, sugere-se o estudo detalhado das massas d'água e a utilização de outros índices temoralinos para o detalhamento dos processos específicos de cada massa d'água e verificação de uma correlação mais próxima, respectivamente.

7.2.3 Proposta de aprimoramento

O presente trabalho deparou com diversas limitações de conhecimento ao longo de toda a sua execução. Foi necessário o investimento considerável de tempo e permitiu o constante crescimento acadêmico. Contudo, alguns conhecimentos prévios são necessários para maior domínio dos processamentos sísmicos em *Seismic Unix*. Por estar combinado com o sistema operacional Linux, é preciso dominar a programação em Bash para otimização dos comandos no terminal.

Existem mais processos para aplicar no processamento sísmico como a migração e inversão. Tais etapas podem promover estabelecimento de relação entre as frequências emitidas, estruturas na coluna d'água e extrair dados quantitativos da salinidade e temperatura remotamente.

Referências Bibliográficas

ALLABY, M. A dictionary of earth sciences. *Oxford reference online Show all parts in this series*, Oxford [etc.]: Oxford University Press, v.3, p. p.672, 2008.

ALVES, D. P. V. *Processamento de dados sísmicos de modo a acentuar as reflexões na camada de água*. 190 p. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Universidade de Lisboa. Lisboa. Portugal. p.77., 2009.

APEL, J. R. Oceanic internal waves and solitons. *An atlas of oceanic internal solitary waves*, Citeseer, p. 1–40, 2002.

BIESCAS, B.; ARMI, L.; SALLARÈS, V.; GRÀCIA, E. Seismic imaging of staircase layers below the Mediterranean Undercurrent. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Elsevier, v.57, n. 10, p. 1345–1353, 2010.

BIESCAS, B.; RUDDICK, B. R.; NEDIMOVIC, M. R.; SALLARÈS V.S, V.; BORNSTEIN, G.; MOJICA, J. F. Recovery of temperature, salinity, and potential density from ocean reflectivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 119, n. 5, p. 3171–3184, 2014.

BIESCAS, B.; SALLARÈS, V.; PELEGRÍ, J. L.; MACHÌN, F. R.; CARBONELL BUFFETT, G.; DAÑOBEITIA, J. J.; CALAHORRANO, A. Imaging meddy finestructure using multichannel seismic reflection data. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v.35, n. 11, p. 6, 2008.

BLACIC, T.; HOLBROOK, W. S. First images and orientation of internal waves from a 3-D seismic oceanography data set. *Ocean Science Discussions*, v.6, n. 3, p. 2341, 2010.

BORNSTEIN, G.; BIESCAS, B.; SALLARÈS, V.; MOJICA, J. Direct temperature and salinity acoustic full waveform inversion. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 40, n. 16, p. 4344–4348, 2013.

BUFFETT, G.; BIESCAS, B.; PELEGRÍ, J. L.; MACHÍN, F.; SALLARÈS, V.; CARBONELL, R.; KLAESCHEN, D.; HOBBS, R. Seismic reflection along the path of the Mediterranean Undercurrent. *Continental Shelf Research*, Elsevier, v.29, n. 15, p. 1848–1860, 2009.

BUFFETT, G. G. *Seismic Oceanography: New perspectives on the physical characterization of oceanographic processes*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Geofísica. Universidade de Barcelona. p.65., 2008.

BUFFETT, G. G. *Seismic oceanography: a new tool to characterize physical oceanographic structures and processes*. Tese (Doutorado) — Departamento de Geofísica, Universidade de Barcelona. Barcelona. p.62., 2011.

CALDWELL, J.; DRAGOSSET, W. A brief overview of seismic air-gun arrays. *The leading edge*, Society of Exploration Geophysicists, v. 19, n. 8, p. 898–902, 2000.

CAMPOS, E. J.; GONÇALVES, J.; IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil bight: Summer of 1991. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 100, n. C9, p. 18537–18550, 1995.

CASTRO, B. d.; LORENZZETTI, J.; SILVEIRA, I. d.; MIRANDA, L. d. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) eo Chuí (RS). in: Rossi-Wongtschowski, Carmen Lúcia Del Bianco and Madureira, Lauro Saint Pastous (Org.). *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil.*, EDUSP, São Paulo, p. 11–120, 2006.

- CASTRO, B. d.; MIRANDA, L. d. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. *The sea*, J. Wiley & Sons, v.11, n. 1, p. 209–251, 1998.
- CASTRO, B. d.; MIRANDA, L. d.; MIYAO, S. Y. Condições hidrográficas na plataforma continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em média escala. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, SciELO Brasil, v. 35, n. 2, p. 135–151, 1987.
- CLAERBOUT, J. F. Fundamentals of geophysical data processing. *Blackwell Scientific Publications*, Pennwell Books, Tulsa, OK, v.1, p. 266, 1979.
- COFFEEN, J. A. *Seismic exploration fundamentals: seismic techniques for finding oil*. [S.l.]: Pennwell Corp, 1986. v. 2. 361 p.
- DIAS, F. G. Internal solitary waves in the Brazilian SE continental shelf: Observations by synthetic aperture radar. *International Journal of Oceanography*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 2013.
- DUVOISIN, A. C.; MADUREIRA, L. S. P.; GREIG, A. B. *Hidroacústica*. In: *Estudo Oceanográfico: Do Instrumental ao Prático*. [S.l.]: In: *Estudo Oceanográfico: Do Instrumental ao Prático*. Editora Textos, 2011. 28 p.
- EMERY, W. Water types and water masses. *Encyclopedia of ocean sciences*, v. 6, p. 3179–3187, 2003.
- EVANS, D. L.; SIGNORINI, S. R.; MIRANDA, L. B. A note on the transport of the Brazil Current. *Journal of Physical Oceanography*, v. 13, n. 9, p. 1732–1738, 1983.
- FISCH, C.; RESENDE, M. d. L. Análise de massas d'água na bacia do Brasil. *Relatório Final apresentado ao SR2*, 1996.
- FOREL, D.; BENZ, T.; PENNINGTON, W. *Seismic Data Processing with Seismic Unix: A 2D Seismic Data Processing Primer*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005. (Course notes series). ISBN 9781560801344.

FORTIN, W. F.; HOLBROOK, W. S. Sound speed requirements for optimal imaging of seismic oceanography data. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 36, n. 24, 2009.

GABIOUX, M. *Estudo Numérico dos Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil entre 22 S e 30 S. Rio de Janeiro, 2008. p.155.* Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2008.

GADALLAH, M. R.; FISHER, R. L. *Applied seismology: A comprehensive guide to seismic theory and application.* [S.l.]: PennWell Books, 2005.

GARRISON, T. S. *Essentials of Oceanography.* 6. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2011. ISBN 9780840061553.

HATTON, L.; WORTHINGTON, M. H.; MAKIN, J. *Seismic data processing: theory and practice.* [S.l.], 1986.

HOLBROOK, W. S.; FER, I. Ocean internal wave spectra inferred from seismic reflection transects. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 32, n. 15, p. 4, 2005.

HOLBROOK, W. S.; FER, I.; SCHMITT, R. W.; LIZARRALDE, D.; KLYMAK, J. M.; HELFRICH, L. C.; KUBICHEK, R. Estimating oceanic turbulence dissipation from seismic images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 30, n. 8, p. 1767–1788, 2013.

HOLBROOK, W. S.; PÁRAMO, P.; PEARSE, S.; SCHMITT, R. W. Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 301, n. 5634, p. 821–824, 2003.

HUANG, X.; SONG, H.; BAI, Y.; CHEN, J.; LIU, B. Estimation of seawater movement based on reflectors from a seismic profile. *Acta Oceanologica Sinica*, Springer, v. 31, n. 5, p. 46–53, 2012.

IOC, S.; IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater-2010: calculation and use of thermodynamic properties.[includes corrections up to 31st october 2015]. Unesco, 2010.

- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *An introduction to geophysical exploration*. 3. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. 130 p.
- KHAN, K. A. *Geophysical Techniques for Exploration of Natural Resources*. Islamabad, Pakistan: Oil & gas Training Institute, OGDCL, 2010. 106 p.
- KORMANN, J.; COBO, P.; BIESCAS, B.; SALLARÉS, V.; PAPENBERG, C.; RECUERO, M.; CARBONELL, R. Synthetic modelling of acoustical propagation applied to seismic oceanography experiments. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 37, n. 6, p. 5, 2010.
- KRAHMANN, G.; BRANDT, P.; KLAESCHEN, D.; RESTON, T. Mid-depth internal wave energy off the Iberian Peninsula estimated from seismic reflection data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 113, n. C12, 2008.
- KRAIL, P. M. Airguns: Theory and operation of the marine seismic source. *Course notes for GEO-391. Principles of seismic data acquisition*. University of Texas at Austin, 2010.
- LAMPITT, R.; FAVALI, P.; BARNES, C.; CHURCH, M.; CRONIN, M.; HILL, K.; KANEDA, Y.; KARL, D.; KNAP, A.; MCPHADEN, M. et al. In situ sustained eulerian observatories. *Proceedings of the Ocean Observations*, v. 9, p. 27, 2010.
- LOWRIE, W. *Fundamentals of geophysics*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- MEDWIN, H.; CLAY, C. S. *Fundamentals of acoustical oceanography*. [S.l.]: Academic Press, 1997.
- MÖLLER, O.; ABE, M. P. *Introdução à Oceanografia Física*. [S.l.]: In:Estudo Oceanográficos: Do Instrumental ao Prático. Editora Textos, 2011. 72 p.
- MONCADA, J. F. M. *Estrategias del procesado y análisis espectral de datos sísmicos para el estudio de procesos dinámicos en oceanografía física*. 2015. Tese (Doutorado) — Universidade de Barcelona. Barcelona, 2015.

MOUSA, W. A.; AL-SHUHAIL, A. A. *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*. [S.l.]: V.10. Morgan & Claypool Publishers, 2011.

MUNK, W.; WUNSCH, C. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 123–161, 1979.

NANDI, P.; HOLBROOK, W. S.; PEARSE, S.; PÁRAMO, P.; SCHMITT, R. W. Seismic reflection imaging of water mass boundaries in the Norwegian Sea. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 31, n. 23, p. 4, 2004.

NORMAN, J. Dictionary of petroleum exploration, drilling & production. *Pennwell Brook: Tulsa Oklahoma*, 1991.

NORTHROP, J.; COLBORN, J. Sofar channel axial sound speed and depth in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, v. 79, n. 36, p. 5633–5641, 1974.

PADHI, A.; MALLICK, S.; FORTIN, W.; HOLBROOK, W. S.; BLACIC, T. M. 2-d ocean temperature and salinity images from pre-stack seismic waveform inversion methods: an example from the South China Sea. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press, v. 202, n. 2, p. 800–810, 2015.

PARAMO, P.; HOLBROOK, W. S. Temperature contrasts in the water column inferred from amplitude-versus-offset analysis of acoustic reflections. *Geophysical research letters*, Wiley Online Library, v. 32, n. 24, p. 4, 2005.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in oceanography*, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.

PIÈTÈ, H.; MARIÉ, L.; MARSSET, B.; THOMAS, Y.; GUTSCHER, M.-A. Seismic reflection imaging of shallow oceanographic structures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 118, n. 5, p. 2329–2344, 2013.

- PINHEIRO, L. M.; SONG, H.; RUDDICK, B.; DUBERT, J.; AMBAR, I.; MUSTAFA, K.; BEZERRA, R. Detailed 2-d imaging of the mediterranean outflow and meddies off W Iberia from multichannel seismic data. *Journal of Marine Systems*, Elsevier, v. 79, n. 1, p. 89–100, 2010.
- PORSANI, M. J.; PESTANA, R. Processamento de dados sísmicos antigos. in: Doneivan f. ferreira. *Produção de Petróleo e Gás em Campos Marginais*, Komedi, p. 17, 2009.
- QUENTEL, É. *Imagerie de la structure thermohaline dans le Golfe de Cadix: Traitement des données sismiques et d'océanographie physique de la Veine d'Eau Méditerranéenne*. Tese (Doutorado) — Université de Bretagne occidentale-Brest, 2010.
- QUENTEL, E.; CARTON, X.; GUTSCHER, M. A. et al. Structure and temporal variability of mediterranean water in hydrological and marine seismic data South of Portimao Canyon (Gulf of Cadiz), from 1999 to 2002. *International Journal of Geosciences*, Scientific Research Publishing, v. 2, n. 03, p. 185, 2011.
- RUDDICK, B. Sounding out ocean fine structure. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 301, n. 5634, p. 772–773, 2003.
- RUDDICK, B.; SONG, H.; DONG, C.; PINHEIRO, L. Water column seismic images as maps of temperature gradient. *Oceanography*, v. 22, n. 1, p. 192, 2009.
- SALLARÈS, V.; BIESCAS, B.; BUFFETT, G.; CARBONELL, R.; DAÑOBEITIA, J. J.; PELEGRÉ, J. L. Relative contribution of temperature and salinity to ocean acoustic reflectivity. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 36, n. 24, p. 6, 2009.
- SCHMITT, R. W. Double diffusion in oceanography. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 26, n. 1, p. 255–285, 1994.
- SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration seismology*. [S.l.]: Cambridge university press, 1995.

SIEDLER, G.; GRIFFIES, S. M.; GOULD, J.; CHURCH, J. A. *Ocean circulation and climate: a 21st century perspective*. [S.l.]: Academic Press, 2013. v. 103.

SILVA, A. C. d.; ARAÚJO, M.; BOURLÈS, B. Variação sazonal da estrutura de massas de água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 23, n. 2, p. 145–157, 2005.

SILVA, L. C. C. *Estudo das Massas D'água e da Circulação Geostrófica na região Sudeste da Bacia do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.

SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S. de; IKEDA, Y. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, SciELO Brasil, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.

SMILLIE, M. W. *Seismic oceanographical imaging of the ocean SE of NZ*. Tese (Doutorado) — University of Otago, 2013.

SONG, H.; RUDDICK, B.; PINHEIRO, L. M.; HUANG, X. *Seismic Oceanography: a new geophysical tool to investigate the thermohaline structure of the oceans*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2012.

SOUTELINO, R. G. *A origem da Corrente do Brasil*. 120 p. Dissertação (Mestrado) — p.130. Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

STEWART, R. H. *Introduction to physical oceanography*. [S.l.]: Texas A & M University, 2004.

SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. et al. *The Oceans: Their physics, chemistry, and general biology*. [S.l.]: Prentice-Hall New York, 1942. v. 7.

TALLEY, L. D. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. [S.l.]: Academic press, 2011.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied geophysics*. [S.l.]: Cambridge university press, 1990. v. 1.

TSUJI, T.; NOGUCHI, T.; NIINO, H.; MATSUOKA, T.; NAKAMURA, Y.; TOKUYAMA, H.; KURAMOTO, S.; BANGS, N. Two-dimensional mapping of fine structures in the Kuroshio Current using seismic reflection data. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 32, n. 14, 2005.

VSEMIRNOVA, E.; HOBBS, R.; SERRA, N.; KLAESCHEN, D.; QUENTEL, E. Estimating internal wave spectra using constrained models of the dynamic ocean. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 36, n. 24, 2009.

WOOD, W.; LINDWALL, D.; BOOK, J.; WESSON, J.; CARNIEL, S.; HOBBS, R. W. Seismic oceanography allows a new view of the ocean. *Naval Research Laboratory*, v. 1, p. 113–121, 2010.

WOOD, W. T.; HOLBROOK, S. W. W.; SEN, M. K.; STOFFA, P. L. Full waveform inversion of reflection seismic data for ocean temperature profiles. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 35, n. 4, p. 6, 2008.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; BEARMAN, G. *Seawater: its composition, properties, and behaviour*. [S.l.]: Pergamon, 1995. v. 2.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. 2. ed. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2008. v. 10. (Investigations in Geophysics, v. 10).

ZEMBA, J. C. *Structure and transport of the Brazil Current between 27° and 36° South*. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 1991.

