

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Marina Martins Bousfield

**Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e
estimativa de pulso**

Florianópolis

2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

Marina Martins Bousfield

**DECONVOLUÇÃO DE TRAÇOS SÍSMICOS: ANÁLISE,
APLICAÇÃO E ESTIMATIVA DE PULSO**

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

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Julio Apolinário
Cordioli

Co-orientador:

Prof. Dr. Eng. Guillaume François
Gilbert Barrault

Florianópolis

2017

Bousfield, Marina Martins

Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e estimativa de pulso. / Marina Martins Bousfield ; orientador, Julio Apolinário Cordioli ; co-orientador, Guillaume François Gilbert Barrault. - Florianópolis, SC, 2017.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Sísmica marinha. 2. processamento sísmico. 3. refletividade do substrato. I. Cordioli, Julio Apolinário. II. Barrault, Guillaume François Gilbert. III. Universidade Federal de Santa Catarina. IV. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. V. Deconvolução de traços sísmicos: análise, aplicação e estimativa de pulso.

Marina Martins Bousfield

**DECONVOLUÇÃO DE TRAÇOS SÍSMICOS: ANÁLISE,
APLICAÇÃO E ESTIMATIVA DE PULSO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 7 de abril de 2017.

Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Julio Apolinário Cordioli, Dr. Eng.
Orientador

Guillaume François Gilbert Barrault,
Dr. Eng.
Co-orientador

Andrey Ricardo da Silva, Dr. Eng.

Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.

William D'Andrea Fonseca, Dr. Eng.

Agradecimentos

Aos meus pais, Maria do Carmo e Julio, por sempre estarem ao meu lado, me apoiando e sendo a base para todo o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Julio, pelas oportunidades e atenção ao desenvolvimento em uma área que tanto me interessa.

Ao meu coorientador, Prof. Guillaume, por me auxiliar em etapas importantes do desenvolvimento da pesquisa.

Ao João Paulo, por ser meu braço direito em todas as etapas do trabalho sempre buscando formas de me auxiliar.

Aos amigos e familiares pelo apoio, companheirismo e compreensão quando o tempo foi escasso.

Ao Mathias por ser tão compreensivo e leal a mim, me apoiando em todas as etapas do trabalho.

Aos colegas da Wavetech pela ajuda na descoberta de novas ferramentas de trabalho, incluindo o café.

Aos colegas do Grupo de Acústica Submarina pelas discussões, auxílios e descontrações.

À Wavetech pela experiência adquirida em meio empresarial e por todo apoio durante o desenvolvimento da dissertação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e ao Laboratório de Vibrações e Acústica pelo apoio e excelente formação.

À Agência Nacional do Petróleo pelo auxílio financeiro.

DAS UTOPIAS

*Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A presença distante das estrelas!*

Mário Quintana



Resumo

A sísmica é um dos procedimentos mais utilizados para a investigação da subsuperfície marinha. Uma etapa crucial no processamento de dados sísmicos é a deconvolução, que permite melhorar a qualidade da imagem sísmica. Essa operação tem fontes conhecidas de erros como a falta de conhecimento da forma do pulso e a escolha do algoritmo. Os algoritmos de deconvolução dividem-se em dois grupos: determinísticos, quando o pulso é conhecido e probabilísticos, quando não. Avaliou-se diferentes técnicas de deconvolução, sendo três determinísticas – a com regularização, a simultânea e a iterativa – e uma probabilística, a deconvolução em impulsos. As técnicas mostram limitações dependendo das características do pulso e do ruído. Com o conhecimento do pulso e aplicação de técnicas determinísticas os resultados se mostram melhores, sendo a técnica probabilística empregada bastante instável. Com isso, é proposto um método para estimar a forma do pulso utilizando o próprio traço, com intuito de aplicar métodos determinísticos quando o sinal não é conhecido. A forma de onda do pulso é representada como uma combinação de funções simples na qual aplica-se um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo LMS para que haja a reconstrução do sinal original, sem distorções. Aplica-se o método associado às técnicas de deconvolução analisadas. Os resultados exibem erros até 30% menores e se mostram mais estáveis que a técnica probabilística. Além disso, estimativa de pulso e deconvolução são aplicados a dados reais, trazendo melhores resultados para a imagem sísmica.

Palavras-chave: Sísmica marinha, processamento sísmico, refletividade do substrato.

Abstract

Concerning the investigation of ocean subsurface, seismic is still among the most useful techniques. A crucial stage in seismic data processing is the deconvolution, which allows improving the seismic image. This operation has known sources of errors caused mainly by the absence of a priori knowledge of the seismic pulse shape and the choice of the algorithm used. The deconvolution algorithms are categorized into two groups: deterministic, when the pulse is known and probabilistic, when not. An evaluation of different deconvolution techniques were made, including three deterministic – the one with regularization, the simultaneous and the iterative – and a probabilistic one, the spiking deconvolution. The techniques showed limitations depending on the characteristics of the pulse and the noise. In general, if the excitation signal is known and the deterministic techniques are applied, better results are obtained, being the probabilistic technique employed quite unstable. Thereby, a method is proposed to estimate the shape of the signal using the own trace, in order to use deterministic methods when the pulse is unknown. The pulse waveform is represented as a combination of simple functions, in which an adaptive filter fed by a LMS is applied to reconstruct the waveform, without distortion. The method is used with the analyzed deconvolution techniques. The results show 30% lower errors and the algorithm is more stable than the probabilistic one. Besides that, pulse estimation and deconvolution are used to analyze real data, bringing better results to the seismic image.

Keywords: Marine seismic, seismic processing, substrate reflectivity.

Sumário

Lista de figuras.....	22
Lista de tabelas.....	23
Lista de quadros	25
Nomenclatura	27
1 Introdução	35
1.1 Contextualização do trabalho	35
1.2 Objetivos	40
1.2.1 Objetivos específicos	40
1.3 Justificativas	40
1.3.1 Aplicações	41
1.4 Organização do trabalho.....	44
2 Sísmica marinha	47
2.1 Propagação acústica em ambiente marinho	48
2.1.1 Ondas sonoras.....	48
2.1.2 Propagação acústica na coluna d'água	49
2.1.3 Decaimento de amplitudes dos sinais	50
2.1.4 Interação com o fundo	52
2.1.5 Propagação em subsuperfície estratificada	57
2.1.6 Sonar.....	59
2.2 Métodos sísmicos	61
2.2.1 Reflexões	64
2.2.2 Fonte sísmica	65
2.2.2.1 Tipos de pulso sonoro	69

2.2.3	Arranjos de hidrofones rebocados	72
2.2.4	Arranjos bidimensionais e tridimensionais	74
2.3	Processamento de dados sísmicos	76
2.3.1	Exibição e edição de traços sísmicos	76
2.3.2	Análise de espectro e filtragem dos dados	81
2.3.3	Deconvolução	84
2.3.4	Empilhamento.....	85
2.3.5	Migração	87
3	Deconvolução	89
3.1	Modelo convolucional.....	90
3.2	Deconvolução via divisão espectral	93
3.3	Deconvolução com fator de amortecimento	100
3.4	Deconvolução simultânea no domínio do tempo	109
3.5	Deconvolução iterativa no domínio do tempo.....	126
3.6	Deconvolução em impulsos	139
3.7	Considerações sobre os métodos	145
4	Recuperação de pulso	151
4.1	Decomposição em funções simples	153
4.2	Algoritmo adaptativo	156
4.3	Validação do método	160
4.4	Deconvoluções utilizando o pulso estimado.....	168
4.5	Considerações parciais	175
5	Aplicação a dados reais	179
5.1	Informações sobre os dados	179
5.2	Aplicação das técnicas	181
5.3	Conclusões preliminares.....	196
6	Considerações finais	199
6.1	Conclusões sumarizadas e recomendações	199
6.2	Trabalhos futuros	203

Referências Bibliográficas	205
Apêndice	219
A Informações do <i>Header</i>	221
B Fator de coerência entre amplitudes	225

Lista de Figuras

1.1	Profundidade de penetração de ondas.....	37
1.2	Configuração de sistema de medição sísmica.....	39
1.3	Reconstrução do <i>Grace Dieu</i>	43
2.1	Perfis típicos de algumas regiões. Adaptado de Urlick [1].....	50
2.2	Tipos de propagação sonora em ambiente ma- rinho.	51
2.3	Diagrama de espalhamento sonoro	53
2.4	Efeitos da interação do som com o fundo	55
2.5	Coefficiente de reflexão para três tipos de subs- trato.	56
2.6	Lentidão em meio estratificado	58
2.7	Sonares ativo e passivo	61
2.8	Tipos de geometrias de arranjos de transdutores.	62
2.9	Densidade de aquisição de dados sísmicos	63
2.10	Organização dos traços em conjuntos.	63
2.11	Diagrama de raios de reflexão sísmica	65
2.12	Exemplo de pulso de fase mínima.	70
2.13	Exemplo de pulso de fase zero.	71
2.14	Exemplo de pulso de fase mista.	72
2.15	Desvio lateral de arranjo rebocado.....	75
2.16	Análise da geometria dos traços sísmicos.....	77
2.17	Formas de exibição de traços	78

2.18	Transposição para demultiplexação	79
2.19	Espectros de magnitude	83
2.20	Aplicação de filtro passa banda	83
2.21	Seção sem e com a aplicação da deconvolução....	84
2.22	Triangulação dos tempos de propagação	86
2.23	Efeito <i>moveout</i> e correção NMO	86
2.24	Reflexão em refletores horizontais e inclinados ..	88
3.1	Entrada e saída de um sistema	90
3.2	Modelo convolucional	91
3.3	Pulso cosseno amortecido.....	94
3.4	Pulso de Ricker	95
3.5	Pulso do tipo <i>chirp</i>	95
3.6	Ambiente e refletividade simulados.....	96
3.7	Ruído ambiente	97
3.8	Traços sísmicos ruidosos simulados.....	97
3.9	Resultados da deconvolução clássica.....	98
3.10	Espectro dos resultados da deconvolução clássica	100
3.11	Espectros de magnitude dos sinais de entrada com e sem amortecimento	102
3.12	Δ_h e amortecimentos para caso (1).....	103
3.13	Deconvolução com fator de amortecimento - caso (1)	104
3.14	Δ_h e amortecimentos para caso (2).....	105
3.15	Deconvolução com fator de amortecimento - caso (2)	106
3.16	Δ_h e amortecimentos para caso (3).....	107
3.17	Deconvolução com fator de amortecimento - caso (3)	108
3.18	Erros de refletividades e traços- caso (1).....	113
3.19	Detecção de μ - caso (1).....	114
3.20	Deconvolução simultânea no tempo - caso (1) ...	115
3.21	Erros de refletividades e traços- caso (2).....	116

3.22	Detecção de μ - caso (2).....	117
3.23	Deconvolução simultânea no tempo - caso (2)	118
3.24	Erro entre refletividades e traços- caso (3).....	119
3.25	CrITÉrios de escolha μ - caso (3)	119
3.26	Deconvolução simultânea no tempo - caso (3)	120
3.27	Erros de refletividade e traço estimados para 20 situações com ruído com $\sigma = 0,3$	122
3.28	CrITÉrios de seleção de μ para 20 situações com ruído com $\sigma = 0,3$	122
3.29	Valor de μ selecionados com ruído variável.....	123
3.30	Erro entre refletividades e traços para 20 situa- ções com ruído variável	124
3.31	CrITÉrios de seleção de μ para 20 situações com ruído variável	125
3.32	Valores de μ selecionados com ruído variável	126
3.33	Δ_h e Δ_y para deconvolução iterativa - caso (1)	129
3.34	Alteração Δ_y e refletividade para deconvolução iterativa - caso (1).....	130
3.35	R_{xy} para cada iteração - caso (1).....	130
3.36	Δ_h e Δ_y para deconvolução iterativa - caso (2)	131
3.37	Alteração Δ_y e refletividade para deconvolução iterativa - caso (2).....	132
3.38	R_{xy} para cada iteração - caso (2).....	132
3.39	Destaque nas reflexões.....	133
3.40	Δ_h e Δ_y para Deconvolução iterativa - caso (3)....	134
3.41	Alteração Δ_y e refletividade para Deconvolução iterativa - caso (3).....	134
3.42	R_{xy} para cada iteração - caso (3).....	135
3.43	Alteração Δ_y e refletividade com ruído maior - caso (1)	137
3.44	Alteração Δ_y e refletividade com ruído maior - caso (2)	137

3.45	Alteração Δ_y e refletividade com ruído maior - caso (2)	137
3.46	Autocorrelação dos pulsos	138
3.47	Espectros de amplitude dos pulsos e dos traços. .	142
3.48	Autocorrelações dos pulsos e dos traços.	143
3.49	Refletividades via deconvolução por impulsos. . .	145
4.1	Pulso de fase mínima decomposto em funções simples.	155
4.2	Estimativa de um pulso de <i>airgun</i> através de funções base.	156
4.3	Diagrama de blocos do algoritmo adaptativo.	157
4.4	Esquema de obtenção de erro e coeficientes adaptativos com as iterações.	158
4.5	Validação algoritmo com ruído branco.....	161
4.6	Convergência do algoritmo com ruído branco....	161
4.7	Validação algoritmo com ruído de baixa frequência.	162
4.8	Convergência do algoritmo com ruído branco....	163
4.9	Validação algoritmo com ruído real.	164
4.10	Convergência do algoritmo com ruído real.....	164
4.11	Conjunto de pulsos originais simulados.	166
4.12	Conjunto de pulsos ruidosos simulados.	166
4.13	Conjunto de pulsos estimados através do algoritmo proposto.	166
4.14	Convergência do algoritmo ao pulso-a-pulso.	167
4.15	Pulso real de <i>airgun</i> e traço sísmico simulado.	168
4.16	Comparação entre os pulsos <i>airgun</i> original, de referência e estimado.....	169
4.17	Convergência do método com pulso real de <i>airgun</i>	170
4.18	Comparação de deconvolução com amortecimento entre pulso estimado e onda direta.	171

4.19	Comparação de deconvolução simultânea entre pulso estimado e onda direta.	172
4.20	Comparação de deconvolução iterativa entre pulso estimado e onda direta.	173
4.21	Aplicação a deconvolução em impulsos ao traço sísmico	174
5.1	Localização da linha de aquisição dos dados.	180
5.2	Traços da linha de aquisição Caravela 93 em estado bruto.	181
5.3	Traços da linha de aquisição Caravela 93 com correção para divergência esférica.	181
5.4	Primeiro traço do conjunto de dados reais selecionado	182
5.5	Onda direta extraída do primeiro traço	183
5.6	Estimativa do pulso enviado para o primeiro traço.....	184
5.7	Convergência de coeficientes e erro para estimativa da onda direta	184
5.8	Deconvolução com pulso estimado por duas funções simples com fator de amortecimento com $\delta = 0,01$ do primeiro traço.	185
5.9	Ondas diretas extraídas dos 150 traços sísmicos..	185
5.10	Deconvolução de todos os 150 traços utilizando o pulso estimado com duas funções simples.	186
5.11	Estimativa do pulso enviado para o primeiro traço.....	188
5.12	Convergência de coeficientes e erro para estimativa da onda direta	188
5.13	Deconvolução com $\delta = 0,01$ e pulso estimado com três funções simples do primeiro traço.	189
5.14	Deconvolução de todos os 150 traços utilizando o pulso estimado com três funções simples.....	189

5.15	Pulsos estimados através das ondas diretas.	190
5.16	Convergência de coeficientes e erro para estimativa da onda direta	191
5.17	Deconvolução de todos os 150 traços utilizando os pulsos estimados com três funções simples para cada um dos traços.	191
5.18	Deconvolução com pulso estimado - 2 funções. ..	192
5.19	Deconvolução com único pulso estimado - 3 funções.	192
5.20	Deconvolução com pulsos estimados ao longo dos traços- 3 funções.	192
5.21	Destaque esquemático aos finais dos conjuntos de traços brutos, deconvolvidos com uso de duas funções e com três funções.	193
5.22	Deconv. com regularização com a onda direta....	195
5.23	Deconv. em impulsos.	195
5.24	Deconv. com regularização com pulso estimado.	195
B.1	Refletividade simulada com amplitudes unitárias.	226
B.2	Refletividades simuladas para a comparação do fator de coerência de amplitudes.	227
B.3	Variação do fator de coerência de amplitude com a alteração das reflexões de -500 a 500.	227
B.4	Variação do fator de coerência de amplitude com a alteração das reflexões de -500 a 500 ou aleatoriedade.	229

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades físicas dos sedimentos	54
3.1	Resultados das deconvoluções sumarizados.	150
4.1	Parâmetros de comparação obtidos com a aplicação das deconvoluções determinísticas com a utilização de onda direta e do pulso estimado. ...	176
4.2	Parâmetros de comparação obtidos com a implementação da deconvolução em impulsos.	178
5.1	Características da aquisição dos traços sísmicos. .	180
A.1	Informações de um cabeçalho de dado sísmico ..	223

Lista de quadros

1.1	Métodos geofísicos	36
2.1	Usos de sistemas de sonares	60

Nomenclatura

Símbolos Gerais

B	Erro entre série de impulsos e estimativa da refletividade, eq. (3.46), pág. 151.
c	Velocidade de propagação do som, eq. (2.1), pág. 48.
c_1	Velocidade do som no meio 1, eq. (2.8), pág. 55.
c_2	Velocidade do som no meio 2, eq. (2.8), pág. 55.
c_i	Velocidade de propagação do som na camada i , eq. (2.12), pág. 58.
CR	Coeficiente de reflexão, eq. (2.9), pág. 56.
CT	Coeficiente de transmissão, eq. (2.9), pág. 56.
M	Número de traços sísmicos, de um mesmo conjunto, analisados, eq. (3.24), pág. 116.
DG	Divergência geométrica, eq. (2.5), pág. 51.
DG_{cil}	Divergência geométrica cilíndrica, eq. (2.7), pág. 52.
DG_{esf}	Divergência geométrica esférica, eq. (2.6), pág. 52.