Apêndice

A Dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP)

A.1 Resultados obtidos na solicitação

De acordo com Porsani e Pestana (2009), a PETROBRAS e diversas empresas concessionárias obtiveram cerca de 800.000 km de linhas sísmicas ao longo das décadas de 70 e 90 que, atualmente, são de domínio público e disponíveis para acesso. É possível observar as distribuições desses levantamentos na *webpage* do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) regulado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Para atender aos objetivos do presente trabalho e diante da grande quantidade de levantamentos, foram pesquisados no BDEP os dados que atendessem os seguintes quesitos:

- Idade do levantamento: com o objetivo de resgatar levantamentos mais novos, que apresentam maior tecnologia incorporada e, conseqüentemente, melhor qualidade, priorizando os levantamentos em duas dimensões e aquisição em multicanal.
- Posição em relação à costa de Santa Catarina: preferencialmente, perpendicular à linha de costa e ao longo da região oceânica de Santa Catarina.

Os dados solicitados estão descritos na tabela A.1 e dispostos na figura A.1. Foi aberto um processo de requerimento no mês de maio de 2015. O número de levantamentos foi limitado pela quantidade disponível para o nível de mestrado determinado pelo Formulário

para Solicitação de Dados Públicos para Fins Acadêmicos ou de Pesquisa ¹. O pedido foi deferido e o repasse foi finalizado na primeira quinzena de dezembro do mesmo ano.

Tabela A.1.: Linhas sísmicas solicitadas ao BDEP.

Nº	Nome do Levantamento	Tipo de levantamento	Segmento	Ano
1	0248_SANTOS_1A	2D Detail	0248-0095	1992
2	0248_SANTOS_1A	2D Detail	0248-0095	1992
3	0241_SANTOS_4A	2D Detail	0241-0523	-
4	0061_SANTOS_1A	2D Detail	0061-0102	1979
5	0111_SANTOS_1A	2D Detail	0111-0069	-
6	0111_SANTOS_1A	2D Detail	0111-0035	-
7	0111_SANTOS_1A	2D Detail	0111-0074	-
8	0048_SANTOS_14A	2D Detail	0048-0958	1978
9	0248_SANTOS_1A	2D Detail	0248-0096	1992
10	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-44X	2000
11	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-02	2000
12	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-10	2000
13	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-22	2000
14	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-03I	2000
15	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-26A	2000
16	0261_VB99_2D_BM_S	2D Detail	VB99-012	2000
17	0241_SANTOS_4A	2D Detail	0241-0555	-
18	0241_SANTOS_4A	2D Detail	0241-0530	-
19	0247_S_CARAVELA_1A	2D Detail	0247-0001	1993
20	0247_S_CARAVELA_27A	2D Detail	0247-5860	1995

Os dados que foram repassados no final da solicitação estão apresentados na tabela A.2, visto que, devido a problemas técnicos informados pela ANP na recuperação dos dados, alguns levantamentos não puderam ser repassados.

¹O acesso às informações e dados técnicos públicos para finalidade acadêmica ou de pesquisa é regulado pela Resolução da ANP n°1/2015, de 14/01/2015, publicada no Diário Oficial da União em 15/01/2015.

Tabela A.2.: Informações sobre os dados que foram repassadas.

Identificação	Mês/ano	Extensão (km)	N° de Fontes	N° de Volume da Fonte (cu.in)	Pico de energia (Hz)	N° de Canais		Distância entre canais (m)	Profundidade (m)
						Canais	Canais		
0048_SANTOS	Junho/1978	41,2	-	1450	8-62	48	50,00	50,00	150 - 500
0061_SANTOS	Janeiro/1980	156,7	8	-	8-62	48	50,00	50,00	150 - 2000
0111_SANTOS	Agosto/1981	-	-	-	-	-	-	-	100 - 100
0111_SANTOS	Agosto/1981	55,0	-	-	-	-	-	-	50 - 80
0111_SANTOS	Agosto/1981	53,4	-	-	-	-	-	-	50 - 80
0241_SANTOS	Maio/1991	26,9	36	4000	6-188	204	20,00	20,00	100 - 150
0241_SANTOS	Maio/1991	37,24	36	4000	6-188	204	20,00	20,00	100 - 150
0241_SANTOS	Maio/1991	42,7	36	4000	6-188	204	20,00	20,00	120 - 150
0247_CARAVELA	Janeiro/1993	83,80	36	4000	15-50	150	26,67	26,67	150 - 1330
0247_CARAVELA	Julho/1995	58,22	32	3000	6-188	150	26,67	26,67	160 - 650

Na Figura A.1 estão representados os dados que foram solicitados e aqueles que foram atendidos. As linhas indicam a dimensão geográfica dos levantamentos e os números acima de cada linha estão representando o ano do levantamento sísmico.

Os dados que encontram-se disponíveis para aplicação do método proposto são os apresentados na figura A.1 pelos traços em laranja.

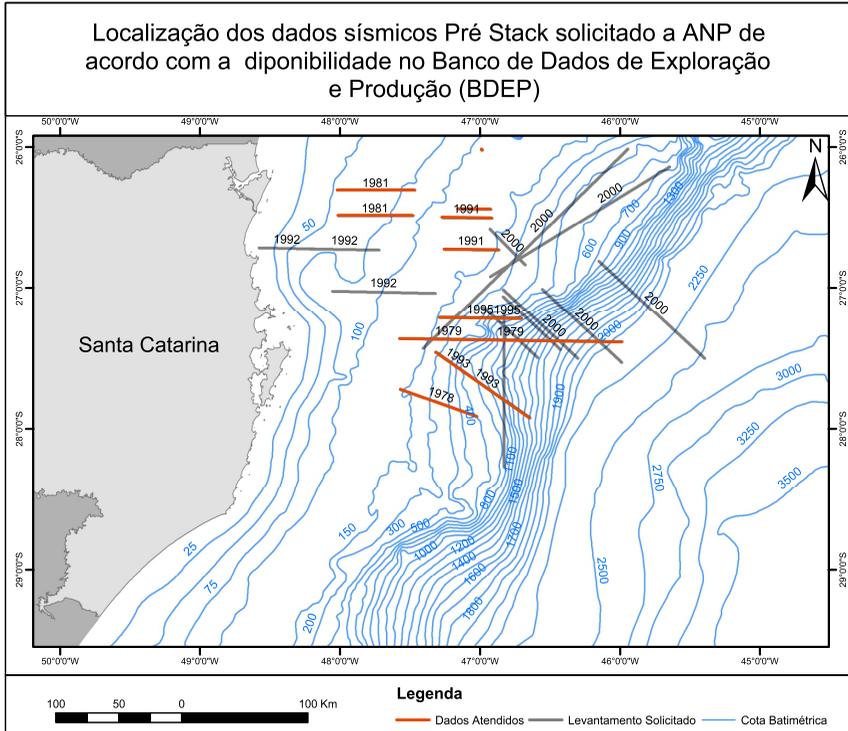


Figura A.1.: Comparação entre os dados atendidos e solicitados ao BDEP. Elaborado pelo autor.

Em relação ao dado de 0247_S_CARAVELA_1A, foi despendido grande parte do tempo para apenas converter o dado no formato de leitura do software utilizado. A extensão do dado fornecido é .SEGD, sendo necessários vários testes de conversão para alcançar o formato desejado o .SEGY e .SU. No momento,

este dado encontra-se pronto para aplicação do processamento. Contudo, não foram extraídas informações a tempo para inserí-las no presente trabalho.

A.1.1 Dados do BDEP

Todas as linhas solicitadas ao BDEP possuem mais de dez anos, que de acordo com Porsani e Pestana (2009), refletem a melhor tecnologia de aquisição disponível na época em que os levantamentos foram realizados. A característica marcante desses levantamentos é a baixa cobertura sísmica dos levantamentos, consequência do número reduzido de canais. Contudo, tal conjunto de dados não é menos importante que os atuais, visto que é possível extrair novas informações com a utilização de novas técnicas de filtragem, empilhamento e migração.

O presente dado é o mais antigo que foi solicitado, sendo adquirido em 1978. Vários aspectos do método empregado ao longo do levantamento são diferentes dos praticados hoje em dia, como por exemplo o volume total de *air guns* no arranjo, a configuração do levantamento e o registro do relatório do observador, onde antigamente era realizado de maneira manuscrita, podendo oferecer erros, enganos ou interpretações ambíguas. Tais diferenças são resultados da metodologia empregada e limitação tecnológica.

No caso desse dado da Bacia de Santos, foram observadas diversas peculiaridades e discrepâncias em relação à sua geometria e informações contidas no Registro do Observador (Figura A.2). Valores como comprimento do *streamer*, número e identificação do disparo, números e ordem dos canais apresentam-se distintos ou incompletos quando comparado às demais informações existentes no relatório e no cabeçalho do arquivo.

11A2

CIRCLE: SHOREAN NSP 207 8P RANGE 1A-207

PAGE _____ OF _____ PAGES

MARINE SEISMIC OBSERVER'S LOG

CLIENT: PETROSAS AREA: FLORIANOPOLIS SEAZUL

VESSEL: CARIBBEAN SEAS PART NO: 2018

DATE: 06 DAY 11 YR 78

SEAS: E.P.E. TRACKS: 09 TRACKS

NO. SYSTEMS: 2 SYSTEMS NEAR AND FAR: 000 AND EVEN: 000

NO. BYTES IN RECORD: 11 NO. OF BYTES IN SCAN: 15

RELAY START RECORD MODE: 5 SEC.

MINI STREAMER RECORDING: 00

LOCATION: 48

NUMBER OF TRACES: 1-48

CHANNEL NOS. (ON MAG TAPE): 1-48

TRACE (ON DISPLAY): 1-48

GROUP INTERVAL: 500 M STREAMER LENGTH: 1450 M

DISTANCE FROM CENTER GUN TO CENTER NEAR GRP: 111 M

WATER VELOCITY: 1500 M/SEC

WATER DEPTH: 25 M

RECORD GAIN MODE: 62

INITIAL: HAN OPER: EP FLOAT

POLARITY: POSITIVE

PRESSURE INCREASE ON PHONE: 2400 M METERS

STREAMER DEPTH SENSORS: 1-21

WATER BREAK SENSORS: 2-4

STREAMER POS. SENSORS: 5-21

CON DEP FINS (BIRDS): 1

INDICATE LOCATIONS ON THE STREAMER FOR THE FOLLOWING:

WATER BREAK SENSORS-Δ; STREAMER POS. SENSORS-○; CON DEP FINS (BIRDS)-†

Figura A.2.: Registro do Observador onde são descritas informações altamente relevantes sobre o tipo de fonte, receptor e também as suas posições relativas. Fonte: Parte de informação contida no relatório de cada levantamento.

As informações derivadas do registro do observador que não estavam disponíveis no catálogo de levantamentos disponíveis são apresentadas na tabela A.3.

Essas informações são essenciais para a escolha dos dados a serem processados, pois oferecem informações que até o presente momento eram desconhecidas, como por exemplo o volume do conjunto de tiros.

Para solucionar as questões observadas no presente relatório, sugere-se a realização de um pedido dos parâmetros de aquisição das linhas sísmicas antes de iniciar a solicitação.

Um pedido prévio com as identificações das linhas permitiria solicitar informações mais específicas de cada levantamento, como por exemplo a quantidade de fontes. Este pedido poderá fornecer informações também sobre a viabilidade de repasse das linhas que se pretende solicitar. Fato importante visto que cada pesquisador possui um número limitado de linhas que pode solicitar. A informação extra resultado do pedido permitirá que o pesquisador escolha outros dados, caso o solicitado não estiver disponibilizado.

Tabela A.3.: Informações extraídas no registro do observador. Os campos que apresentam traços (-) indicam que a informação não existe ou não foi encontrada e os campos com * indicam que as informações diferem do catálogo.

Levantamento	Mês/Ano	Programa	Nº de canais	Formato (convertido)	Extensão (km)	Nº de fontes	Volume do conjunto de fontes (cu. In.)	Pressão do ar (psi)
0048-0958	jun/78	Pelotas	62	seg y	57.8	-	1450	2000
0061-102	jan/80 *	Santos	62	seg y	150.6	8	-	-
0111-0350	ago/81	Santos	-	seg y	-	-	-	-
0111-0690	ago/81	Santos	-	seg y	55.0	-	-	-
0111-0740	ago/81	Santos	-	seg y	53.4	-	-	-
0247-0001	jan/93	Santos	150	seg d	83.8	36	4000	2000
0247-5860	jul/95	Santos	150	seg d	57.7	-	-	-
0241-0523	mai/91	Santos	204	seg d	22.9	36	4000	2000
0241-0530	mai/91	Santos	204	seg d	35.2	36	4000	2000
0241-0555	mai/91	santos	204	seg d	38.7	36	4000	2000

B Valores gerados na Análise de Velocidade

Tabela B.2.: Valores de velocidade da linha sísmica IAM3 para os CDPS 6000 a 10000

	CDP											
	6000		7000		8000		9000		10000			
	Tnmo(s)	Vnmo(m/s)										
1	0,28	1498,63	0,28	1499,40	0,25	1500,66	0,28	1502,06	0,28	1505,96	0,28	1505,96
2	0,75	1496,29	0,59	1500,77	0,46	1499,57	0,79	1492,24	0,79	1497,85	0,80	1497,85
3	0,93	1498,94	0,71	1499,40	0,56	1499,41	1,01	1501,59	0,89	1498,63	0,89	1498,63
4	1,06	1497,70	0,86	1500,63	0,85	1495,52	1,08	1491,62	1,14	1501,13	1,14	1501,13
5	1,16	1490,37	1,23	1499,47	0,94	1501,44	1,17	1491,46	1,21	1498,63	1,21	1498,63
6	1,34	1512,35	1,93	1510,67	1,07	1501,28	1,32	1498,94	1,30	1496,14	1,30	1496,14
7	1,43	1501,91			1,25	1502,22	1,59	1501,28	1,38	1498,94	1,38	1498,94
8	1,56	1500,97			1,77	1502,84	1,86	1509,08	1,50	1500,19	1,50	1500,19
9	1,82	1506,74					1,94	1510,32	1,62	1500,04	1,62	1500,04
10	1,89	1505,34					2,02	1510,32	1,68	1500,35	1,68	1500,35
11	2,01	1506,27					2,13	1510,01	1,85	1510,32	1,85	1510,32
12							2,01	1505,96	2,22	1500,97	2,22	1500,97
13							2,15	1508,30	2,21	1510,32	2,21	1510,32
14							2,36	1508,92				

Tabela B.3.: Valores de velocidade da linha sísmica IAM3 para os CDPS 10000 a 15000

		CDP									
		11000		12000		13000		14000		15000	
		Tnmo(s)	Vnmo(m/s)								
1		0,44	1500,35	0,27	1500,66	0,30	1500,97	0,33	1500,04	0,17	1504,56
2		0,56	1500,66	0,81	1510,64	0,44	1501,13	0,60	1499,41	0,34	1505,34
3		0,85	1511,26	0,86	1509,86	1,05	1501,28	0,85	1492,55	0,95	1512,19
4		1,01	1498,17	1,11	1504,71	1,09	1500,35	1,04	1509,54	0,97	1506,27
5		1,17	1500,97	1,26	1490,53	1,12	1499,10	1,05	1509,86	0,98	1503,31
6		1,48	1498,48	1,43	1500,82	1,56	1500,82	1,07	1510,48	1,23	1497,54
7		1,65	1499,57	1,52	1498,79	1,61	1509,23	1,18	1510,48	1,30	1503,47
8		1,88	1500,66	1,62	1500,97	1,64	1509,86	1,27	1510,79	1,38	1504,56
9		1,70	1500,82	1,66	1509,39			1,51	1500,35	1,43	1504,87
10		1,76	1502,69	1,73	1509,86			1,52	1500,19	1,65	1542,90
11		1,85	1505,02	1,91	1510,01			1,57	1509,39	1,67	1538,54
12		2,02	1509,86					1,58	1510,01	1,68	1532,93
13								1,63	1510,48	1,69	1526,38
14								1,65	1511,26	1,73	1521,08
15								1,79	1500,97	1,78	1518,59
16								1,80	1500,66	2,03	1551,01
17								1,82	1506,89		
18								1,92	1509,39		
19								2,51	1509,70		

Tabela B.4.: Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1993 para os CDPS 100 a 1200