NR	Número de reflexões do ambiente simulado, eq. (3.15), pág. 108.
e	Vetor de erro entre pulso original e estimado, pág. 165.
e'	Erro escalar entre pulso original e estimado, pág. 165.
f	Frequência, eq. (2.3), pág. 49.
$f(x)$	Função arbitrária, eq. (2.2), pág. 48.
f_M	Frequência de pico do pulso de Ricker, eq. (2.18), pág. 72.
$f_i(t)$	Função simples escolhida para a geração do pulso estimado, na qual i vai de 1 ao número de funções escolhidas, eq. (4.1), pág. 162.
$g(x)$	Função arbitrária, eq. (2.2), pág. 48.
$H(f)$	Função resposta em frequência do sistema, eq. (3.5), pág. 93.
$h(t)$	Resposta impulsiva do sistema, eq. (3.1), pág. 93.
h_{est}	Refletividade estimada, eq. (3.14), pág. 106.
I	Intensidade sonora [W/m^2], eq. (2.5), pág. 51.
I_0	Intensidade sonora de referência para a água, equivalente a $0,67 \times 10^{-18} W/m^2$, eq. (2.5), pág. 51.
λ	Fator de decaimento da exponencial, eq. (2.17), pág. 71.
L	Vetor de lentidão, eq. (2.11), pág. 58.

L	Comprimento do cilindro de propagação., eq. (2.7), pág. 52.
$m(t_p)$	Amplitude da reflexão do instante t_p , eq. (3.26), pág. 133.
n	Iteração atual, pág. 165.
p	Pressão sonora, eq. (2.1), pág. 48.
p_d	Propagação direta entre fonte e receptor, eq. (2.16), pág. 66.
p_i	Outros padrões de propagação entre fonte e receptor que não a propagação direta, eq. (2.16), pág. 66.
q	Componente vertical do vetor de lentidão, eq. (2.11), pág. 58.
r	Vetor de distância tridimensional, eq. (2.1), pág. 48.
r_h	Autocorrelação da refletividade, pág. 150.
r_{xy}	Correlação cruzada entre o traço sísmico e o pulso enviado pela fonte, eq. (3.29), pág. 133.
r_x	Autocorrelação do pulso enviado pela fonte, eq. (3.29), pág. 133.
r_y	Autocorrelação do traço sísmico, eq. (3.29), pág. 133.
S	Salinidade, em %, eq. (2.4), pág. 49.
s	Componente horizontal do vetor de lentidão, eq. (2.11), pág. 58.
T	Número de amostras temporais, eq. (3.14), pág. 106.

T	Temperatura em °C, na Seção 2.1.2, eq. (2.4), pág. 49.
t	Tempo, eq. (2.1), pág. 48.
t'	Tempo dos traço com a correção NMO realizada, pág. 88.
t_0	Tempo de propagação em duas vias na posição em <i>offset zero.</i> , pág. 87.
t_p	Instante da refletividade que possui a p-ésima reflexão, eq. (3.26), pág. 133.
t_x	Tempo de propagação em duas vias na posição x , a qual não está em <i>offset zero.</i> , pág. 87.
TP_i	Tempo de propagação na camada i , eq. (2.13), pág. 58.
TP	Tempo de propagação, eq. (2.13), pág. 58.
u	Tamanho do vetor de refletividade, eq. (3.17), pág. 114.
v	Vetor de coeficientes adaptativos, pág. 165.
$V(f)$	Transformada de Fourier do filtro inverso, eq. (3.36), pág. 148.
$v(t)$	Filtro inverso, eq. (3.35), pág. 147.
$[x_g, y_g]$	Posição dos receptores, eq. (2.18), pág. 77.
$[x_s, y_s]$	Posição das fontes, eq. (2.18), pág. 77.
Δx_i	Alcance horizontal na camada i , eq. (2.13), pág. 58.
X	Matriz de pulso sísmico, eq. (3.18), pág. 115.

\bar{x}	Pulso original enviado pela fonte, sem ruído, pág. 165.
\hat{x}	Pulso estimado através do algoritmo adaptativo, pág. 165.
$X(f)$	Transformada de Fourier do pulso enviado pela fonte, eq. (3.5), pág. 93.
$x(t)$	Pulso enviado pela fonte, eq. (2.17), pág. 71.
XH	Alcance horizontal, eq. (2.13), pág. 58.
$Y(f)$	Transformada de Fourier do traço sísmico, eq. (3.5), pág. 93.
$y(t)$	Traço sísmico, eq. (3.1), pág. 93.
y_{est}	Traço sísmico estimado, eq. (3.16), pág. 114.
z	Vetor de ruído, pág. 165.
z	Profundidade, em m, eq. (2.4), pág. 49.
Z_i	Impedância do meio i , eq. (2.9), pág. 56.
z_i	Profundidade da camada i , eq. (2.13), pág. 58.

Símbolos Gregos

α	Primeiro coeficiente adaptativo, eq. (4.1), pág. 162.
δ	Fator de amortecimento ou regularização da deconvolução via divisão espectral, eq. (3.12), pág. 105.
δ'	Fator de proporção do amortecimento ou regularização da deconvolução via divisão espectral, eq. (3.12), pág. 105.

$\delta(t)$	Delta de Dirac, eq. (3.35), pág. 147.
Δ_h	Erro entre refletividades, eq. (3.14), pág. 106.
$\Delta_{y_{std}}$	Critério de parada sugerido pela autora. Diferença entre traços ponderada pelo desvio padrão da refletividade estimada, eq. (3.25), pág. 118.
Δ_y	Erro entre traços sísmicos, eq. (3.22), pág. 116.
Δt_{nmo}	Varição do tempo de propagação em duas vias na posição x e na posição zero, pág. 88.
γ	Terceiro coeficiente adaptativo, pág. 197.
λ	Comprimento de onda, eq. (2.3), pág. 49.
μ	Multiplicador de Lagrange, usado como regularizador na deconvolução simultânea no domínio do tempo, eq. (3.20), pág. 115.
$\phi_v(f)$	Espectro de fase do filtro inverso, eq. (3.38), pág. 148.
$\phi_x(f)$	Espectro de fase do pulso enviado pela fonte, eq. (3.37), pág. 148.
σ	Desvio padrão, pág. 98.
θ_i	Ângulo de incidência no meio i , eq. (2.8), pág. 55.
θ_{t_i}	Ângulo de transmissão na camada i , eq. (2.12), pág. 58.
ξ	Fator de coerência de amplitudes, eq. (3.15), pág. 108.
β	Segundo coeficiente adaptativo, eq. (4.2), pág. 162.

Operadores Matemáticos e Convenções _____

- $(.) * (.)$ Operação de convolução entre dois sinais, eq. (3.1), pág. 93.
- $\partial(.)$ Operador diferencial parcial, eq. (2.1), pág. 48.
- $d(.)$ Operador diferencial, eq. (3.2), pág. 93.
- $\int(.)$ Operação integral, eq. (3.2), pág. 93.
- \log_{10} Logaritmo na base dez, eq. (2.5), pág. 51.
- $\nabla^2(.)$ Operador Laplaciano, eq. (2.1), pág. 48.
- $(.) \circ (.)$ Produto de Hadamard, multiplicação ponto a ponto, pág. 168.
- $(.)^T$ Operação de transposição, pág. 166.

Acrônimos e Abreviaturas _____

- 1D Uma dimensão, pág. 62.
- 2D Duas dimensões, pág. 63.
- 3D Três dimensões, pág. 63.
- 4D Quatro dimensões, pág. 63.
- ANP Agência Nacional do Petróleo, pág. 189.
- BPF Do inglês "*Bandpass Filter*" ou em tradução livre 'Filtro passa-banda', pág. 84.
- CMP Do inglês "*Common midpoint gather*" ou em tradução livre "Conjunto de ponto médio comum", pág. 64.

- NMO Do inglês "*Normal moveout correction*" ou em tradução livre "Correção de sobretempo", pág. 87.
- RADAR Do inglês "*Radio Detection and Ranging*", ou na tradução livre "Navegação e determinação de distâncias utilizando rádio", pág. 37.
- SEG-Y Formato comum de gravação de dados sísmicos, pág. 78.
- SONAR Do inglês "*Sound Navigation and Ranging*", ou na tradução livre "Navegação e determinação de distâncias utilizando o som", pág. 37.
- UNESCO Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura, pág. 44.
- TWWT Do inglês "*Two way travel time*" ou em tradução livre "Tempo de propagação em duas vias", pág. 87.

1 Introdução

A maior parte da superfície do planeta Terra é composta por água, e o conhecimento a respeito desse tipo de ambiente é pouco dominado. As áreas submersas são altamente dinâmicas, nas quais diversos processos importantes para a manutenção da vida e do equilíbrio terrestre ocorrem e as modificam em diversas escalas de tempo e espaço.

De acordo com Garrison [2], com o grande aumento populacional e o advento de novas tecnologias durante século XX, houve um significativo aumento da exploração dos recursos terrestres. Com a escassez e a crescente necessidade de buscar por recursos naturais, minerais e energéticos, provenientes de outras fontes, somadas à implementação de obras civis e à curiosidade sobre o ambiente submarino, buscou-se o mar. dessa forma, métodos de investigação e exploração do ambiente submarino são cada vez mais requisitados e devem ser continuamente aprimorados para uma melhor obtenção de resultados.

1.1 Contextualização do trabalho

Antagonicamente à forma como são feitas as investigações geológicas em ambiente terrestre, nos ambientes submersos há dificuldade em acessar o local investigado. Com isso, é comum o uso de métodos geofísicos de investigação, aplicados indiretamente e de forma não invasiva. Estes métodos utilizam as propriedades físicas do meio para a obtenção de características geológicas e de evolução do fundo.

Segundo Kearey et al. [3], embora apresentem ambiguidades e incertezas na interpretação, os métodos geofísicos são alternativas rápidas e baratas. Existem diversos métodos geofísicos e cada um deles possui uma propriedade física a qual o método é sensível. Alguns desses métodos, seus parâmetros de análise e as propriedades físicas as quais estes são sensíveis estão sumarizados no Quadro 1.1.

Quadro 1.1.: Métodos geofísicos. Adaptada de Kearey et al. [3]

Método	Parâmetro	Propriedades físicas
Acústico	Tempos de percurso de ondas sonoras	Densidades e módulos elásticos
Gravitacional	Variações espaciais da força do campo gravitacional da Terra	Densidade
Magnético	Variações espaciais da força do campo geomagnético	Suscetibilidade magnética
Elétrico	Resistência, tensões e potenciais elétricos	Condutividade, capacitância e indução elétrica

Dentre os métodos geofísicos, destacam-se os acústicos, que utilizam os fenômenos de propagação da onda sonora como fundamento para obtenção de informações sobre o fundo marinho [4]. De todas as formas de radiação conhecidas, o som é a que se propaga no ambiente submerso da melhor forma.

De acordo com Urick [1], nas águas túrbidas e salinas dos oceanos, tanto a luz quanto o rádio são atenuados em um grau muito maior que o som. dessa forma, a acústica proporciona coberturas de larga escala não possíveis com métodos geológicos diretos e ondas eletromagnéticas. A Figura 1.1 expõe a profundidade de penetração na coluna d'água de ondas eletromagnéticas e sonoras de diversas frequências.

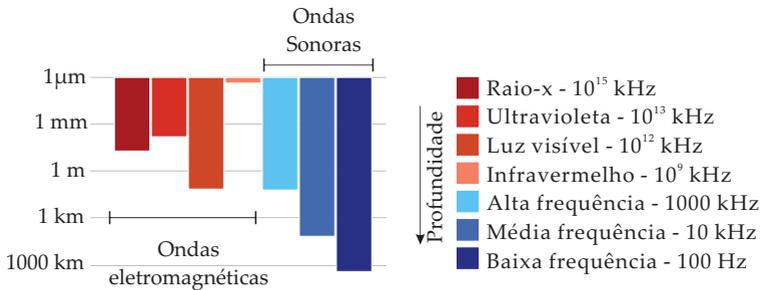


Figura 1.1.: Comparação da profundidade de penetração na coluna d'água das ondas eletromagnéticas e das sonoras para várias frequências. Adaptado de Wille [5].

Segundo Etter [6], a acústica submarina envolve o desenvolvimento e a aplicação de métodos acústicos para o imageamento de feições subaquáticas, para a comunicação através de guias de onda e para a medição de propriedades do ambiente. Está conectada às quatro vertentes da oceanografia: física, química, geológica e biológica.

De acordo com Urick [1], devido à relativa facilidade de propagação do som na água, a acústica é aplicada para uma variedade de propósitos no uso e exploração do ambiente submerso. Os usos do som no ambiente aquático constituem a ciência da Engenharia do SONAR¹ e os sistemas que utilizam este tipo de tecnologia são os chamados sistemas de sonares.

O sonar – equivalente, em acústica, ao RADAR² – é a aplicação de acústica submarina mais consolidada atualmente. Este tipo de tecnologia deu início ao desenvolvimento do estudo na área com o intuito de aprimorar o projeto e a eficiência dos sistemas, principalmente para o suporte em operações navais e militares durante períodos de guerra [6].

Levantamentos geofísicos podem ser realizados com a utiliza-

¹ Acrônimo de *Sound Navigation and Ranging*.

² Acrônimo de *Radio Detection and Ranging*.

ção de sistemas de sonares específicos para cada objetivo como por exemplo: investigação de estratigrafia de fundo, detecção de objetos e alvos, análises batimétricas.

Sistemas acústicos são considerados sísmicos quando ocorre a penetração das ondas em subsuperfície³. O método sísmico submarino⁴ é um dos mais utilizados métodos geofísicos que utilizam a propagação sonora. Visa obter informações a respeito da subsuperfície, por meio da interação do som com as camadas geológicas. Segundo Katsnelson et al. [7], o estudo de subsuperfície, que inclui detecção de objetos, estratificação do fundo, características das camadas como tipo, idade, modo de deposição e extensão geográfica, é um estudo muito desafiador e complexo.

O objetivo do método é registrar de forma exata as reações do meio devido à sua interação com o pulso enviado pela fonte sonora conhecida, localizada em ponto também conhecido. De acordo com Bacon et al. [8], um levantamento sísmico baseia-se na seguinte sequência de eventos: (i) ondas acústicas com amplitude e frequência de interesse são geradas mecanicamente a partir de uma fonte e direcionadas para o fundo marinho e alvos; (ii) a onda se propaga da fonte até a região de interesse através da coluna d'água sofrendo atenuações até encontrar o fundo; (iii) parte da energia é refletida e parte refratada para outras camadas do substrato com intensidades dependentes do contraste de impedância acústica⁵ entre os componentes da subsuperfície; (iv) o sinal retorna à superfície da água trazendo informações a respeito da propagação da onda (tempo de propagação, amplitude e fase de retorno) e é captado por receptores sensíveis à pressão sonora; e (v) os sinais recebidos,

³Refere-se à região que está abaixo da interface entre coluna d'água e substrato.

⁴Nesse trabalho, o "método sísmico submarino" será referenciado como "método sísmico" por simplicidade.

⁵Descreve as condições de propagação do som por um meio. É a razão entre a pressão e a velocidade de partícula instantânea.

os chamados traços sísmicos, são analisados e registrados. A configuração característica de um levantamento sísmico é ilustrada na Figura 1.2.

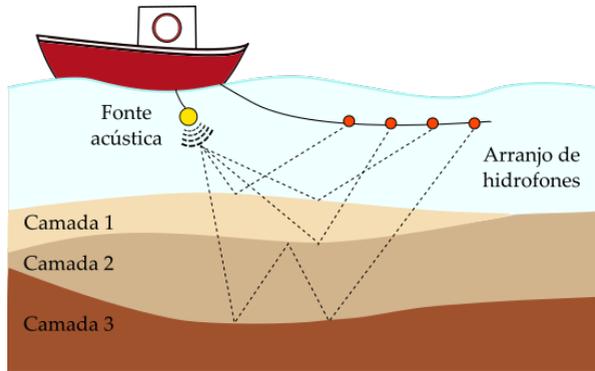


Figura 1.2.: Configuração de sistema de medição sísmica.

Com os dados registrados, busca-se processá-los de maneira eficiente para que a informação desejada seja extraída. A correta aplicação do processamento é imprescindível para que os dados de tempo e frequência possam ser convertidos em imagens que trazem informação correta a respeito da geologia investigada. Existem várias etapas no processamento de dados sísmicos, algumas bem desenvolvidas e aprimoradas, outras demandam mais estudo. A eficiência de metodologias para o processamento desse tipo de informação é uma área de estudo desafiadora e interessante.

Dentre as etapas do processamento, destaca-se a deconvolução dos sinais. Este procedimento busca remover o efeito do pulso sonoro enviado pela fonte e ressaltar as características do ambiente [9]. Existem algumas metodologias para a deconvolução de sinais baseadas em premissas e suposições. A deconvolução dos dados possui fontes conhecidas de erros que devem ser levadas em conta na hora da aplicação como a presença do ruído, a estimativa do pulso enviado pela fonte

e a escolha do algoritmo apropriado [9]. Cada caso deve ser avaliado para que a melhor metodologia seja empregada.

1.2 Objetivos

Com o exposto, o presente trabalho possui como objetivo principal estudar, avaliar e implementar metodologias para a aplicação da deconvolução a dados sísmicos, visando a extração de informações acerca da região subsuperficial, geologia de fundo e objetos enterrados, de forma correta e eficiente, minimizando potenciais erros e dificuldades.

1.2.1 Objetivos específicos

- Descrever, implementar e comparar técnicas de deconvolução de dados sísmicos;
- Aplicar metodologia para recuperação de pulso de fonte visando o aprimoramento da deconvolução;
- Validar metodologia para recuperação de pulso de fonte;
- Aplicar técnicas de deconvolução associadas à metodologia de recuperação do pulso com a utilização de dados reais.

1.3 Justificativas

A pesquisa envolvendo sistemas de sonar e sísmica marinha continua recebendo grande atenção devido ao crescente anseio pela detecção e localização de objetos enterrados no leito marinho, identificação de padrões sedimentares e mapeamentos geológicos. Quanto melhores as ferramentas para o estudo do fundo marinho, menor é a complexidade dos desafios a serem superados.

Busca-se, mediante revisão bibliográfica, obter um embasamento teórico a respeito do processamento de dados

sísmicos, tendo em vista que existem muitos desafios a serem superados. Além disso, o entendimento a respeito das técnicas de deconvolução servirá como base para o preenchimento de possíveis lacunas no conhecimento sobre este assunto.

O estudo dos algoritmos de deconvolução e a aplicação da estimativa de pulso podem trazer grandes avanços ao processamento de dados sísmicos, tornando possível incrementar a capacidade de gerar informações confiáveis a respeito do ambiente, através da minimização do ruído e a obtenção de uma imagem sísmica mais próxima à realidade.

1.3.1 Aplicações

O desenvolvimento de novas tecnologias e de entendimento sobre o processamento de dados sísmicos é imprescindível para a realização e viabilização de diversas atividades, a saber:

Dragagem de portos

Com o passar dos anos houve um aumento progressivo na fabricação de navios de grande porte, o que resultou em uma necessidade do incremento das profundidades de navegação em portos. Muitos portos tem a necessidade de realizar a retirada de material de suas dependências sempre que há uma mudança na profundidade ideal [10].

A análise do terreno permite avaliar as características quantitativas e qualitativas do substrato a ser dragado e consequentemente escolher melhores métodos e ferramentas para a retirada do material.

Segundo Pinson [11, 12], sistemas sísmicos de alta resolução podem fornecer informações exatas sobre as propriedades acústicas dos meios e estas podem ser relacionadas às propriedades dos substratos analisados via modelos como os presentes em [13–15].

Detecção de dutos e objetos

Segundo Vardy et al. [16], a localização de alvos na subsuperfície e no fundo marinho muitas vezes conta com a presença de mergulhadores, o que limita muito as investigações devido à fragilidade dos profissionais.

Sistemas sísmicos se mostram eficientes ferramentas para o imageamento de estruturas enterradas quando as fontes são combinadas com um arranjo de hidrofones para a geração de imagens tridimensionais do fundo [16–18]. Com isto é possível estimar o tamanho aproximado, a forma dos objetos e em alguns casos, o tipo de material.

Arqueologia

A arqueologia marinha visa investigar locais e feições históricas importantes de forma não destrutiva. Feições como naufrágios, paisagens inundadas requerem investigação e pesquisa com precisão levando em conta a necessidade de permanecerem intocadas para a preservação da cultura e das informações por um custo baixo [19].

A UNESCO⁶, em 2011, elaborou uma convenção para a proteção da herança cultural subaquática [20]. A convenção determina os princípios básicos para a proteção da cultura subaquática, determina um sistema de cooperação e provê regras práticas para a pesquisa e acesso à esse tipo de recurso cultural.

Segundo Plets e Karen [19], existe uma grande preocupação em mapear as áreas com arqueologia de interesse já que, apesar de serem protegidas pela lei, requerem um plano de gestão e estão à disposição da dinâmica natural do ambiente marinho.

⁶Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura. Do inglês: *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*.

A Figura 1.3, exibe a reconstrução tridimensional, obtida através de método sísmico, dos destroços enterrados do *Grace Dieu*, uma caravela importante na história da Inglaterra [21].

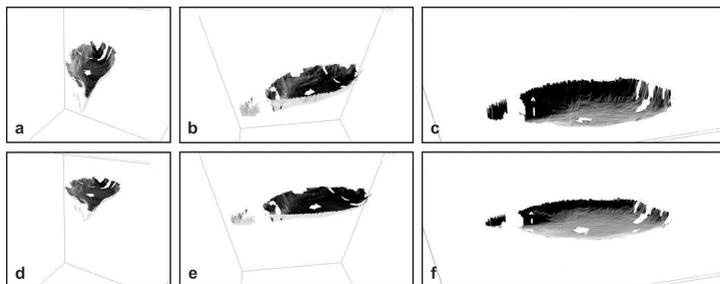


Figura 1.3.: Reconstrução tridimensional dos destroços enterrados do *Grace Dieu*: (a-c) com o dobro de exagero vertical e (c-f) em uma escala de 1:1. Retirada de Plets et al. [21].

Implementação de obras civis

Segundo Soupios et al. [22], as investigações vão de pesquisa de terreno a inspeções de obras já realizadas. A qualidade da fundação da construção é de extrema importância, dessa forma, deve-se realizar a detecção de fundos potencialmente perigosos para a implementação de um empreendimento costeiro. Além disso, a inspeção das condições de obras anteriormente instaladas permite avaliar o estado em que estas se encontram e a que estão sujeitas.

dessa forma, tem-se a necessidade de investigar ambientes submersos, de forma não invasiva, para dar suporte a processos de engenharia, como instalação de dutos, pontes, barragens, plataformas exploratórias [23].

Detecção de gás

Utilizado como fonte energética, o gás natural vem sendo amplamente utilizado e conseqüentemente cobiçado. Está presente nos substratos inconsolidados como produto de um ou mais processos: podem ter origem de decomposição microbiana de matéria orgânica ou de processos termocatalíticos, agindo também, na matéria orgânica sob altas temperaturas.

Antes de perfurar o substrato para a exploração do gás, deve-se fazer um estudo detalhado da subsuperfície para a identificação dos locais onde as feições gasosas se encontram, para que tempo, equipamentos e dinheiro não sejam dispendidos de forma equivocada. A detecção das bolhas de gás no substrato, segundo Jackson e Richardson [24], pode ser feita por meio de técnicas sísmicas.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho foi dividido em seis capítulos. Os capítulos iniciais introduzem e fazem o embasamento teórico sobre o assunto para que os capítulos de desenvolvimento e discussões possam ser bem compreendidos. Com isso, os capítulos seguem a ordem:

Capítulo 1: Introduce o trabalho por meio da exposição da abrangência do estudo e da sua importância no contexto histórico e atual.

Capítulo 2: A Por meio de exposição dos principais conceitos, embasa o trabalho teoricamente para que os capítulos subsequentes sejam bem entendidos.

Capítulo 3: Expõe os conceitos que envolvem o processo de deconvolução de traços sísmicos. Descreve as quatro técnicas de deconvolução estudadas no trabalho e as compara para diferentes situações.

Capítulo 4: Descreve e valida um filtro adaptativo que estima o pulso enviado pela fonte sonora através da onda

direta retirada do traço sísmico medido. Algoritmos de deconvolução são, então, aplicados com a utilização dos pulsos estimados através do método exposto. Ademais, comparações são realizadas.

Capítulo 5: Aplica as metodologias de estimativa de pulso descritas no Capítulo 4 e de deconvolução descritas no Capítulo 3 para dados reais da indústria do petróleo. O algoritmo adaptativo é aplicado com a utilização de diferentes números de coeficientes adaptativos e a comparação entre a imagem sísmica obtida é realizada.

Capítulo 6: Revela as principais considerações e conclusões realizadas no trabalho. Além disso, expõe recomendações e sugestões para trabalhos a serem realizados na área.

2 Sísmica marinha

Sistemas de acústica submarina podem trabalhar em bandas de frequência bem variadas, numa escala de poucos Hz a alguns MHz. Os comprimentos de onda correspondentes vão de alguns metros a pouco menos de um milímetro [24]. Além do comprimento de onda, deve-se avaliar a distância que a energia acústica consegue se propagar sem ser atenuada. Na água, este valor pode ser de centenas de quilômetros para as menores frequências e algumas dezenas de metros para as maiores frequências. No substrato, as distâncias são bem menores, indo de algumas centenas para as menores frequências e alguns milímetros para as maiores. Levando em conta a relação entre frequência e comprimento de onda, para que a onda sonora se propague através da subsuperfície, baixas frequências devem ser utilizadas.

De acordo com Sheriff [25], a sísmica está relacionada com a propagação de ondas elásticas e com transmissão de energia através de estruturas sólidas por meio de ondas longitudinais e transversais. Um levantamento sísmico é realizado com a intenção de mapear a subsuperfície por intermédio da observação das ondas sonoras, muitas vezes geradas artificialmente, analisando seus tempos de retorno e amplitudes das ondas refletidas devido a contrastes de impedância acústica.

2.1 Propagação acústica em ambiente marinho

De todas as formas de radiação conhecidas, o som é a que melhor se propaga pela coluna d'água [1]. Pela sua facilidade de propagação, o som foi aplicado de forma extensiva para uma variedade de propósitos no uso e exploração dos oceanos. As ondas sonoras vem sendo amplamente aplicadas para investigações submersas porque são capazes de prover coberturas de largas escala, não possíveis com as técnicas usuais de amostragem submarina [24].

2.1.1 Ondas sonoras

Segundo Blackstock [26], uma onda é um distúrbio de uma condição pré-existente. O movimento deste desvio constitui a transferência de informação de um ponto no espaço para outro. Ondas sonoras são mecânicas, ou seja, precisam de um meio para que se propaguem.

Considerando acústica linear e um meio isentrópico, pode-se chegar à equação geral da onda de pressão sonora a partir das equações básicas de continuidade, quantidade de movimento, energia e relação termodinâmica:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}, \quad (2.1)$$

na qual p é a pressão sonora, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ é a posição, t é o tempo, c é a velocidade de propagação do som e ∇^2 , o operador Laplaciano¹.

O desenvolvimento da solução da Eq. (2.1) em coordenadas cartesianas pode ser encontrado em [26] e chega à solução na forma

$$p(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r} - ct) + g(\mathbf{r} + ct), \quad (2.2)$$

na qual f e g são funções arbitrárias. A primeira parcela representa a onda se afastando da origem e a segunda parcela

¹Operador diferencial espacial.

representa a onda se aproximando da origem. A solução pode também ser apresentada em coordenadas esféricas e cilíndricas.

2.1.2 Propagação acústica na coluna d'água

O oceano é considerado um guia de ondas sonoras limitado acima pela superfície do mar e abaixo pelo fundo marinho. A velocidade do som na coluna d'água exerce o mesmo papel que o índice de refração quando trata-se de física ótica [27]. Normalmente é relacionada à compressibilidade e à densidade do meio. Sendo assim, segundo Hodges [28], para um fluido não dispersivo, pode-se considerar que a velocidade do som segue a mesma relação que rege a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas,

$$c = \lambda f, \quad (2.3)$$

na qual λ é o comprimento de onda e f a frequência.

Para o caso do ambiente submerso, a densidade está relacionada com a pressão estática, com a salidade e com a temperatura. A utilização de relações empíricas entre as propriedades físicas da coluna d'água e a velocidade do som é comum e permite calcular a velocidade do som de acordo com dados desses parâmetros. Uma dessas relações é exposta por Urlick [1] e é dada por

$$c = 1449,2 + 4,623 T - 0,0546 T^2 + 1,39 (S - 35) + 0,017 z, \quad (2.4)$$

na qual T é temperatura ($^{\circ}\text{C}$), S salinidade (‰) e z profundidade (m). A Figura 2.1 expõe perfis de velocidade típicos de algumas regiões oceânicas.

Variações sazonais, diurnas e geográficas têm grande influência sobre as propriedades físicas da coluna d'água e consequentemente sobre a velocidade de propagação do som. Contudo, é comum considerar o valor de 1500 m/s como um padrão para a propagação do som na água do mar, o que

equivale a algo em torno de 4,5 vezes o valor da velocidade do som no ar, de acordo com Wille [5].

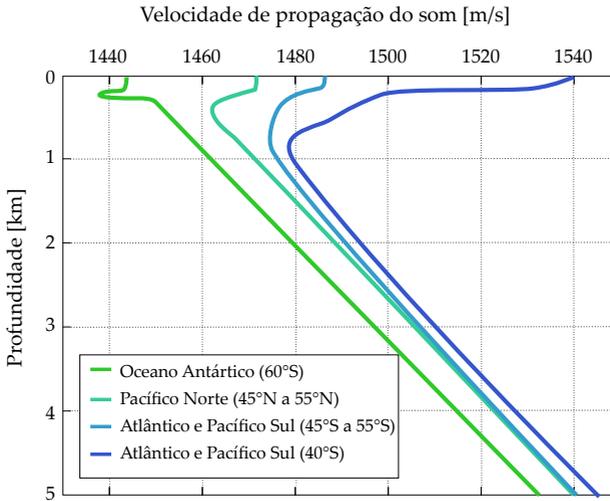


Figura 2.1.: Perfis típicos de algumas regiões. Adaptado de Urick [1]

2.1.3 Decaimento de amplitudes dos sinais

Enquanto a onda sonora se propaga pela coluna d'água ocorre um decaimento de sua amplitude com a distância por dois principais motivos: a perda de energia causada pela atenuação imposta pelo fluido e a divergência geométrica.