	CDP				
	100	300	500	1000	1200
	Tnmo(s)	Tnmo(s)	Tnmo(s)	Tnmo(s)	Tnmo(s)
	Vnmo(m/s)	Vnmo(m/s)	Vnmo(m/s)	Vnmo(m/s)	Vnmo(m/s)
1	0,30	0,31	0,31	0,01	0,00
	1515,61	1498,20	1504,57	1549,58	1500,78
2	0,36	0,36	0,36	0,33	0,33
	1505,83	1502,81	1511,43	1550,24	1498,80
3	0,62	0,62	0,62	0,36	0,45
	1511,44	1514,75	1515,71	1491,55	1480,34
4	0,83	0,83	0,81	0,41	0,45
	1518,63	1519,21	1523,86	1454,62	1494,18
5	0,84	0,84	0,81	0,65	0,46
	1515,76	1515,18	1521,29	1469,78	1511,99
6	0,86	0,85	0,83	0,68	0,46
	1511,44	1511,58	1516,14	1485,61	1523,20
7	0,88	0,86	0,84	0,70	0,68
	1506,40	1506,26	1512,29	1513,97	1527,16
8	0,89	0,87	0,85	0,72	0,70
	1504,96	1502,81	1508,00	1494,18	1516,61
9	0,93	0,93	0,86	0,74	0,72
	1494,46	1500,36	1505,43	1482,31	1500,78
10	1,06	0,93	0,88	0,76	0,74
	1545,40	1496,62	1525,57	1472,42	1490,23
11	1,69	1,69	0,96	0,79	0,76
	1508,71	1507,55	1526,43	1461,21	1481,65
12			1,05	0,93	0,83
			1547,86	1510,67	1476,38
13				0,99	0,86
				1541,67	1498,14
14				1,08	1,05
				1565,41	1569,36
15				1,12	1,17
				1573,98	1605,64
16				1,21	1,26
				1624,10	1647,84
17				1,22	1,41
				1633,99	1490,89
18				1,34	1,87
				1673,56	1562,11
19				1,45	
				1481,65	
20				1,52	
				1496,16	
21				1,55	
				1482,31	
22				1,61	
				1504,74	
23				1,78	
				1842,39	

Tabela B.6.: Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1993 para os CDPS 2400 a 3300

	CDP									
	2400		2600		3000		3200		3300	
	Tnmo(s)	Vnmo(m/s)								
1	0,11	1498,80	0,42	1500,78	0,29	1498,14	0,38	1528,57	0,21	1499,46
2	0,16	1500,12	0,15	1499,46	0,44	1500,78	0,33	1571,79	0,30	1501,44
3	0,21	1510,67	0,15	1514,63	0,55	1505,40	0,37	1520,71	0,40	1473,08
4	0,22	1472,42	0,15	1486,27	0,59	1481,65	0,43	1471,61	0,43	1476,38
5	0,23	1461,21	0,15	1486,93	0,64	1502,76	0,49	1499,11	0,48	1502,10
6	0,25	1455,28	0,15	1490,23	0,70	1508,03	0,55	1501,07	0,54	1494,84
7	0,26	1456,59	0,15	1499,46	0,71	1490,23	0,61	1497,14	0,55	1486,27
8	0,31	1484,95	0,15	1497,48	0,77	1481,65	0,61	1524,64	0,63	1479,68
9	0,32	1496,82	0,15	1534,41	0,90	1496,82	0,69	1516,79	0,76	1633,33
10	0,36	1499,46	0,15	1544,96	0,88	1512,65	0,80	1628,75	0,99	1613,55
11	0,40	1558,81	0,15	1545,62	1,07	1585,19	1,10	1787,86	1,46	1974,28
12	0,41	1570,68	0,15	1541,01	1,19	1637,95	1,74	1848,75	1,54	1961,75
13	0,56	1672,24	0,16	1604,98	1,35	1678,18	1,77	1868,39	1,70	1903,72
14	0,57	1688,07	0,17	1666,31	1,51	1485,61	1,81	1858,57	1,78	1941,97
15	0,80	1868,11	0,17	1710,49	2,31	1954,50	1,85	1862,50	1,78	1924,16
16	0,82	1880,64	0,17	1719,06					1,91	1819,96
17			0,19	1891,19						
18			0,19	1868,11						
19			0,19	1878,66						

Tabela B.7.: Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 190 a 1300

	CDP			
	190	210	500	1000
	Tnmo (s)	Tnmo (s)	Tnmo (s)	Tnmo (s)
	Vnmo (m/s)	Vnmo (m/s)	Vnmo (m/s)	Vnmo (m/s)
1	0,00	0,02	0,02	0,00
	1501,44	1502,86	1500,48	1502,86
2	0,13	0,16	0,15	0,40
	1501,92	1500,00	1499,52	1500,00
3	0,45	0,56	0,54	0,50
	1498,56	1427,14	1473,62	1417,14
4	0,51	0,67	0,61	0,54
	1437,65	1455,71	1424,70	1438,57
5	0,71	0,73	0,66	0,57
	1442,93	1425,71	1440,53	1418,57
6	0,76	1,37	0,78	0,64
	1496,16	1464,29	1464,51	1557,14
7	0,87	1,45	0,85	0,73
	1481,77	1474,29	1468,35	1470,00
8	0,94	2,00	0,90	0,75
	1468,35	1497,14	1455,40	1457,14
9	1,00		0,93	0,78
	1465,95		1438,61	1440,00
10	1,11		0,97	0,82
	1476,98		1444,84	1434,29
11	1,19		0,98	0,89
	1505,28		1452,52	1462,86
12	1,29		1,00	0,93
	1537,89		1464,03	1488,57
13	1,57		1,03	1,02
	1630,46		1480,82	1512,86
14	1,74		1,09	1,08
	1685,13		1501,44	1527,14
15	1,85		1,14	1,19
	1466,91		1520,14	1555,71
16	2,06		1,24	1,27
	1493,77		1561,39	1605,71
17			1,30	1,34
			1592,57	1640,00
18			1,50	1,39
			1650,12	1602,86
19			1,73	1,44
			1477,46	1520,00
20			2,00	1,55
			1499,04	1480,00
21				1,64
				1504,29
22				1,79
				1542,86
23				1,99
				1504,29

Tabela B.8.: Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 1950 a 2500

	CDP					
	1950		2150		2250	
	Tnmo (s)	Vnmo (m/s)	Tnmo (s)	Vnmo (m/s)	Tnmo (s)	Vnmo (m/s)
1	0,00	1499,52	0,01	1500,48	0,02	1501,44
2	0,14	1501,44	0,32	1626,62	0,23	1500,96
3	0,32	1605,04	0,43	1429,02	0,30	1503,36
4	0,46	1443,88	0,47	1405,52	0,46	1454,92
5	0,46	1439,09	0,56	1422,78	0,53	1450,12
6	0,47	1421,82	0,62	1448,68	0,58	1410,31
7	0,50	1401,68	0,81	1528,78	0,87	1461,63
8	0,53	1397,84	1,02	1476,98	0,93	1481,29
9	0,58	1412,23	1,95	1518,71	0,97	1460,19
10	0,64	1440,53			1,05	1458,27
11	0,80	1515,83			1,30	1536,45
12	1,97	1515,35			1,84	1691,85

Tabela B.9.: Valores de velocidade da linha sísmica 0247_Caravela_1995 para os CDPS 2400 a 3300

	CDP				
	2400	2600	3000	3200	3300
1	Tnmo (s) 0,11 Vnmo (m/s) 1498,80	Tnmo (s) 0,42 Vnmo (m/s) 1500,78	Tnmo (s) 0,29 Vnmo (m/s) 1498,14	Tnmo (s) 0,38 Vnmo (m/s) 1528,57	Tnmo (s) 0,21 Vnmo (m/s) 1499,46
2	0,16 1500,12	0,15 1499,46	0,44 1500,78	0,33 1571,79	0,30 1501,44
3	0,21 1510,67	0,15 1514,63	0,55 1505,40	0,37 1520,71	0,40 1473,08
4	0,22 1472,42	0,15 1486,27	0,59 1481,65	0,43 1471,61	0,43 1476,38
5	0,23 1461,21	0,15 1486,93	0,64 1502,76	0,49 1499,11	0,48 1502,10
6	0,25 1455,28	0,15 1490,23	0,70 1508,03	0,55 1501,07	0,54 1494,84
7	0,26 1456,59	0,15 1499,46	0,71 1490,23	0,61 1497,14	0,55 1486,27
8	0,31 1484,95	0,15 1497,48	0,77 1481,65	0,61 1524,64	0,63 1479,68
9	0,32 1496,82	0,15 1534,41	0,90 1496,82	0,69 1516,79	0,76 1633,33
10	0,36 1499,46	0,15 1544,96	0,88 1512,65	0,80 1628,75	0,99 1613,55
11	0,40 1558,81	0,15 1545,62	1,07 1585,19	1,10 1787,86	1,46 1974,28
12	0,41 1570,68	0,15 1541,01	1,19 1637,95	1,74 1848,75	1,54 1961,75
13	0,56 1672,24	0,16 1604,98	1,35 1678,18	1,77 1868,39	1,70 1903,72
14	0,57 1688,07	0,17 1666,31	1,51 1485,61	1,81 1858,57	1,78 1941,97
15	0,80 1868,11	0,17 1710,49	2,31 1954,50	1,85 1862,50	1,78 1924,16
16	0,82 1880,64	0,17 1719,06			1,91 1819,96
17		0,19 1891,19			
18		0,19 1868,11			
19		0,19 1878,66			