Divergência geométrica

O decaimento por divergência geométrica se dá devido à conservação de energia pela frente de onda enquanto se propaga. Considerando uma fonte pontual, a energia será radiada de forma homogênea por uma esfera que circunda a fonte. A medida que a frente de onda se afasta da fonte, a área da esfera que compreende a frente de ondas irá aumentar, e a energia deve permanecer a mesma para toda a área da esfera. Desta forma, para uma mesma porção da área a energia será

menor, ou seja, a frente de ondas terá uma menor intensidade. A Figura 2.2 (a) ilustra o fenômeno por meio da metade inferior de uma esfera.

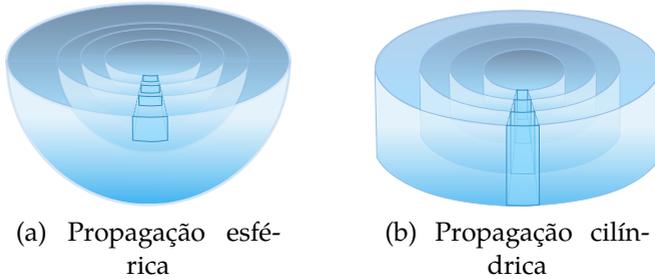


Figura 2.2.: Tipos de propagação sonora em ambiente marinho.

Para quantificar o decaimento por divergência geométrica, é possível relacionar a intensidade sonora em decibel no ponto de interesse com o ponto de referência, a 1 m da fonte sonora, como segue:

$$DG = -10 \log_{10} \left(\frac{I_{(r,z)}}{I_{r_0}} \right), \quad (2.5)$$

na qual $I_{(r,z)}$ é a intensidade sonora no ponto de interesse, r é a distância, z a profundidade e I_{r_0} a intensidade no ponto de referência a 1 m da fonte. Para o caso de propagação esférica, a intensidade sonora é dada por $I \propto 1/4\pi r^2$. A relação pode ser substituída na Eq. (2.5) e a seguinte relação para divergência geométrica pode ser obtida

$$DG_{\text{esf}} = 20 \log_{10}(r). \quad (2.6)$$

Entretanto, como observado por Ristow [29], em um ambiente de estudo como o oceano raso, onde a coluna d'água é limitada abaixo pelo substrato e acima pela superfície d'água, a propagação da frente de ondas não se dá de forma esférica, e sim cilíndrica, como ilustra a Figura 2.2 (b).

Tendo isto em vista, pode-se obter a divergência geométrica de forma análoga. Considerando que a intensidade sonora em uma propagação cilíndrica é dada por $I \propto 1/2\pi rL$, na qual L é o comprimento do cilindro, pode-se chegar a

$$DG_{\text{cil}} = 10 \log_{10}(r). \quad (2.7)$$

Arenuação

A atenuação é um efeito dependente da frequência, tendo em vista que ondas com menor frequência possuem um maior comprimento de onda e sofrerão menor influência da interação com o ambiente [30].

A perda por transmissão devido à dissipação friccional e calor é uma função exponencial da distância [31]. Este tipo de processo, normalmente, é fraco e contribuirá de forma pouco significativa.

2.1.4 Interação com o fundo

Quando se trata de propagação no ambiente marinho deve-se lidar com o fato de que uma de suas principais características é a interação com o fundo marinho.

Dependendo da frequência da onda sonora emitida pode haver a interação com a região de subsuperfície. Ao contrário da interface ar-água, devido ao contraste de impedância, a interface água-substrato permite além do espalhamento, também a transmissão da energia para a subsuperfície (mais detalhes são dados por Brekhovskikh e Lysanov [32]), como ilustra a Figura 2.3.

Para que os efeitos de interação com o fundo (reflexão, refração, atenuação, espalhamento) sejam corretamente identificados, deve-se ter um conhecimento sobre o fundo marinho [7].

O fundo marinho é um contorno da mesma forma que a superfície da água, contudo, seus efeitos são mais complicados

devido à sua composição diversificada. Segundo Katsnelson et al. [7], a formação de uma plataforma continental pode definir se esta será estreita (poucos km) ou larga (de 100 a 200 km). Plataformas com baixa atividade tectônica (margens passivas) podem acumular grandes quantidades de sedimento e são largas. Já as plataformas com alta atividade tectônica (margens ativas) tendem a acumular menos sedimento e possuem uma menor extensão.

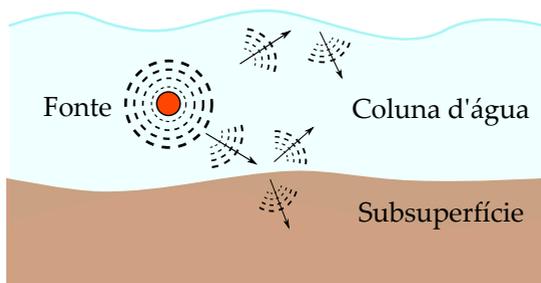


Figura 2.3.: Diagrama de espalhamento sonoro das interfaces ar-água e água-substrato.

Além disso, deve-se considerar a tipologia do substrato superficial de fundo encontrado. É normal que em regiões mais próximas à costa haja a deposição de sedimentos mais grossos, devido ao fato de que a energia de onda de superfície² é maior nessas regiões e este tipo de sedimento possui uma taxa de deposição superior às de sedimentos mais finos. Existem exceções quanto a presença de aporte sedimentar terrígeno por grandes bacias hídricas [7]. A Tabela 2.1, expõe algumas propriedades com valores típicos a respeito de substratos presentes no fundo marinho.

²É expressa pela capacidade de trabalho da onda superficial. É teoricamente proporcional ao quadrado da altura da onda, que é um parâmetro de obtenção fácil. A maior parte da energia de onda do mar de uma região costeira é consumida no atrito com o fundo e na movimentação do substrato.

Tabela 2.1.: Valores típicos de propriedades para alguns substratos da plataforma continental. Adaptada de Hamilton [33].

Substrato	Diâmetro [mm]	Dens. do grão [g/cm ³]	Poros. do grão [%]	Veloc. do som [m/s]
Areia grossa	0,5285	2,034	38,6	1836
Areia fina	0,1593	1,941	45,6	1749
Areia muito fina	0,0960	1,856	50,0	1702
Areia lamosa	0,0490	1,772	55,3	1646
Lama arenosa	0,0308	1,771	54,1	1652
Lama	0,0237	1,740	56,3	1615
Lama argilosa	0,0077	1,488	71,6	1549
Argila lamosa	0,0027	1,421	75,9	1520

É possível perceber que a densidade e a velocidade do som aumentam com o diâmetro dos grãos. Deve-se ressaltar que dados para sedimentos carbonáticos, cascalhos e alguns outros tipos distintos de substratos estão omitidos nesta tabela.

O fato de que ondas acústicas de alta frequência possuem grande interação com o fundo é uma característica tão importante quanto a interação com o volume d'água do guia de onda. Os efeitos acarretados pela interação com o fundo são relacionados à difração, como a reflexão, a refração, a atenuação e o espalhamento do som [24], ilustrados na Fig. 2.4.

A forma com que interage com o fundo, as características da interface e o contraste de impedância entre água e substrato ditarão se a onda será transmitida ao fundo ou refletida à coluna d'água. Caso haja a transmissão para o substrato, as formações geológicas, camadas da subsuperfície, poderão refletir as ondas transmitidas. O sinal que retornará ao receptor será diferente do emitido pela fonte, fato este que permite a identificação das feições que interferiram na propagação sonora.

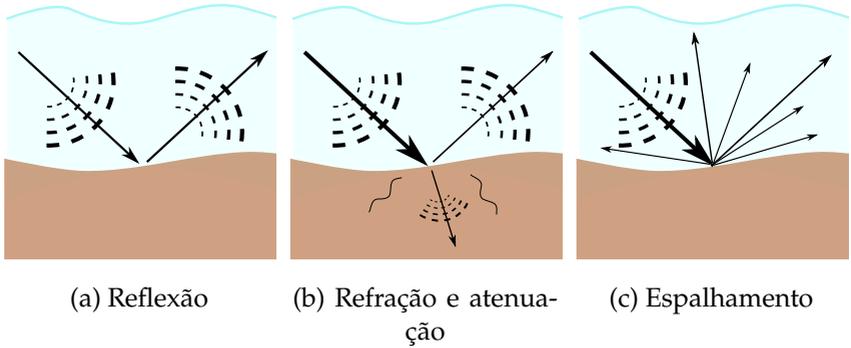


Figura 2.4.: Efeitos da interação do som com o fundo: (a) a onda refletida possui mesmo ângulo da incidente; (b) parte da onda é refletida, parte é transmitida e parte atenuada; (c) pela rugosidade do fundo, a onda incidente é refletida com diversos ângulos e para várias direções.

Considerando dois meios diferentes com velocidades de propagação distintas, uma onda incidente na interface será parte refletida (com ângulo igual ao de incidência) e parte refratada/transmitida para o outro meio. O ângulo em que a onda será transmitida para o segundo meio pode ser obtido pela Lei de Snell:

$$\frac{\text{sen}(\theta_1)}{c_1} = \frac{\text{sen}(\theta_2)}{c_2} \quad (2.8)$$

na qual θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência, do primeiro e do segundo meio e c_1 e c_2 são as velocidades de propagação do som.

Já a amplitude da onda refletida ou transmitida, proporcionais aos coeficientes de reflexão e transmissão, é determinada pelo ângulo de incidência e das propriedades dos materiais envolvidos nos meios, descritas por meio da impedância acústica característica ($Z = \rho_0 c$). Sob incidência normal, o coeficiente de reflexão é dado por:

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.9)$$

em que Z_1 e Z_2 são as impedâncias do meio 1 e 2. O coeficiente de transmissão é dado por:

$$CT = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} = 1 - CR. \quad (2.10)$$

A Figura 2.5 ilustra o coeficiente de reflexão obtido para três tipos de substrato variando com o ângulo de ataque³. As curvas foram obtidas com a implementação do modelo do Fluido Equivalente [24], que supõe que o substrato pode ser modelado como um fluido adjacente à coluna d'água. Considerou-se uma onda de frequência 100 Hz. O primeiro substrato é composto por rocha do tipo basalto com velocidade de propagação de 3750 m/s e densidade de 2557,5 kg/m³, o segundo é um substrato composto por areia com velocidade de propagação de 1650 m/s e densidade de 2046 kg/m³, o terceiro tipo de substrato modelado é composto por sedimento lamoso com velocidade de propagação de 1470 m/s e densidade de 1534,5 kg/m³. Curvas mais exatas são obtidas por outros modelos de propagação. Detalhes são encontrados em [34].

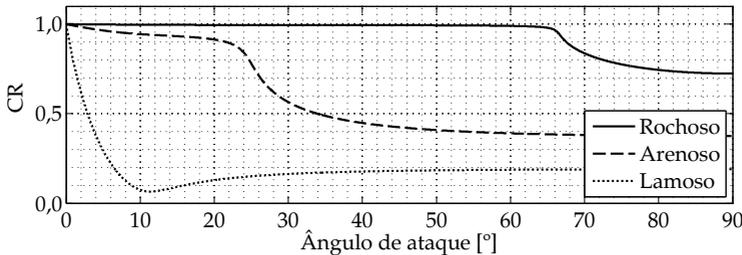


Figura 2.5.: Coeficiente de reflexão para três tipos de substrato.

É possível notar na Figura 2.5 que quanto mais consolidado e

³Ângulo medido em relação à superfície de fundo.

mais denso o substrato, mais da energia incidente da onda será refletida de volta à coluna d'água, principalmente em ângulos de ataque pequenos.

Quando há transmissão para a subsuperfície, propagam-se ondas cisalhantes, além das longitudinais. Isso porque fluidos não possuem rigidez ao cisalhamento, característica essencial para a propagação de ondas cisalhantes.

As feições não homogêneas (ondulações no leito, objetos, grãos sedimentares, fauna e flora) interferem na propagação da onda, causando reflexões, refrações e difrações com ângulos diversos, o chamado espalhamento do som. O espalhamento pode ocorrer devido ao encontro com a superfície d'água e de fundo, com objetos ou animais flutuantes na coluna d'água [30], ou no volume de subsuperfície. Como para o caso da sísmica a onda sonora possui, geralmente, um comprimento de onda maior que as heterogeneidades da água e volume de substrato esse efeito será percebido com mais força na interação da onda com a interface água-substrato.

Em casos em que há alto contraste de impedância acústica entre coluna d'água e substrato, muito do sinal acústico é refletido de volta para a coluna d'água e não penetra na região de subsuperfície. Para pesquisas em que deseja-se obter informações a respeito da subsuperfície, deve-se escolher uma faixa de frequência de trabalho que garanta a penetração das ondas no fundo [31].

2.1.5 Propagação em subsuperfície estratificada

Considerando uma subsuperfície estratificada horizontalmente, é possível calcular os tempos de propagação por cada uma das camadas. Define-se aqui, como feito por Chapman [35], a lentidão da onda⁴, dada pelo inverso da velocidade de propagação (c). Considerando um meio bidimensional (plano xz), o vetor de lentidão (L) possui duas componentes:

⁴Do inglês: *slowness*.

$$L = [s \pm q], \quad (2.11)$$

na qual s é a componente horizontal (em x) e q a componente vertical (em y), como ilustrado na Fig. 2.6.

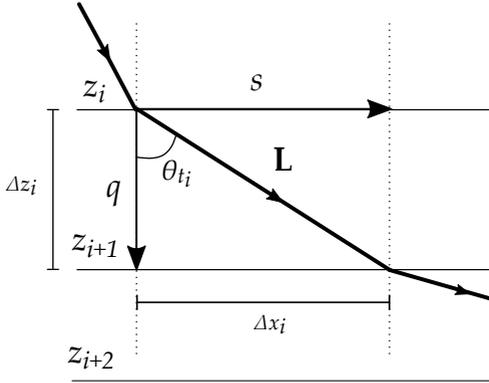


Figura 2.6.: Propagação de raio de lentidão. Adaptado de [35].

A componente horizontal da lentidão é conservada ao longo da propagação do raio acústico. Sendo assim, a componente horizontal e a vertical em uma camada i com velocidade de propagação c_i e profundidade z_i são dadas por

$$s = \frac{\text{sen}(\theta_{t_i})}{c_i} \quad \text{e} \quad q = \sqrt{\frac{1}{c_i^2} - s^2} = \frac{\text{cos}(\theta_{t_i})}{c_i}, \quad (2.12)$$

na qual θ_{t_i} é o ângulo de transmissão na camada i . Por análise de triangulação é possível obter o alcance horizontal (XH) e o tempo de propagação do raio (TP) nas camadas:

$$\text{XH} = \sum_i^I \Delta x_i = \sum_i \text{tg}(\theta_{t_i}) \Delta z_i = \sum_i \frac{L \Delta z_i}{q_i} \quad \text{e} \quad (2.13)$$

$$\text{TP} = \sum_i^I \Delta \text{TP}_i = \sum_i \frac{\Delta z_i}{c_i \text{cos} \theta_{t_i}} = \sum_i \frac{\Delta z_i}{c_i^2 q_i}. \quad (2.14)$$

na qual Δx_i e Δz_i são os alcances horizontal e vertical de cada camada e I é o número total de camadas.

Considerando uma subsuperfície com estratificação contínua de velocidade, um perfil $c(z)$, pode-se conduzir $\Delta z \rightarrow dz$ e o alcance horizontal e o tempo de propagação se tornam

$$XH(L) = \int \frac{L}{q} dz \quad e \quad (2.15)$$

$$TP(L) = \int \frac{1}{c^2 q} dz. \quad (2.16)$$

2.1.6 Sonar

Segundo Urick [1], a "era moderna" do sonar é conhecida como tendo início no último quarto do século XX, principalmente com a II Guerra Mundial, porém a origem deste tipo de sistema é muito mais antiga. Uma das primeiras referências de que o som existe abaixo da superfície d'água é datada de 1490 e foi descoberta nas anotações de Leonardo da Vinci.

Apesar de os sistemas de sonares terem sido colocados em prática desde a virada do século XX, de acordo com Peyvandi et al. [36], o evento trágico relacionado ao Titanic ⁵, em 1912, foi de extrema importância para o seu desenvolvimento e de seus derivados.

Segundo Ainslie [37], um sonar pode ser interpretado como um tipo de radar submarino que utiliza ondas sonoras ao invés das ondas de rádio para obter informações do meio. Sua operação principal está baseada na propagação de ondas entre o alvo e o receptor [28, 36]. O objetivo principal de um sonar é a detecção e caracterização de objetos e alvos, identificação de padrões geológicos e comunicação [28, 36]. O Quadro 2.1

⁵Navio de passageiros britânico luxuoso e projetado pra ser altamente seguro. Em 1912, ao colidir com um *iceberg* afundou com mais de 1500 pessoas a bordo, o que tornou o episódio um dos maiores desastres envolvendo transportes marítimos da história.

sumariza alguns dos usos não militares de equipamentos de sonares.

Quadro 2.1.: Usos e características de sistemas de sonares.
Adaptado de Urick [1].

Função		Descrição
Sondagem de profundidade	Sondas convencionais	Envia pulsos curtos e cronometra o retorno do fundo
	Perfiladores sísmicos	Frequências menores e fontes de alta potência para penetração no fundo
	Varredura lateral	Mapeamento do fundo
Velocímetros acústicos		Utiliza transdutores oblíquos para obtenção da velocidade do som
Auxílio em pesca		Rastreamento de cardumes
Marcação de posição	Guia	Transmite sinal contínuo
	Transponder	Transmite sinal sob demanda
Comunicação e telemetria		Usa um som ao invés de fiação para a transmissão de informação
Variados		Medidores de vazão acústico e sensores de altura de onda

Os sonares podem ser divididos em dois grandes grupos: os ativos e os passivos. Os sonares ativos (Figura 2.7 (a)) são capazes de gerar uma onda sonora e recebê-la. Desta forma, quando o sinal é detectado, a posição do alvo pode ser determinada através do tempo de propagação e da direção do eco⁶. Já os sonares passivos (Figura 2.7 (b)) não possuem o princípio da geração, apenas recebem os sinais emitidos por fonte externa ao sistema, provêm o monitoramento subaquático sem enviar energia para a coluna d'água. Mais informações a respeito de tipos de sonares, suas classificações e princípios de funcionamento são encontradas em [29].

⁶Reflexão da onda acústica.

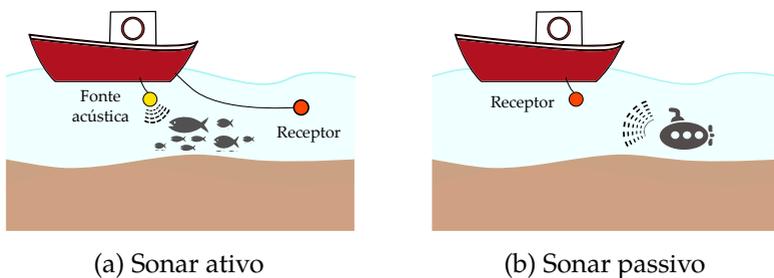


Figura 2.7.: Tipos de sonares.

Uma vez que o trabalho em questão envolve sistemas de aquisição de dados sobre o fundo marinho, levar-se-á em conta apenas os sistemas ativos, que emitem um sinal e recebem uma resposta com características que revelam informações sobre o substrato.

2.2 Métodos sísmicos

Segundo Ewing [38], técnicas sísmicas continuam entre as mais utilizadas para a investigação da subsuperfície marinha. Investigações sísmicas são desenvolvidas por uma variedade de razões, como por exemplo investigação de substrato para instalação de estruturas civis, identificação de corpos d'água subterrâneos, mapeamento geológico e, principalmente, localização de depósitos de minerais, óleo e gás [39].

A configuração de um sistema sísmico consiste em uma fonte sonora e um conjunto de hidrofones. Os ensaios sísmicos podem ser diferenciados pela geometria do conjunto de hidrofones, pela densidade de aquisição de dados e pelo tipo de sensor [39], que normalmente é sensível à pressão sonora. A fonte envia pulsos em intervalos regulares e os hidrofones recebem os ecos refletidos pelos refletores. Os ecos são convertidos em sinais elétricos e transferidos para um gravador.

Dentre os tipos de geometria do sistema de hidrofones

expostos na Figura 2.8, a que mantém o arranjo rebocado (1) é a mais utilizada. Contudo, existem sistemas que depositam o arranjo de hidrofones sobre o fundo marinho (2), ou enterram os sensores no substrato (3). Outra prática, é a deposição de transdutores em poços, em perfis verticais (4).

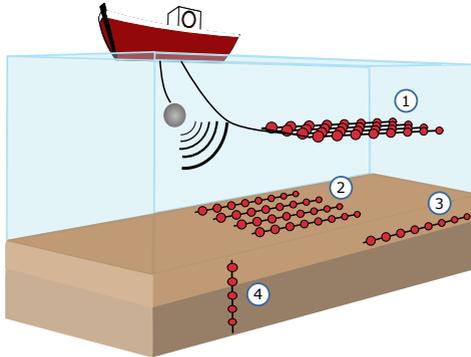


Figura 2.8.: Geometrias de arranjos de transdutores: (1) rebocado; (2) sobre o fundo; (3) soterrado e (4) em perfil vertical. Adaptado de [39].

Segundo Bacon et al. [8], no que diz respeito à densidade de dados, a medição sísmica mais simples é a monostática em 1D, com uma fonte e um receptor localizados em um mesmo local (Figura 2.9 (a)). Contudo, os ensaios em duas dimensões, em que uma linha de hidrofones é utilizada (Figura 2.9 (b)), são mais úteis pela continuidade e repetibilidade da aquisição. A aquisição de dados em 3D, com um conjunto de linhas de sensores (Figura 2.9 (c)), e 4D, repetição de ensaios em 3D, trazem uma maior densidade de dados e área de cobertura.

De acordo com Kearey et al. [3], a sísmica pode fornecer muitos detalhes da geologia da subsuperfície marinha estudada. É sem dúvidas, o método de aquisição de dados geológicos indireto mais importante quanto ao volume de atividades de aquisição de dados e quanto à sua ampla aplicabilidade.

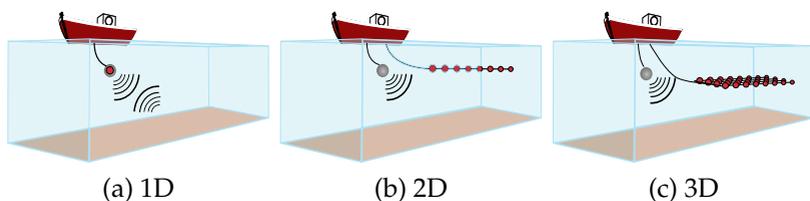


Figura 2.9.: Densidade de aquisição de dados sísmicos.

Os métodos sísmicos dependem da combinação de gravações sucessivas [40]. Segundo Scales [41], os sismogramas, ou séries temporais, gravados por cada receptor são chamados de traços sísmicos. O conjunto de traços gravados por todos os receptores para uma dada fonte é chamado conjunto de fonte comum (Figura 2.10 (a)).

Pode-se avaliar todos os traços gravados por um receptor para todas as fontes⁷ (Figura 2.10 (b)) ou pode-se analisar todos os traços que o ponto médio entre fonte e receptor é um valor fixo, chamado de conjunto de ponto médio comum (CMP⁸). A abordagem mais utilizada é o conjunto de ponto médio comum [9], ilustrada em Figura 2.10 (c).

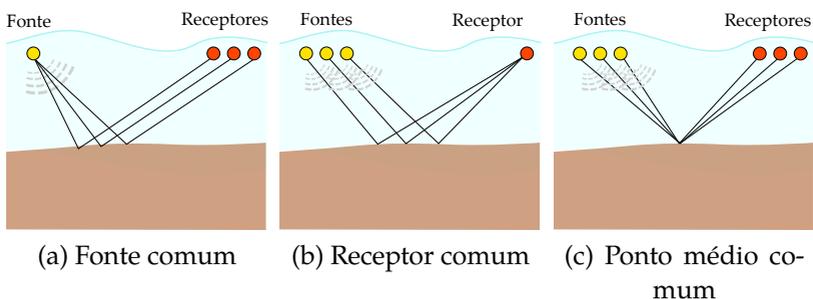


Figura 2.10.: Organização dos traços em conjuntos.

⁷Ou para todas as posições de fontes quando a aquisição for em movimento.

⁸Do inglês: *common midpoint gather*.

Alguns problemas na aquisição de dados sísmicos podem afetar a qualidade do dado. Vardy [42] ressalta alguns como, por exemplo, a falta de resolução vertical e horizontal devido ao erro do sistema de posicionamento e *aliasing*⁹ espacial devido às limitações do arranjo.

Existe um limite com relação à menor feição¹⁰ que o sistema sísmico utilizado é capaz de detectar. Determina-se através do comprimento de onda do pulso enviado pela fonte, que varia de levantamento para levantamento, dependendo dos objetivos a serem alcançados com a investigação.

2.2.1 Reflexões

Se a velocidade de propagação do som em diversas camadas da subsuperfície é conhecida e as interfaces entre estas são bons refletores¹¹, torna-se simples a medição da espessura de cada uma pela medição do tempo que um pulso sonoro leva para se propagar até a camada, refletir e voltar. As limitações deste uso estão relacionadas à requerida alta frequência para que se tenha uma boa resolução da estratigrafia e que gera uma alta absorção pelo fundo, evitando a penetração por grandes profundidades do substrato [38].

Segundo Ewing [38], a propagação de energia sonora em ambiente submarino de águas profundas pode ser modelada seguindo a Teoria dos Raios. A localização da fonte sonora é a origem dos raios e cada um deles pode ser considerado como um feixe de energia viajando pela trajetória descrita. Apenas os raios que saem da origem chegam a um receptor são de interesse do estudo. Em meios com multi-camadas, existem diversos padrões de propagação, a maioria envolvendo reflexão e refração das interfaces entre as camadas.

⁹Distorção devido à amostragem equivocada.

¹⁰Características naturais ou artificiais no fundo marinho.

¹¹Por bons refletores refere-se às interfaces com alto contraste de impedância entre as camadas adjacentes.

A Figura 2.11 expõe um caso simples de reflexões envolvendo três meios com velocidades de propagação sonora distintas e com interfaces horizontais e planas. Tem-se a onda direta (p_d), que parte da fonte e não interage com o fundo, e é recebida pelo hidrofone. Pode-se observar também, uma onda com angulação mais baixa (p_1), que ao incidir sob a primeira interface é refletida e retorna ao hidrofone. E, por último, uma onda com alta angulação de ataque (p_2), o que permite que esta seja transmitida para o segundo meio e reflita na interface entre o segundo e o terceiro para, então, retornar ao hidrofone.

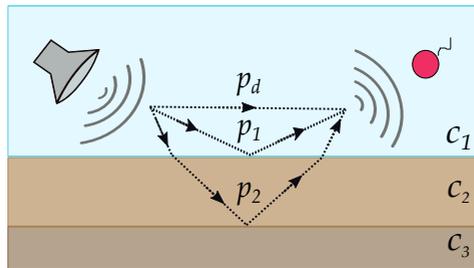


Figura 2.11.: Diagrama de raios de reflexão com $c_3 > c_2 > c_1$.

2.2.2 Fonte sísmica

Uma fonte sísmica é definida como um dispositivo que libera energia na forma de ondas sonoras. Segundo Landrø e Amundsen [43], a principal fonte sísmica utilizada na exploração dos oceanos é o *airgun*, muito utilizado desde os anos de 1970.

Ao escolher uma fonte para geração de sinal acústico deve-se levar em conta aspectos como a eficiência, custo, a segurança de aplicabilidade, repetibilidade, impacto no ambiente e quantidade de energia na banda de frequência desejada.

Sistemas sísmicos podem ser categorizados entre banda larga (impulsivos) ou banda limitada (ressonantes) baseado nas características espectrais da assinatura da fonte. Os sistemas truncados (banda limitada) normalmente utilizam transdutores

ressonantes e são aplicados a substratos mais macios devido à sua limitação de potência [44]. Como diferentes bandas de frequência são úteis para diferentes tipos de estudo, os pulsos de espectro largo são mais comumente utilizados [40]. As fontes explosivas foram amplamente utilizadas para a exploração de objetos enterrados. Contudo, os aspectos de segurança e dificuldade de repetibilidade fizeram com que estas técnicas parassem de ser empregadas. Com isso, algumas fontes capazes de gerar espectros de banda larga foram desenvolvidas para aplicação rápida e contínua.

Quanto maior a potência e menor a frequência do sinal, mais as ondas sonoras penetrarão no substrato marinho. Sendo assim, cada tipo de fonte sísmica possui um propósito de uso [45].

Os sonares ativos utilizam uma fonte para a geração de energia acústica. Normalmente, há a conversão a partir da energia elétrica. Em alguns sistemas a fonte é utilizada como receptor de forma a economizar peso, espaço e dinheiro [1]. A seguir, uma breve descrição sobre alguns tipos de fonte é apresentada.

Airgun

O *airgun* é formado por uma câmara de ar comprimido que é liberado rapidamente para a coluna d'água, gerando uma bolha de ar que quando se colapsa gera um pulso acústico. Este tipo de fonte é amplamente utilizada pela repetibilidade e confiabilidade da assinatura espectral do sinal gerado. Além disso, por usar ar para a geração do sinal, se torna um método barato e acessível [43].

É usualmente utilizado em ensaios 2D, 3D e 4D e quase sempre é composto por sub-arranjos. A saída deste tipo de fonte é diretamente proporcional à pressão de operação e aumenta com a raiz cúbica do volume das câmaras de ar.

Watergun

De acordo com Parkes e Hatton [46], o *watergun* é uma

fonte implosiva formada por duas câmaras, sendo que uma delas está preenchida por ar. No momento do disparo, o ar é liberado e força a água da segunda câmara a ser ejetada de forma violenta, que gera uma cavidade que colapsa, gerando o pulso.

Basicamente, o primeiro pico máximo da assinatura do *watergun* ocorre decorrente da implosão da cavidade, que é seguido por um padrão de baixa frequência devido a expansão da água. A radiação é, em geral, de banda larga e vai até altas frequências.

Fontes controladas

São fontes mais sofisticadas capazes de gerar sinais conhecidos, o que faz com que suas configurações sejam complicadas. Operam mediante a utilização de potência elétrica ou hidráulica a fim de conduzir uma oscilação. A vantagem é que pode-se projetar um sinal controlado em direção à subsuperfície. O sinal é geralmente um *sweep* de frequências em um intervalo de tempo. Desta forma, o nível de pressão sonora instantâneo é bem menor em comparação ao de um *air gun*.

Um dos exemplos de fonte controlada é o *Vibroseis*, dispositivo que utiliza vibrações mecânicas como fonte de energia. O controle deste tipo de equipamento é muito complexo devido à retroalimentação não linear e sua resposta em baixas frequências não é satisfatória, o que faz com que a probabilidade de imageamento de alvos em subsuperfície seja baixa.

As fontes controladas podem também ser contruídas com materiais piezolétricos, que quando submetidos a cargas elétricas geram uma tensão mecânica de vibração. Este tipo de fonte pode ser programada para enviar pulsos conhecidos gerados por meio de computadores. Este tipo de fonte facilita o estudo dos fenômenos de propagação.

Fonte explosivas

São as de conceito mais simples. Não são utilizadas com recorrência mas possuem importância histórica [46]. Normalmente, utilizam cargas pequenas de material explosivo. Quando uma explosão é iniciada uma onda de pressão se propaga pelo meio. Esta onda faz parte de um conjunto de fenômenos que ocorrem durante a conversão de uma explosão de sólidos em produtos gasosos.