C Rotina Processamento linha 93

```
#!/bin/ksh

#Script Geral de Processamento dos dados sísmicos em 2D
#Nome do Autor: Marcus Vinícius Carpes Barão
#Orientação: Berta Biescas
#Data de Revisão: 05/01/2017
#Dúvidas: ocmarcusbarao@gmail.com

#entrada 247_caravela_93.segy
sh 01_converting.sh
#saída part1.su e part2.su

sugethw < part1.su key=fldr,tracl,trafc \
> parametros_part1.txt
sugethw < part2.su key=fldr,tracl,trafc \
> parametros_part2.txt

#entrada part1.su e part2.su
sh 02_geometry.sh
#saída cara1.su e cara2.su

cat cara1.su cara2.su | suwind tmax=4 > data.su

#Para vizualizar a cobertura
```

```
sukeycount < data.su key=cdp \  
> covarage_caravela.txt  
  
susort < data.su cdp offset | sukeycount \  
key=cdp > count_cdp.txt  
  
suwind < data.su key=fldr min=7 max=500 > cara_DW_pt1.su  
suwind < data.su key=fldr min=501 max=1000 > cara_DW_pt2.su  
suwind < data.su key=fldr min=1001 max=1500 > cara_DW_pt3.su  
suwind < data.su key=fldr min=1501 max=2168 > cara_DW_pt4.su  
  
sh 02_DW_caravela.sh cara_DW_pt1.su  
sh 02_DW_caravela.sh cara_DW_pt2.su  
sh 02_DW_caravela.sh cara_DW_pt3.su  
sh 02_DW_caravela.sh cara_DW_pt4.su  
  
cat DW_cara_DW_pt1.su DW_cara_DW_pt2.su DW_cara_DW_pt3.su \  
DW_cara_DW_pt4.su > cara_total.su  
  
suwind < cara_total.su key=cdp min=134 max=2259> datax_cut.su  
suwind < datax_cut.su tmax=2 > dataxy_cut.su  
susort < cara_total.su > data_sort.su cdp offset  
  
sh velan3mc.sh dataxy_cut.su  
#saída=vpick.data  
  
sunmo < data_sort.su > data_nmo.su par=vpick.data  
suwind < data_nmo.su key=offset min=3500 max=4214 | \  
sustack > data_stack_test1.su key=cdp normpow=1.0  
suwind < data_stack_test1.su key=cdp min=150 max=150 | \  
suxwignb title="Empilhamento do CDP 150 " &  
  
#Apagando os refletores que represetam o fundo  
sumute < data_stack_test1.su key=tracl \  
xmute=137.086,185.119,222.477,323.879,510.671,\
```

```
697.464,756.17,873.583,942.963,1321.88,1455.31,\
1695.47,1972.99,2399.94,2933.64,3515.36,4443.99,\
4454.66
```

```
tmute=0.816754,0.702618,0.758115,0.734031,0.715183,\
0.694241,0.700524,0.677487,0.685864,0.655497,0.631414,\
0.519372,0.405236,0.336126,0.295288,0.26911,0.263874,\
0.263874 mode=1 > mute_stack.su
```

```
suwind < mute_stack.su key=cdp min=580 max=4000 | \  
suwind tmin=0.24 tmax=0.85 | suttoz t=0.0,1.0\  
v=1510.0,1526.0 | suflip flip=2 | \  
supsimage perc=95 title="Caravela water column - 95" \  
label1="Depth [m]" label2="tracos" width=16.0 height=8.0\  
labelfont=Palatino-Roman \  
titlefont=Palatino-Roman > water_layer_muted_3.eps
```

```
exit
```


D Guia para aplicação da Oceanografia Sísmica em dados da indústria do petróleo

Sumário

D.1	Introdução	213
D.2	Definições	214
D.3	Extração de informações	215
D.4	Conversão dos dados	216
D.5	Inserção da geometria	217
D.6	Edição	221
D.7	Filtro	222
D.8	Análise de velocidade	223
D.9	Correção do sobretempo	224
D.10	Empilhamento	225
D.11	Conversão para profundidade	226
D.12	Remoção do Fundo	226
D.13	Finalização	228

D.1 Introdução

O processamento sísmico é uma etapa importante na Oceanografia sísmica, pois são nessas etapas que os eventos que causam reflexão na coluna d'água são evidenciados. O presente documento tem como objetivo de oferecer um entendimento

D.2 Definições

Para começar o processamento, é necessário definir alguns conceitos e termos utilizados que serão aplicados ao longo desse documento:

Sísmica: Apesar do objetivo ser o processamento de pulsos acústicos no ambiente marinho, o termo processamento sísmico pode causar estranheza e pode soar errôneo algumas vezes. Contudo, foi assumido a terminologia utilizada pelo OS.

Frente de onda plana: Importante consideração para o processamento sísmico é que a forma da frente de onda é plana devido a grande distância entre a fonte e o receptor. Essa consideração tem influência sobre as equações utilizadas ao longo de todo o processamento.

Canal: Unidade do levantamento sísmico multicanal, é formado por um conjunto de hidrofones que podem variar de acordo com o levantamento.

Cabeçalho: Parte do dado sísmico que possui informação a respeito da sua identificação no levantamento. As informações são organizadas em chaves de acordo com a informação, como por exemplo:

Tabela D.1.: Descrições de parte das chaves que compõem o cabeçalho do traço sísmico.

Chave	informação
fldr	Número de registro de campo
tracl	Número de sequência do traço dentro da linha
tracr	Número de sequência do traço dentro da bobina
trafc	Número de sequência do traço dentro do registro de campo
ns	Número de amostras
dt	Taxa de amostragem (microsegundos)

Offset: De maneira geral, pode ser descrito como a distância horizontal relativa entre a fonte e cada conjunto de receptores.

Conjuntos/ Arranjos: Maneira como os traços estão organizados, podem estar organizados de acordo com o ponto médio comum (CMP), disparos comuns, receptores comuns ou *offsets* comuns.

D.3 Extração de informações

O processamento inicia-se com a extração das informações no registro do observador e no próprio dado. No registro do observador, são obtidas as informações essenciais para a converter e inserir a geometria como:

- Formato do dado sísmico;
- Distância entre os disparos;
- Distância entre os canais;
- *Offset* mínimo e;
- Quantidade de canais.

Neste relatório também é possível retirar as informações sobre as características da fonte e receptores:

- Data do levantamento;
- Quantidade de fontes;
- Disparos e receptores falhos;
- Volume total do conjunto de fontes e;
- Quantidade de hidrofones por canal.

Considerando as informações contidas no cabeçalho dos dados, é necessário converter para ter acesso a informação.

D.4 Conversão dos dados

É necessário passar os dados para o formato com o qual o *software* trabalha. Geralmente é possível encontrar os dados no formato .SEGY ou .SEGD. O formato de trabalho do Seismic Unix é o .SU.

```
segypread tape=data.segy verbose=1 endian=1 |  
segyclean > data.su
```

A partir desse momento é também possível extrair as informações do cabeçalho do dado.

Informações presentes nos dados

Após a conversão, podemos extrair algumas informações preliminares sobre o levantamento como:

- Quantidade de disparos e;
- Quantidade de traços.

Até o presente momento, ao abrir os dados sísmicos não possuímos nenhuma informação sobre as coordenadas espaciais do levantamento. Na Figura D.1 são apresentados as informações necessárias para inserir a geometria.

```
surange < data .su
```

D.5 Inserção da geometria

Etapa em que as informações do levantamento são incorporadas em cada traço.

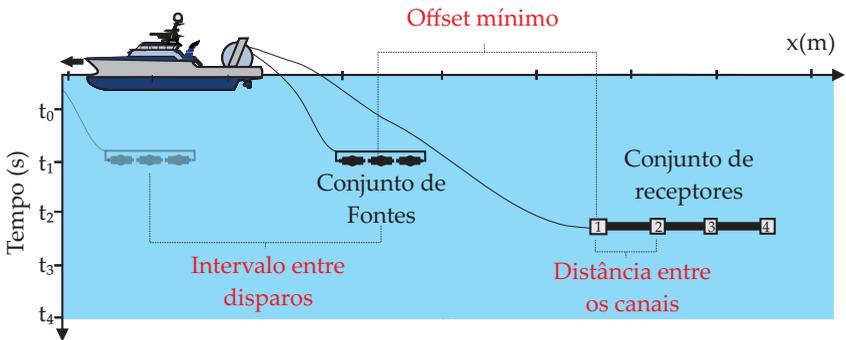


Figura D.1.: Informações necessárias para inserir a geometria.

Informações presentes no Registro do Observador

Todo levantamento possui um documento onde são registradas as informações de aquisição (Figura D.2), desde volume do conjunto de fontes até o estado do mar durante a aquisição.

- j =número de elementos dentro do grupo

O calculo do CDP é realizado com base na Equação (D.1) e implementado por meio do comando *SUCHW*

$$CDP = \frac{(Sx + Gx)}{2}. \quad (D.1)$$

Tal equação é calculada no *seismic unix* por meio do preenchimento dos parâmetros da Equação (D.2)

$$val(key1) = \frac{a + b * val(key2) + c * val(key3)}{d}, \quad (D.2)$$

no qual $val(key1)$ é o CDP, $val(key2)$ é sx e $val(key3)$ é gx . Assim, o comando para inserir os valores de CDP para cada traço é:

```
suchw < data_sx_gx.su key1=cdp a=0 b=1 key2=sh \
e=1 c=1 key3=gx f=1 d=2 > data_geometria.su
```

Ao final dessa etapa todos os traços possuem coordenadas espaciais que permitirão agrupá-los em CDPs.

O método encontrado para verificar se a geometria foi inserida corretamente foi através da comparação entre a cobertura máxima (*Fold*) e a quantidade de traços por CDP. Nessa comparação os dois valores têm de ser iguais, pois exprimem a quantidade máxima de traços que um mesmo ponto vai ter.

A cobertura máxima pode ser obtida por

$$N_t = \frac{N_c \Delta_c}{2\Delta_d}, \quad (D.3)$$

no qual Δ_c e Δ_d são as distâncias entre os canais e os disparos, respectivamente, e N_c é o número de canais utilizado no levantamento.

A quantidade de traços por CDP é obtida por:

```
susort < data.su cdp offset | sukeycount \
key=cdp > count_cdp.txt
```

A saída desse comando é um arquivo de texto com duas colunas que contém, de maneira crescente, a quantidade de traços que cada CDP possui. Percebe-se que a quantidade de traços começa com 1, cresce, atinge um máximo "X" na maior parte do levantamento e decai novamente. Tal comportamento pode ser ilustrado na Figura D.3.



Figura D.3.: Representação da quantidade de traços de acordo com os CDPs.

Caso os valores de N_t forem diferentes de X ¹, é necessário averiguar os parâmetros inseridos na geometria.

Algumas vezes, a geometria pode não estar sendo inserida corretamente devido à falta de alguns traços. Dessa forma, é necessário averiguar a ordem de todos os traços e disparos pelo comando:

```
sugethw < data.su key=keyword1,keyword2 | more
```

O comando *sugethw* nos mostra os valores de cabeçalho para todos os traços do dado *data.su*. As chaves *keyword1* e *keyword2* são os códigos do cabeçalho que deseja-se imprimir na tela. É possível imprimir quantas chaves quiser. Contudo, será muita informação para observar ao mesmo tempo. São sugeridos as chaves: *disparo* (*fldr*); sequência do traço dentro da linha (*tracr*); sequência do traço

¹valor de máxima cobertura na Figura D.3

dentro da bobina (*tracr*) e; sequência do traço no campo (*tracf*).

D.6 Edição

Etapa em que verifica-se a qualidade do dado. Os dados de campo podem conter registros ruins e dados falhos devido ao mau funcionamento momentâneo ou permanente dos hidrofones. No *software* de processamento é possível visualizar esses traços e realizar a edição de acordo com cada efeito observado (Figura D.4).

Para visualizarmos os traços utiliza-se:

```
suxwigb < data_geometria.su &
```

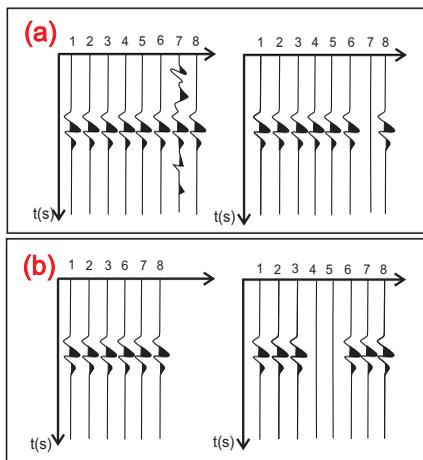


Figura D.4.: Edição dos traços de acordo com o registro ruidoso (a) e a inserção de traços para ocupar o espaço dos faltantes (b).

Para retirar os traços ruidosos (Figura D.4 a) pode ser utilizado o seguinte comando:

```
sukill < data_geometria.su key=tracl &
```

Todos os traços ruins são silenciados e assim, excluídos do

Para inserir traços quando estão faltantes (Figura D.4 b) pode ser utilizado o seguinte comando:

```
sunull nt=NT ntr=NTR < data.su > data_tracos.su \  
min=MIN_TRACE count=COUNT
```

As linhas faltantes são completadas pela inserção de traços nulos com a mesma configuração de amostragem (tempo [NT] e intervalo [NTR]) das reais. Depois que foram inseridos os traços faltantes, a geometria pode ser inserida corretamente.

Nesta parte do processamento é conveniente reduzir o tamanho dos dados. Como objetiva-se processar somente a coluna d'água, não necessita-se dos dados abaixo do assoalho oceânico. Dessa forma, pode ser utilizado o comando:

```
suwind < data_geometria.su tmax=x > data_agua.su
```

no qual *tmax* recebe o valor em segundos do tempo em que observamos o assoalho marinho.

D.7 Filtro

Para aplicar o filtro necessitamos visualizar o espectro de amplitude (*suspecfx*) de vários traços. Desta maneira, notam-se quais frequências estão presentes no registro.

```
suwind < data_agua.su key=tracl min=4050 \  
max=4060 | suspecfx | supsggraph style=normal \  
> espec_s_filt.eps
```

Geralmente o registro não possui apenas as frequências emitidas pela fonte, mas também os ruídos que estão associados ao levantamento. Os ruídos podem ter diversas origens, como por exemplo as ondas na superfície e a própria embarcação.

Assim, aplica-se um filtro para remover as frequências indesejadas e que não foram emitidas pela fonte.

```
sufilter < data_agua.su f=5,10,85,90> data_filt.su
```

Para recuperar a amplitude que é perdida ao longo da propagação (divergência esférica), é necessário aplicar um ganho em função do tempo. Essa correção pode ser aplicada pelo comando:

```
sugain < data_filt.su tpow=2 > data_gain.su
```

onde utiliza-se um índice (tpow=2) para compensar a perda de amplitude, visto que a perda é na proporção de $1/r^2$.

D.8 Análise de velocidade

Para iniciar esta etapa é necessário organizar os traços em conjunto de CDP através do comando:

```
susort < data_gain.su cdp offset > data_sort.su
```

A análise de velocidade é realizada através do *script* cedido pelo professor Dr. Renato Prado da USP.

```
sh velan3mc.sh data_sort.su
```

Como entrada após esse comando, é necessário inserir a velocidade inicial de análise, intervalo entre as velocidades para compor o painel e a quantidade de CDPs que serão analisados.