O lado positivo é que a fonte é livre, não há a presença de cabos. Além disso, permitem um pulso curto de banda larga de alta potência que é útil quando a resolução radial é importante. Do lado negativo, tem-se o fato de que não permitem uma repetição para que uma comparação seja feita. Além disso, a combinação entre não-direcionalidade e alta potência faz com que haja uma reverberação de fundo que pode mascarar o sinal real. E, por último, a assinatura de uma fonte explosiva não pode ter seu espectro alterado [1].

Segundo Parkes e Hatton [46], é comum empregar um arranjo de fontes. A junção de algumas fontes sonoras é uma alternativa para o aumento da potência enviada ao ambiente, isso porque o aumento do tamanho de uma fonte sonora pode se tornar não prático e alterar as características espectrais do sinal gerado. Um aumento de N vezes na potência emitida por um arranjo de fontes pode ser obtido por meio da combinação de N fontes, mantendo assim as características espectrais.

Além disso, é comum a combinação de diferentes tipos de fontes sonoras, com características espectrais distintas, para que o sinal resultante atinja a largura de banda desejada. Técnicas de posicionamento, tempo de disparo e combinação de espectros devem ser levadas em conta para esse tipo de arranjo. Deve-se prestar atenção na interferência que uma fonte exerce sobre as outras do arranjo.

Para que determinada fonte possa ser utilizada para um interesse específico, deve-se ter um conhecimento detalhado dos campos de radiação e assinatura dos pulsos emitidos[46]. Além disso, o conhecimento do pulso permite a deconvolução do dado ao processá-lo. É comum, uma aproximação do pulso enviado pela fonte como sendo a assinatura do sinal medido no campo considerado distante da fonte, por meio de sensores de pressão sonora estrategicamente posicionados.

O pulso ideal emitido por uma fonte deveria ser um Delta de Dirac ou Impulso unitário. Tendo isto em vista, pulsos de curta duração e grande amplitude são desejáveis. Como normalmente não se tem o conhecimento do pulso da fonte, é desejável que a fonte sonora tenha repetibilidade e estabilidade.

2.2.2.1 Tipos de pulso sonoro

Os pulsos sonoros enviados ao meio através das fontes podem ser categorizados e modelados de diversas formas. *Wavelet* é um termo utilizado para descrever uma série temporal curta. Em sismica pode ser considerado como um agrupamento de componentes de efeito de filtro da Terra [47]. Dentre estes componentes destacam-se a assinatura da fonte sonora, reflexões múltiplas e atenuação inelástica. Porém, a maioria das vezes refere-se ao *wavelet* como sendo o pulso enviado pela fonte.

Um único espectro de amplitude pode possuir várias formas no tempo ao variar o espectro da fase do pulso [48]. Existem três casos especiais de pulso levando em conta seu espectro de fase: o de fase mínima, o de fase zero e o de fase mista.

Fase mínima

Para este tipo de pulso a energia é concentrada nos primeiros instantes e segue o princípio da causalidade¹². O pulso ideal seria Delta de Dirac, o qual excita todas as frequências de forma

¹²Um evento causal segue a condição de que seu início se dá apenas após o instante zero.

igual, porém o pulso de fase mínima é o que mais se aproxima deste em casos reais [48].

Pulsos de fase mínima, além de causais, são estáveis devido ao fato de que os polos da Transformada Z devem estar dentro do círculo unitário. Além disso, para que seus inversos também sejam estáveis, considera-se que os zeros da Transformada Z (os zeros do pulso original vão se transformar nos polos da inversa) também estão dentro do círculo unitário. Para mais detalhes sobre este tipo de pulso, consultar Oppenheim e Schaffer [49].

Desta forma, é interessante buscar a emissão de pulsos de fase mínima ao ambiente. Caso não seja possível, ao processar dados sísmicos, o pulso enviado pela fonte pode ser convertido em fase mínima para que algumas etapas do processamento funcionem de forma mais eficiente devido à sua estabilidade.

Para ilustrar um pulso de fase mínima implementou-se uma função de cosseno amortecido dado por

$$x(t) = \cos(2\pi ft) e^{-\pi\lambda^2 t^2} \quad (2.17)$$

na qual, f é a frequência e λ o fator de decaimento da exponencial. Um pulso com $f = 50\text{Hz}$ e $\lambda = 50$ está exposto na Figura 2.12 (a), junto com sua fase (Figura 2.12 (b)) e de seu espectro de magnitude (Figura 2.12 (c)).

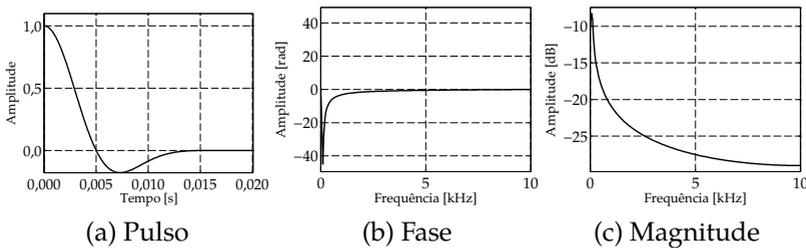


Figura 2.12.: Exemplo de pulso de fase mínima.

Fase zero

Pulsos de fase zero são considerados não causais por possuírem o pico máximo e simetria centrados no instante zero. A não-causalidade torna este tipo de pulso fisicamente impossível, porém este pode auxiliar em algumas etapas do processamento.

Um caso especial de pulso de fase zero muito utilizado na modelagem de traços sísmicos é o pulso de Ricker, descrito pelo geofísico americano Norman Ricker. Por definição é um pulso de fase zero porém um pulso equivalente de fase mínima pode ser construído [48]. É amplamente utilizado devido à sua simplicidade. Sua representação no domínio do tempo (t) pode ser dada pela segunda derivada da função Gaussiana [50]:

$$x(t) = (1 - 2\pi^2 f_M^2 t^2) e^{-\pi^2 f_M^2 t^2}, \quad (2.18)$$

na qual f_M é a frequência de pico do pulso. A Figura 2.13 (a) expõe um pulso de Ricker de 0,03 s e frequência de pico de 80 Hz, a Figura 2.13 (b) ilustra a sua fase e a Figura 2.13 (c) o seu espectro de magnitude.

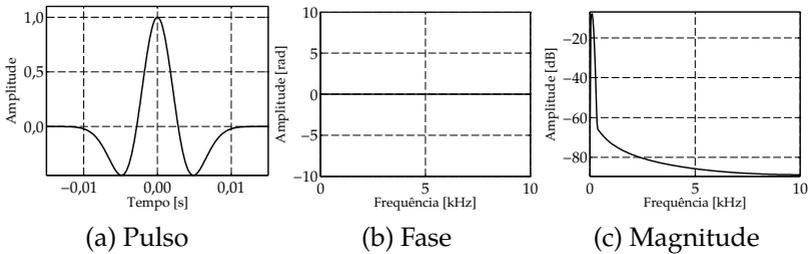


Figura 2.13.: Exemplo de pulso de fase zero.

Fase mista

Pulsos que não possuem fase mínima ou zero enquadram-se na categoria de fase mista. A Figura 2.14 (a) ilustra um sinal do tipo *chirp*, no domínio do tempo, de 0,1 s com frequências

indo de 800 Hz a 8 kHz modulado por uma janela gaussiana nos primeiros e últimos 2,5% do sinal. Este tipo de sinal é caracterizado por excitar uma faixa de frequência crescente (ou decrescente) com o tempo do pulso. Pode ser referenciado como um *sweep*. A Figura 2.14 (b) ilustra a característica de fase mista do sinal e a Figura 2.14 (c) o seu espectro de magnitude.

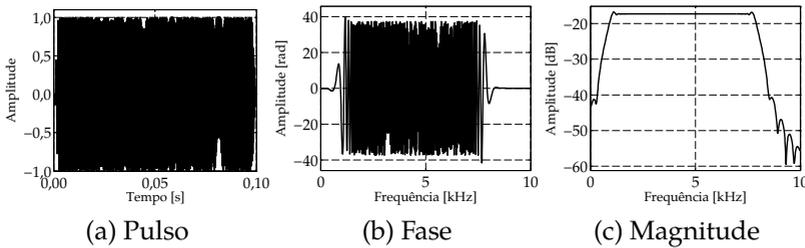


Figura 2.14.: Exemplo de pulso de fase mista.

2.2.3 Arranjos de hidrofones rebocados

Sensores de pressão sonora para a coluna d'água capazes de captar o sinal acústico que se propaga são denominados hidrofones. Os hidrofones convertem os sinais de pressão captados em diferença de potencial elétrico [39]. Em geral, os hidrofones são mais simples que as fontes sonoras [51]. A maioria dos sensores é confeccionado utilizando materiais piezoelétricos que convertem a energia mecânica em elétrica [52].

Alguns fatores devem ser levados em conta ao selecionar um hidrofone, incluindo a sensibilidade, a resposta em frequência, a durabilidade e o custo. Um bom hidrofone deve trabalhar em largas banda de frequências e faixa dinâmica, ter uma resposta em frequência plana¹³, possuir baixo ruído instrínseco e influência mínima sob o campo de pressão medido.

É comum a utilização de um arranjo de hidrofones, ou

¹³Com o espectro plano, o hidrofone responde igualmente a todas as frequências de excitação, sem atenuar ou amplificar alguma em específico.

streamer, para a aquisição de um volume maior de dados simultaneamente. O *streamer* é composto por cinco componentes principais: hidrofones, módulos eletrônicos, componentes de sustentação, sistema de transmissão elétrica e a envoltória dos cabos. É comum que o arranjo seja preenchido por fluido isolador elétrico, com densidade específica para que o arranjo tenha uma flutuação natural. Usou-se muito o querosene, composto orgânico que poderia evaporar em caso de derramamentos. Atualmente, é comum a utilização de dois fluidos: um óleo puramente sintético e o óleo de mamona.

Avanços recentes em tecnologia de cabos levaram os arranjos sísmicos a um outro patamar, deixando o arranjo preenchido de lado e passando-se a trabalhar com cabo sólido composto de espuma extrudada, onde o conteúdo fluido é minimizado ou completamente removido. Este tipo de arranjo é mais robusto e resistente a danos e menos sensível a ruídos. Outra variação é o preenchimento de cabos com gel, que engloba algumas das vantagens do preenchido por fluido, como a facilidade de confecção e de manuseamento de componentes e com a vantagem de não permitir vazamentos.

O comprimento do arranjo depende da profundidade e das características da região e do objeto de estudo. Já a profundidade de reboque deve levar em consideração a distância de fontes de ruído como ondas e vento e os "efeitos fantasmas"¹⁴. Quanto maior a profundidade a que o *streamer* é rebocado, mais imune aos ruídos externos o levantamento estará. O intuito do ensaio irá ditar a que profundidade a estrutura deve estar. Alguns componentes podem ser acoplados ao arranjo de hidrofones, como um controlador de profundidade e uma unidade de posicionamento acústico.

¹⁴Artefatos criados na imagem sísmica que geram ambiguidades na interpretação.

2.2.4 Arranjos bidimensionais e tridimensionais

Dependendo da área de aplicação, os detalhes do ensaio podem variar de forma significativa. Mas há, contudo, duas categorias principais de ensaios sísmicos: os bidimensionais e os tridimensionais. Os em 2D podem ser interpretados como ensaios básicos mas apesar da simplicidade em algumas hipóteses, foi e ainda é amplamente utilizado, principalmente na indústria de óleo e gás. Já os ensaios em 3D, são de uma complexidade maior e envolvem um maior investimento e equipamentos mais sofisticados [39].

Até o início dos anos de 1980, a aplicação de sísmica 2D dominou a exploração de óleo e gás, mas ao final do século XX, a sísmica de reflexão 3D tomou o lugar da sísmica 2D. Ensaios 3D passaram a ser a regra e deixaram de ser a exceção [39, 53], devido ao desenvolvimento de novos arranjos rebocados e de tecnologias de posicionamento.

Os ensaios 4D são, basicamente, ensaios 3D repetidos no tempo sob uma mesma área. Possuem o intuito observação do comportamento temporal de determinadas regiões, principalmente de reservatórios.

Segundo Cooper [54], dados sísmicos 2D são gravados utilizando linha fina de receptores próximos à superfície, as reflexões da subsuperfície são tidas como exatamente abaixo da linha de navegação. Mas deve-se levar em conta que devido às atividades hidrodinâmicas locais, o arranjo não é rebocado exatamente abaixo da linha de navegação, e sim, possui um desvio lateral [39], que para o caso bidimensional não é tão crucial quanto para os tridimensionais. O efeito do desvio lateral é ilustrado na Figura 2.15, na qual tem-se uma embarcação rebocando uma fonte e um arranjo de hidrofones com um desvio da navegação com ângulo θ_{lat} .

Já um sistema 3D utiliza-se de várias linhas de receptores. Desta forma, segundo Biondi [53] e Bacon et al. [8], um levantamento 2D fornece dados na forma de “fatias” de informações

com um espaçamento grande entre os dados. O acoplamento entre as informações obtidas via métodos 2D podem carregar ruído, conter migrações errôneas e múltiplas reflexões, isso porque a interpretação do conteúdo da subsuperfície entre as linhas levantadas pode ser problemático e com baixa precisão [39]. Já o levantamento em 3D possibilita a aquisição de informações a respeito da área de forma contínua, evitando erros relacionados a junção das informações, realizada na técnica 2D. Desta forma, a leitura de dados adquiridos em 3D é mais fácil por não apresentar as ambiguidades que estão presentes nos dados 2D devido às interpolações realizadas.

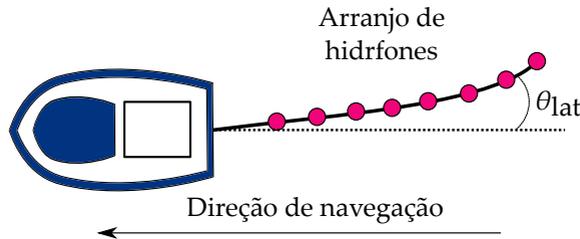


Figura 2.15.: Desvio lateral de arranjo rebocado.

Para um sistema bidimensional de aquisição de dados sísmicos a qualidade da imagem é controlada principalmente por profundidade do alvo, distância dos receptores e tempo entre pulsos emitidos. Na técnica 3D a qualidade é função da distância fonte-receptores e da quantidade de receptores que o sistema apresenta [53].

As imagens em 3D apresentam alguns problemas causados pela grande dimensão dos dados [53]. Dados tridimensionais são definidos em um espaço 5D enquanto os bidimensionais em um 3D. A cinco dimensões são tempo de gravação, componentes da posição da fonte (x_s, y_s) e componentes da posição do receptor (x_g, y_g). Além disso, a grande quantidade de dados gerada por estes sistemas dificulta o processamento, armazenamento e visualização da informação. Deve-se, desta forma, otimizar

o processamento visando diminuir custos sem comprometer a qualidade das imagens.

Tendo estas questões em vista, a abordagem 3D é a preferida pelos geocientistas para a aquisição de informações sobre a subsuperfície marinha, cerca de 90% das informações sísmicas marinhas adquiridas ao redor do mundo são provenientes de ensaios 3D [39].

2.3 Processamento de dados sísmicos

Desde que houve a introdução ao registro digital de dados sísmicos, uma sequência de rotinas de processamento vem evoluindo. Define-se, baseando-se em [8, 9, 55], quatro blocos de etapas no processamento de dados sísmicos que englobam as etapas primárias do processamento: o pré-processamento dos dados, a deconvolução, o empilhamento e a migração dos dados. Outras etapas, as chamadas secundárias, são de grande importância para o processamento e auxiliam no aprimoramento das primárias [9].

Sistemas de processamento de sinais sísmicos contém centenas de algoritmos e apresentam diversas formas de resolver uma questão. Fica a critério do responsável pelo processamento testar técnicas e parâmetros distintos até estar satisfeito com os resultados obtidos.