As velocidades são escolhidas manualmente (Figura D.5). Para tal, basta posicionar o cursor sobre a região que possui o valor de *semblance* alto e pressionar a tecla **s**. Após o término da escolha, pressionar a tecla **q** para finalizar a análise do atual CDP. O mesmo processo deve ser realizado nos próximos CDPs. No final desta etapa, é gerado um arquivo de texto com todas as velocidades e tempos selecionados.

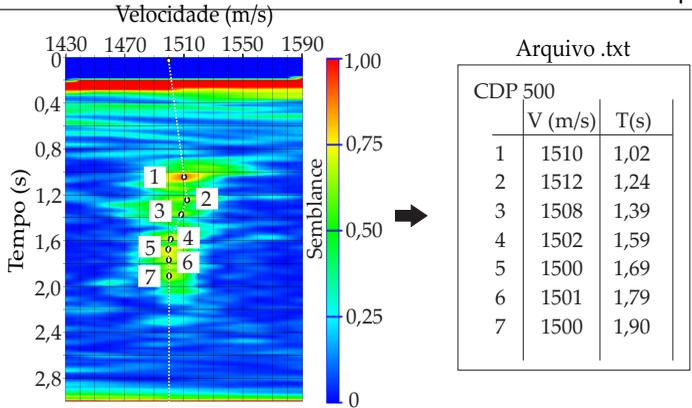


Figura D.5.: Análise de velocidade.

D.9 Correção do sobretempo

O arquivo de velocidade e tempo gerado na etapa anterior é utilizado na correção do sobretempo do conjunto de CMP. Baseado na premissa que todos os traços representam um mesmo ponto (local no terreno), todos os eventos reflexivos têm de possuir o mesmo tempo, independente do traço analisado. O processo de correção NMO remove o efeito do sobretempo na propagação dos pulsos refletidos (Figura D.6).

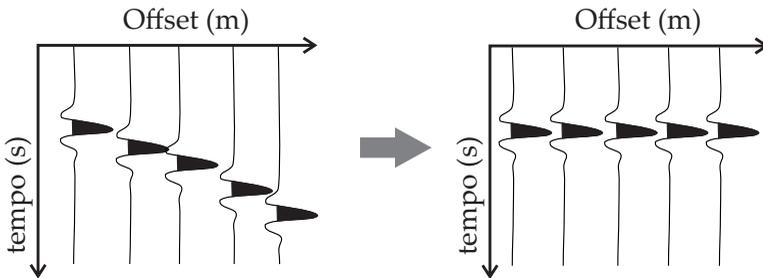


Figura D.6.: Correção NMO.

O comando para correção do sobretempo utilizando o arquivo de velocidade e tempo é:

```
sunmo < data_sort.su par=arquivo.txt > data_nmo.su
```

D.10 Empilhamento

Com o objetivo de aumentar a relação sinal/ruído através da soma dos traços de um mesmo CMP é aplicado o empilhamento. Essa etapa possibilita a redução do ruído e melhora qualidade no sinal devido à combinação destrutiva e construtiva ao longo da soma dos traços (Figura D.7).

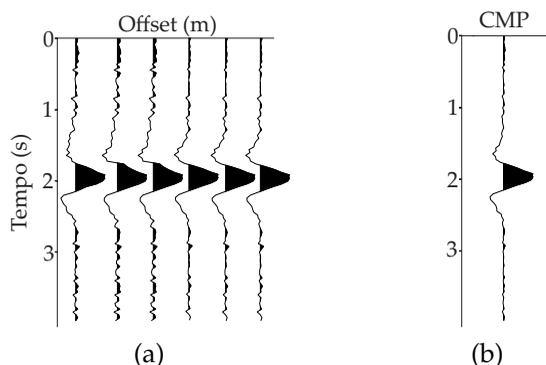


Figura D.7.: Empilhamento dos traços de um mesmo CDP.

Foi observado que a não utilização de todos os traços para o empilhamento pode melhorar o sinal na coluna d'água. Essa afirmação pode ser um pouco estranha, mas o fato de não utilizarmos os primeiros traços (os que possuem os *offsets* menores) aumenta a visualização dos eventos na coluna d'água. Os primeiros traços ainda guardam um pouco da energia da onda direta, evento que possui amplitude muito superior quando comparado com os eventos na água. Assim, ao reduzir a visualização da onda direta, aumenta a identificação dos refletores na coluna d'água.

O comando para aplicar essa etapa pode ser dado por:

```
suwind< data_nmo.su key=offset min=280 max=4214 |
```

```
sustack > data_stack.su key=cdp normpow=1.0
```

Considerando um *offset* mínimo de 214,00 m e distância entre CDPs de 13,33m, os *offsets* escolhidos aqui geralmente são o mínimo e máximo. Seguindo a afirmação acima, foram ignorados os primeiros cinco traços.

D.11 Conversão para profundidade

Para converter a dimensão de tempo de propagação para profundidade, foi realizada a conversão de acordo com a Equação (D.4).

$$d_z = v_{\min} * \frac{dt}{2}, \quad (D.4)$$

Para a determinação das profundidades dos refletores, foi utilizada a conversão do eixo do tempo para profundidade no qual **t** e **v** especificam as velocidades em função do tempo. Esses dados são escolhidos com base na etapa de análise de velocidade.

Quando não especificadas, a interpolação linear e extrapolação constante são usadas para determinar as velocidades intervalares. A conversão é realizada pelo seguinte comando:

```
suttoz < data_stack.su t=0.0,1.02,1.24,1.39,1.59,\  
1.69,1.79,1.90 v=1510.0,1510.0,1512.0,1508.0,\  
1502.0,1500.0,1501.0,1500.0 > data_convert.su
```

D.12 Remoção do Fundo

Foi observado que a remoção desta parte dos dados promove a melhoria da visualização dos eventos na coluna d'água. A remoção ocorre de maneira parecida daquela aplicada na etapa de análise da velocidade, isto é a escolha manual por meio do posicionamento do cursor.

Primeiramente, é gerado uma imagem para coletar as posições em distância (x) e em profundidade (t).

```
suximage < data_convert.su perc=95 &
```

Em seguida, com o cursor posicionado no assoalho oceânico, as coordenadas (distância e profundidade) são apresentadas no terminal de comando teclando s.

```
sumute < data_stack.su key=tracl \
xmute=137.086,185.119,222.477,323.879,510.671,\
697.464,756.17,873.583,942.963,1321.88,1455.31,\
1695.47,1972.99,2399.94,2933.64,3515.36,4443.99,\
4454.66
tmute=0.816754,0.702618,0.758115,\
0.734031,0.715183,0.694241,0.700524,0.677487,\
0.685864,0.655497,0.631414,0.519372,0.405236,\
0.336126,0.295288,0.26911,0.263874,0.263874 \
mode=1 > mute_stack.su
```

A imagem gerada por esse processamento pode ser observada na Figura D.8

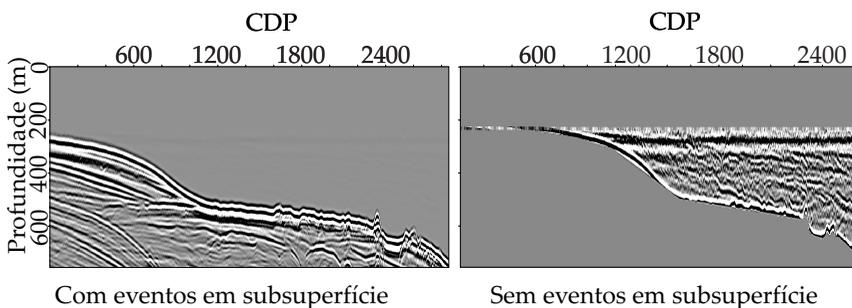


Figura D.8.: Remoção do Fundo.

D.13 Finalização

O presente documento oferece um apoio inicial a quem busca conhecimento para o processamento sísmico com foco na Oceanografia Sísmica. As etapas e comandos foram abordados de maneira superficial. Dessa forma, é sugerido a busca de mais conhecimento através dos tutoriais e materiais sobre o emprego desse *software* e fundamentos sobre o processamento sísmico. Um ponto muito importante para se levar em consideração sobre o presente *software* é a saída gráfica. Apesar de ser robusto no processamento, os recursos gráficos são limitados e/ou pouco intuitivos quando comparados com demais *software* de processamento. Ao longo de todo o trabalho foi necessária a utilização do *software Corel Draw* para edição das fontes.