2.3.1 Exibição e edição de traços sísmicos

A preparação e o condicionamento dos dados são de extrema importância para o processamento de dados sísmicos [55]. Nesta etapa é possível a correção de forma efetiva de possíveis erros e anomalias provenientes da aquisição e do armazenamento de dados. Estão inclusas nesse bloco etapas como a retirada de reflexões múltiplas, reformatação, edição de traços sísmicos, aplicação de ganhos ao dado e configuração da geometria de campo.

Deve-se, antes de tudo, analisar de forma detalhada os dados e suas informações sobre a aquisição em campo, geralmente agrupadas em um cabeçalho (ou *header*) que acompanha o conjunto de dados. Normalmente o dado e o cabeçalho com informações são gravados em fitas ou discos rígidos em formatos como SEG-Y¹⁵. O Apêndice A relaciona as palavras-chave utilizadas em cabeçalhos SEG-Y com a informação que armazenam.

Uma análise que deve ser realizada está ilustrada na Figura 2.16 (a) e expõe a quantidade de traços obtidos a cada um dos disparos. Utilizou-se de um exemplo no qual tem-se uma fonte, 48 receptores e foram realizados 25 disparos através da fonte, sendo que todos os hidrofones gravaram os dados de todos os disparos. Desta forma, como pode-se observar, será obtido um total de 1200 traços.

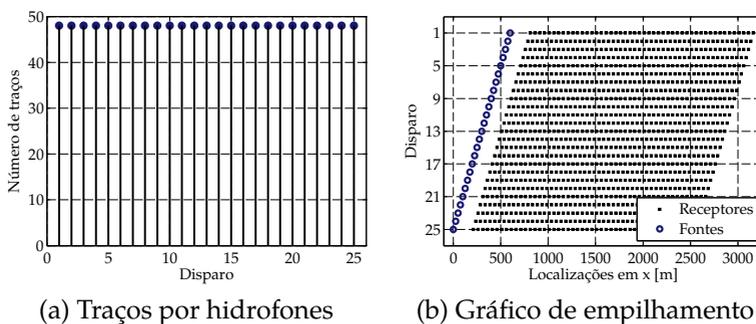


Figura 2.16.: Análise da geometria dos traços sísmicos.

Pode-se também observar o padrão de aquisição de dados através do gráfico do empilhamento. Na Figura 2.16 (b), se tem as 25 posições do arranjo fonte-receptores (arranjo unidimensional – uma fonte e 48 hidrofones arranjados em linha), afastadas por 25 m na linha de aquisição. Fonte e primeiro receptor estão

¹⁵Formato padrão da Sociedade dos Geofísicos de exploração para armazenamento de dados geofísicos.

afastados por 211 m e receptores estão afastados 50 m entre si. Desta forma, o arranjo tem um total de 2611 m e a linha obtida a cada disparo 2400 m. Os dados são adquiridos sob uma mesma região múltiplas vezes durante a navegação para que haja mais dados a serem combinados em prol de informações mais precisas. Outras análises sobre o padrão de aquisição e armazenamento de dados podem ser feitas para o entendimento da coleta.

Os traços sísmicos podem ser exibidos de formas variadas. A escolha da maneira e da escala em que um dado vai ser observado depende do objetivo do observador. As principais formas de expor os traços sísmicos são: (1) em *wiggle* (Figura 2.17 (a)), na qual as amplitudes dos traços são plotados como uma função do tempo; (2) em área variável (Figura 2.17 (b)), muito semelhante à *wiggle*, e com preenchimento da área negativa ou positiva com cor, para que eventos coerentes tornem-se evidenciados e (3) a exibição por densidade variável (Figura 2.17 (c)), na qual os valores de amplitude são visualizados através da intensidade de cores, mais utilizada para casos em que haverá a interpretação.

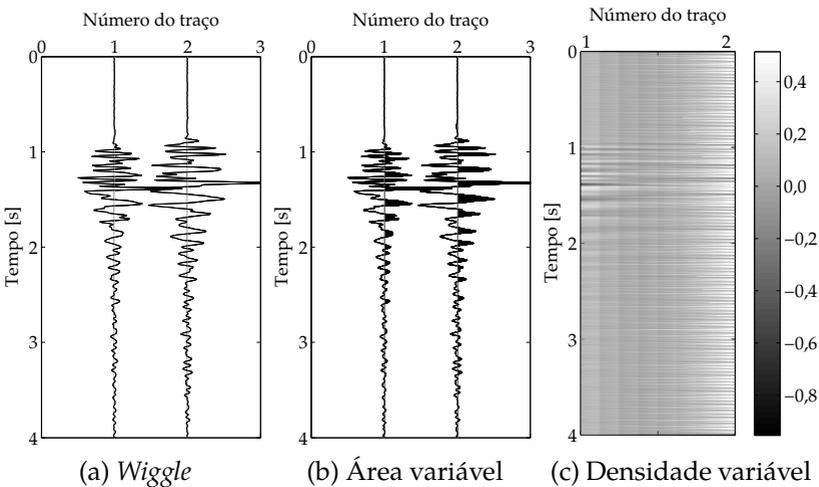


Figura 2.17.: Dois traços sísmicos exibidos em três formas.

Alguns ajustes nos dados sísmicos devem ser feitos antes do processamento em si, as chamadas etapas do pré-processamento. São nessas etapas em que os dados são preparados para que sejam processados de forma correta a fim de obter uma boa imagem da subsuperfície [55].

Demultiplexação

O dado sísmico, quando adquirido, é gravado em uma matriz $M \times N$, na qual M é o tempo e N é o canal de gravação. Para que os dados possam ser visualizados em forma de traços sísmico, em sequência temporal, é realizada a demultiplexação [9]. Nesta etapa a matriz de dados é transposta para que os traços no tempo sejam dispostos lado-a-lado para cada um dos hidrofones de medição (Figura 2.18). Em geral, este processo é realizado ainda em campo [55]. Com isso, as colunas da matriz de dados podem ser lidas como traços sísmicos de amplitude pelo tempo [9].

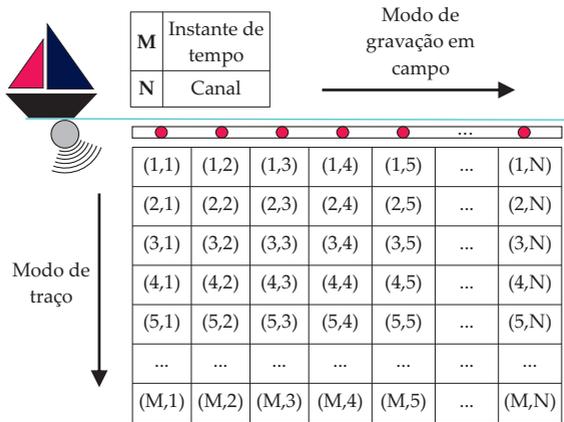


Figura 2.18.: Aquisição e demultiplexação de dados. Adaptado de Yilmaz [9].

Reformatação

Nesta etapa o dado é convertido de um formato sísmico

digital, por exemplo, SEG-Y, para outro formato conveniente para o processamento, por exemplo, .mat, para que seja utilizado o *software* comercial Matlab[®]. Existem algumas rotinas já implementadas, como por exemplo a feita por Hansen [56], que são capazes de fazer esta leitura e preparar o dado para que seja lido e processado.

Configuração da geometria

Realiza-se a inserção das informações sobre a geometria de aquisição no cabeçalho dos dados, ou *header*, de forma a associar corretamente cada traço ao seu respectivo disparo, *offset*¹⁶, canal e CMP [55]. As informações que, normalmente, estão no cabeçalho estão listadas no Apêndice A.

Segundo Yilmaz [9], muitos dos problemas de processamento de dados sísmicos são provenientes da má inserção da configuração de aquisição de campo.

Edição de traços

Alguns traços podem apresentar erros de medição, problemas devido a medições indesejáveis ou nos dispositivos de trabalho. Estes traços são considerados *outliers*, e por serem discrepantes não agregam valor e podem comprometer o processamento e interpretação. Com isso, estes traços devem ser zerados ou silenciados.

Aplicação de ganhos

Devem ser aplicadas aos dados sísmicos correções de amplitude para cobrir os decaimentos por absorção e divergência geométrica mencionadas na Subseção 2.1.3. Existem diversas formas de aplicar ganhos para que os traços fiquem corretamente escalados.

A aplicação de ganhos interfere na amplitude do sinal, desta forma, deve ser aplicada com muita cautela para que não

¹⁶Distância entre fonte e receptor.

interfira no resultado final. Deve-se apenas aplicá-la quando for necessário ressaltar artefatos e, inclusive, pode ser removida em determinados estágios do processamento.

Segundo Mousa e Al-Shuhail [55], existem dois tipos de aplicação de ganho: as dependentes (programadas) e as independentes do dado (automáticas).

Classificação CMP

Após as primeiras etapas, tem-se a classificação CMP, que nada mais é que a transformação do formato de receptor comum para o formato ponto-médio comum (CMP), como ilustrada nas Figuras 2.10. O formato CMP é gerado por gravações redundantes que aumentam a relação sinal ruído. Além disso, auxilia na atenuação de ruído coerente, isso porque o sinal refletido e o ruído coerente possuem velocidades distintas de empilhamento dependendo do instante de aquisição [9]. Quando empilhados, há a eliminação do ruído coerente.

2.3.2 Análise de espectro e filtragem dos dados

Após o pré-processamento, deve-se filtrar o sinal com a intenção de atenuar componentes indesejáveis do dado sísmico baseando-se em algumas propriedades mensuráveis [55]. Isso porque o dado pode estar corrompido com a presença de energia indesejável proveniente de outras fontes, que deve ser filtrado para que as informações úteis possam ser extraídas. Esse tipo de ruído pode ser considerado aleatório, ou seja, sem coerência com o dado, ou não aleatório, ou seja, apresenta coerência com o dado. Deve-se, portanto, realizar uma análise espectral a fim de obter informações sobre as energias indesejáveis.

Normalmente, os eventos sísmicos são coerentes e são concentrados em uma faixa de frequência. Já os ruídos, além de serem pouco coerentes, apresentam uma característica mais esparsa no domínio espectral.

Consideram-se ruídos aleatórios os que não apresentam coerência na fase entre traços subsequentes. Normalmente, essa energia não desejada não está relacionada com a fonte geradora dos sinais sísmicos. Existem alguns métodos que auxiliam na retirada desse tipo de ruído. O empilhamento, por exemplo, ao trabalhar com a repetitividade dos dados, melhora consideravelmente a relação sinal/ruído. Já os ruídos coerentes são gerados pela própria fonte sísmica e adicionados aos sinais emitidos. Suas fases são consistentes em traços subsequentes. As reflexões múltiplas são bons exemplos deste tipo de ruído. Se não for corretamente retirado, este tipo de ruído pode atrapalhar a interpretação geológica da área.

Pode-se realizar a análise espectral em uma dimensão (tempo ou espaço) ou em até duas dimensões, obtendo espectros do tipo frequência-espaço ($f - x$) e frequência-número de onda ($f - k$). As Figura 2.19 (b) e Figura 2.19 (c) exibem o conteúdo espectral obtido através da Transformada de Fourier para um conjunto de quatro traços, exibidos em Figura 2.19 (a). São formas distintas de representar o espectro. Os espectros permite que se observe as frequências de maior amplitude e permita minimizar as frequências referentes a ruído.

A fim de amenizar frequências fora da faixa de interesse pode-se aplicar, por exemplo, filtros passa-alta, passa-baixa ou passa-banda [57]. É comum ter uma faixa de frequência de interesse, fazendo com que filtros passa-banda (BPF) sejam amplamente utilizados. Um BPF ideal possui banda de frequência de interesse constante e plana e é capaz de atenuar totalmente as bandas fora da faixa de interesse. A passagem da faixa de interesse para a que deve ser atenuada deve ser o mais suave possível no domínio da frequência. Mas na prática, nenhum filtro é ideal.

Aplicou-se um filtro passa-banda com frequências de corte de 20 Hz e 55 Hz aos traços da Figura 2.19 e os resultados estão dispostos na Figura 2.20, na qual percebe-se a presença de um erro de vazamento.

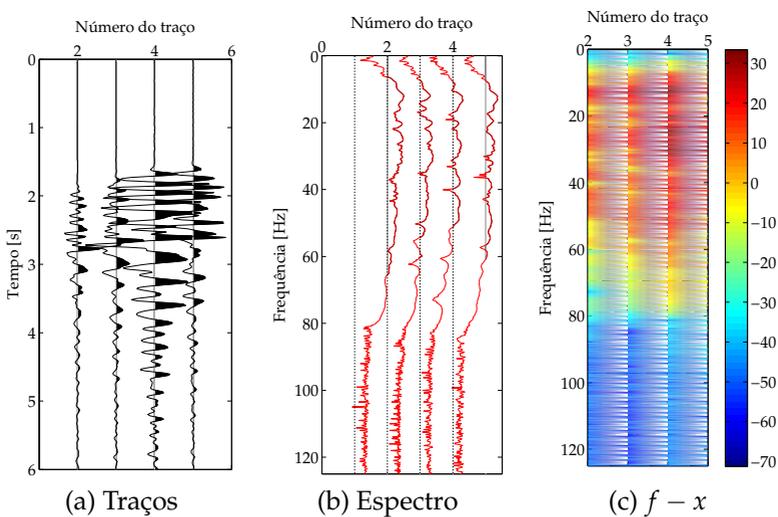


Figura 2.19.: Traços sísmicos com seus respectivos espectro de magnitude e a representação $f - x$.

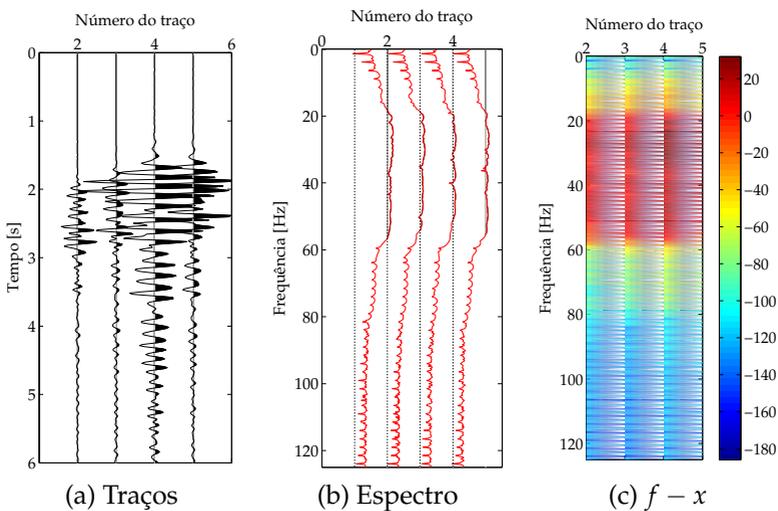


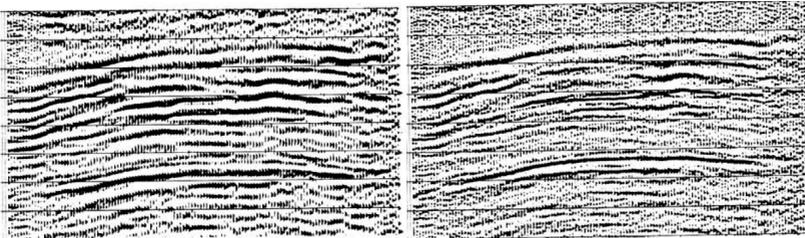
Figura 2.20.: Traços sísmicos, espectros de magnitude e representação $f - x$ após a aplicação de BPF.

Segundo Naghizadeh [58], a atenuação de ruído de dados sísmicos é considerada um passo-chave, uma vez que um dado limpo pode aumentar consideravelmente a resolução das imagens sísmicas geradas.

2.3.3 Deconvolução

A deconvolução age no eixo do tempo, buscando reduzir a influência do pulso da fonte sobre o sinal recebido para que informações do substrato sejam adquiridas de forma mais fiel, melhorando a resolução temporal do dado [9]. A Figura 2.21 ilustra dados de uma seção geológica antes e após a aplicação de um algoritmo de deconvolução. É possível perceber os detalhes da seção geológica com a aplicação da deconvolução na Figura 2.21 (b) quando compara-se à Figura 2.21 (a), seção sem a aplicação de algoritmos de deconvolução, visivelmente mais "desfocada" e confusa.

Existem diversas formas de realizar a deconvolução dos dados sísmicos e algumas técnicas para contornar os problemas de aplicação desta etapa do processamento. A deconvolução será discutida de forma detalhada nos Capítulos 3 e 4 deste documento.



(a) Antes da deconvolução

(b) Após a deconvolução

Figura 2.21.: Seção sísmica antes e após a aplicação da deconvolução. Retirado de Yilmaz [9].

2.3.4 Empilhamento

Após as etapas iniciais, o dado deve ser preparado para a realização do empilhamento das informações sobre um mesmo ponto da região investigada. Para isso o dado deve estar organizado em CMP, uma análise das velocidades em cada uma das camadas geológicas e a correção de sobretempo devem ser realizadas [55].

É importante a estimativa das velocidades de propagação da onda sonora pelas camadas geológicas pelas quais passa para que os dados possam ser corrigidos e empilhados. Como o tempo duplo de propagação (TWTT¹⁷) é a única variável medida, a estimativa da profundidade do refletor (produto entre o tempo de ida – ou volta – e a velocidade na camada, como ilustrado na Figura 2.22) requer a velocidade de propagação nas estruturas, o que coloca grande dificuldade no método. Esse fato faz da análise de velocidade uma etapa fundamental para a solução de problemas de subsuperfície.

Para uma camada da subsuperfície horizontal e com velocidade constante, a curva de TWTT em função do *offset* se torna uma hiperbole [9]. Isso ocorre pois dependendo da distância entre fontes e receptores haverá mudança contínua no tempo de chegada aos sensores de pressão. A diferença entre os TWTT das posições do arranjo e os TWTT do ponto de referência (*offset* zero) é o chamado *normal moveout*. O hidrofone posicionado em *offset* zero traz a informação sobre o menor tempo entre fonte e receptor, e segundo Yilmaz [9], para um caso de uma camada horizontal com interfaces planas, através da triangulação, chega-se a

$$t(x)^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{c^2}, \quad (2.19)$$

na qual $t(x)$ é o TWTT das posições que não estão em *offset* zero,

¹⁷Do inglês: *Two-way-travel time*.

t_0 é o TWTT em posição de *offset* zero, x é a distância do receptor ao *offset* zero e c é a velocidade de propagação na camada. A Eq. (2.19) é equivalente a uma hipérbole no plano de TWTT e *offset*.

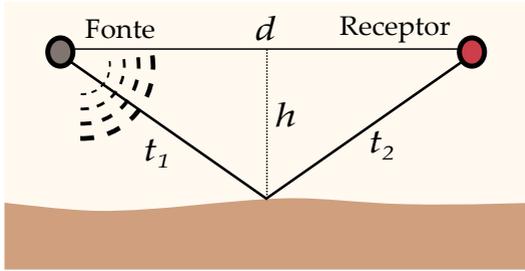


Figura 2.22.: Triangulação de tempos, profundidade e distância entre fonte e receptor.

Um exemplo do efeito *moveout* é exposto na Figura 2.23 (a), na qual simulou-se a recepção de 55 traços em 27 hidrofones dipostos à direita da fonte, 27 à esquerda e um em mesma posição.

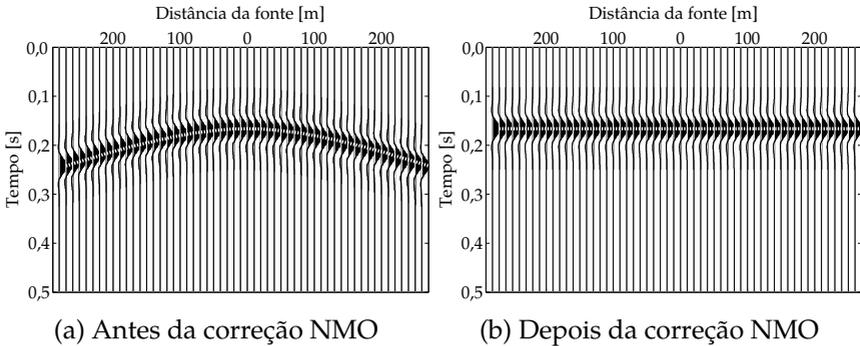


Figura 2.23.: Correção do efeito NMO. Adaptado de [59].

Para realizar a correção NMO¹⁸, deve-se retirar o atraso devido

¹⁸Do inglês: *Normal moveout*.

à distância da fonte dado por

$$\Delta t_{\text{nmo}} = t(x) - t_0, \quad (2.20)$$

considerando $t(x)$ aproximado pela Eq. (2.19):

$$\Delta t_{\text{nmo}} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{c^2}} - t_0. \quad (2.21)$$

Desta forma os traços corrigidos são obtidos:

$$t'(x) = t(x) - \Delta t_{\text{nmo}} \quad \text{ou} \quad (2.22)$$

$$t'(x) = t(x) - \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{c^2}} + t_0, \quad (2.23)$$

nas quais $t'(x)$ são os tempos dos traços com os efeito *moveout* corrigido, retirando o efeito da posição dos receptores, como ilustra a Figura 2.23 (b).

Correções para o efeito NMO em circunstâncias mais específicas tornam-se mais complicadas. Formas de solucionar estes problemas são encontradas em Yilmaz [9].

O empilhamento em si, é uma técnica de aprimoramento do sinal por meio da sobreposição gerada pela aquisição de informações acústicas de um mesmo ponto por vários sensores. Ou seja, através da soma (ou média) dos traços sobre um mesmo ponto, é possível eliminar ruído coerente e incoerente [55]. O empilhamento, apesar de simples, é etapa fundamental e permite uma primeira visualização da imagem da subsuperfície.

2.3.5 Migração

Quando o alvo refletor é horizontal, o ponto onde ocorre a reflexão da onda sonora incidente localiza-se abaixo do ponto médio entre a fonte e o receptor como expõe a Figura 2.24 (a). Mas se o refletor possui uma certa inclinação ou heterogenei-

dade, o ponto de reflexão não localiza-se exatamente abaixo do ponto médio, e sim deslocado, como mostra a Figura 2.24 (b). Quanto mais inclinado o refletor, mais distante do ponto-médio estará o ponto de reflexão [60].

A migração é o processo que reposiciona refletores oblíquos para uma posição mais próxima da sua real localização e de seu tempo. Esse processo é necessário pois fundos inclinados aparecem distorcidos nas imagens obtidas, dificultando a interpretação dos dados. A migração tem a função de retirar as distorções e tornar o dado o mais realístico possível. O processo faz com que o sinal refletido seja movido lateralmente e verticalmente para a real posição. Age como uma deconvolução no espaço e melhora a resolução espacial. Existem diversas técnicas de migração, que são descritas em [8, 9].

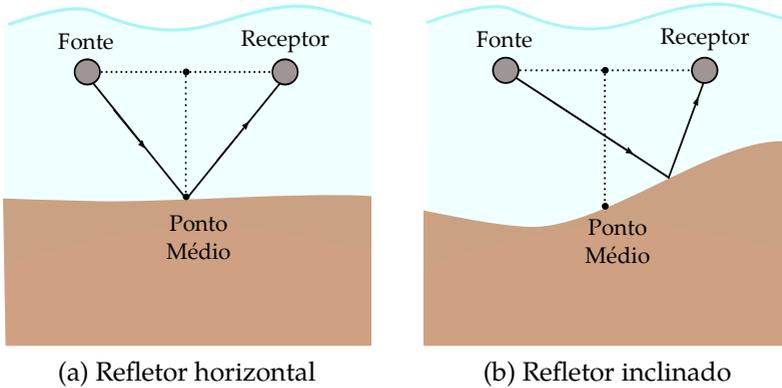


Figura 2.24.: Efeito da reflexão e localização do ponto da reflexão em relação ao ponto médio em refletores horizontais e inclinados.

3 Deconvolução

Segundo Leinbach [47], enquanto trabalhava para a predição de mísseis inimigos durante a Segunda Grande Guerra, Norbert Wiener desenvolveu um procedimento estatístico para separar sinais de radar de ruído indesejado. Ao processo, primeiramente, foram dados os nomes de "suavização" ou "filtragem de previsão de Wiener" seguidos por "decomposição". Nos dias atuais é referido como deconvolução.

De acordo com Yilmaz [9], a deconvolução busca a melhoria da resolução temporal do dado sísmico por meio da diminuição da contribuição do pulso enviado pela fonte. Na prática, a deconvolução retira o efeito borrado do dado sísmico e torna as reflexões na subsuperfície muito mais evidentes na imagem da seção geológica gerada.

Tem-se interesse em obter informações sobre a refletividade do fundo com precisão e a maior resolução possível por muitas razões [61]. Por exemplo, grandes reflexões podem indicar camadas de areia nas quais é possível encontrar reservatórios de hidrocarbonetos. A extensão dessas áreas pode influenciar no investimento de exploração e exploração.

De acordo com Wadsworth et al. [62], é possível dividir a deconvolução em dois grandes grupos: probabilística e determinística. Segundo Yilmaz [9], os métodos determinísticos são aplicados quando se tem conhecimento sobre a forma da onda sonora enviada pela fonte, já os métodos probabilísticos consistem na utilização de teorias estatísticas para a obtenção desta. Existem algumas formas de obter o pulso enviado pela

fonte e uma delas é a medição direta no local de aquisição [61]. A partir do momento em que se tem o pulso enviado pela fonte é possível obter a refletividade do ambiente através de diversas técnicas que serão discutidas posteriormente.

Neste trabalho três técnicas determinísticas de deconvolução serão aplicadas, partindo do princípio de que há conhecimento prévio da forma do pulso enviado. Além destas, uma técnica probabilística será aplicada supondo falta do conhecimento sobre a forma do pulso.

3.1 Modelo convolucional

Deve-se entender o processo da convolução antes de seu inverso, a deconvolução. Considera-se um sinal de entrada $x(t)$ em um sistema e uma saída $y(t)$ (Figura 3.1). A entrada é o sinal enviado pela fonte sonora, o sistema é o meio de propagação e a resposta é o traço sísmico obtido. Aqui, assume-se a linearidade e a estacionaridade do sistema. Uma forma usual de descrever um sistema linear é através de sua resposta impulsiva, $h(t)$: a sua resposta a uma entrada impulsiva ideal [57].



Figura 3.1.: Entrada e saída de um sistema

Segundo Shin e Hammond [57], pelo fato de o sistema ser linear, a resposta impulsiva torna-se útil para a predição da resposta do sistema à qualquer entrada. Este procedimento é chamado convolução da entrada $x(t)$ com a resposta impulsiva $h(t)$ do sistema e pode ser calculado como

$$y(t) = h(t) * x(t), \quad (3.1)$$

na qual "*" representa a operação matemática de convolução,

dada por

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau, \quad (3.2)$$

na qual, τ é um atraso no tempo. A Figura 3.2 ilustra a convolução entre pulso enviado pela fonte e a resposta impulsiva do sistema, neste caso, um modelo de refletividade do substrato.

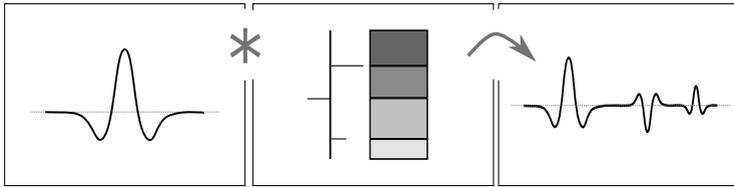


Figura 3.2.: Modelo convolucional. Adaptado de [55].

A partir desse ponto, a identificação do sistema passa a ser apenas a medição de $x(t)$ e $y(t)$ e a dedução da resposta impulsiva $h(t)$. Segundo Hardy [48], a Transformada de Fourier (TF) é a transformada de domínio mais utilizada na sismologia. A teoria de Fourier atesta que um sinal pode ser formado por uma soma de senóides de amplitudes, frequências e fases variadas. Através da TF um dado pode ser levado do domínio do tempo para o da frequência. Desta forma, pode-se analisar entrada, sistema e saída no domínio da frequência (f):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (3.3)$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad e \quad (3.4)$$

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (3.5)$$

Assim, a operação de convolução definida na Eq. (3.2) pode ser escrita considerando $z = t - \tau$:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(z)d\tau, \quad (3.6)$$

e aplicado a Transformada de Fourier:

$$Y(f) = F\{h(t) * x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(z) e^{-i2\pi f(\tau+z)} d\tau dz \quad (3.7)$$

e separando as integrais:

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} x(z) e^{-i2\pi fz} dz, \quad (3.8)$$

na qual se percebe que, ao invés de uma integral de convolução, há uma multiplicação simples entre $X(f)$ e $H(f)$:

$$Y(f) = H(f)X(f), \quad (3.9)$$

na qual $H(f)$ é a chamada função resposta em frequência (FRF).

A deconvolução é o processo oposto à convolução. Segundo o dicionário Oxford [63], a definição de deconvolução é dada por:

- (1) Processo de separar algo em seus elementos constituintes ou de remover complicações;
- (2) Processo de separar uma função em funções pelas quais esta foi formada visando separar os seus efeitos.

No caso, a função convolvida é a saída $y(t)$, o traço sísmico, que pode ser deconvolvida em seus contituíntes: entrada $x(t)$ e resposta impulsiva do sistema $h(t)$. Em alguns casos, a entrada é conhecida, e quando não, alguns procedimentos são realizados a fim de obtê-la (mais detalhes serão dados no Capítulo 4).

No domínio da frequência o problema resume-se em buscar $H(f)$, a FRF do sistema, que agora, nada mais é, que a divisão entre os espectros de saída e entrada do sistema:

$$H(f) = Y(f)/X(f). \quad (3.10)$$

Com o resultado em mãos, bastaria efetuar a Transformada Inversa de Fourier para migrar do domínio da frequência para o domínio do tempo:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{i2\pi ft} df. \quad (3.11)$$

A resposta impulsiva exata da geologia de fundo investigada seria o resultado caso o pulso emitido pela fonte fosse um impulso. A estimativa da reflexão do fundo pode ser obtida através da resposta do sistema ($h(t)$) caso outras características do sistema sejam desconsideradas. A estimativa é composta pelas reflexões acústicas nas interfaces entre camadas com contrastes de impedância acústica e suas múltiplas reflexões. Idealmente, a deconvolução deveria comprimir o pulso emitido pela fonte, $x(t)$ apenas restando a informação sobre refletividade [9, 64].

No processamento sísmico, segundo Yilmaz [9], o modelo convolucional assume, geralmente, que a Terra é composta por camadas horizontais de velocidade constante e que a fonte gera ondas planas que interagem com as camadas sob incidência normal.

3.2 Deconvolução via divisão espectral

Segundo Gurrola et al. [65] e Sipkin e Lerner-Lam [66], a deconvolução em sua forma convencional de divisão espectral como apresentado nas Eq. (3.10) e Eq. (3.11), funciona muito bem para casos em que desconsidera-se a presença de ruído. Com isto, pelo fato de as medições tanto de $x(t)$, quanto de $y(t)$, em geral, possuírem ruído, é necessário prestar atenção neste tipo de operação.

Além disso, deve-se ressaltar, como feito por Warner [67], que por se tratar de uma divisão espectral, caso alguns dos espectros utilizados para a realização da deconvolução não apresentem componentes em determinada frequência, a divisão se torna

uma indeterminação matemática, levando a uma instabilidade do método da divisão espectral.

Com a finalidade de ilustrar a deconvolução espectral clássica, simulou-se três tipos de pulso: um com fase mínima, um com fase zero e por último, um pulso controlado, com fase mista.

O pulso de fase mínima escolhido é uma função cossenoidal de frequência $f = 50$ Hz amortecida por uma exponencial com fator de decaimento de $\lambda = 50$, seguindo a Eq. (2.17). A duração do pulso é de 0,02 s. O pulso de fase mínima simulado está ilustrado Figura 3.3.

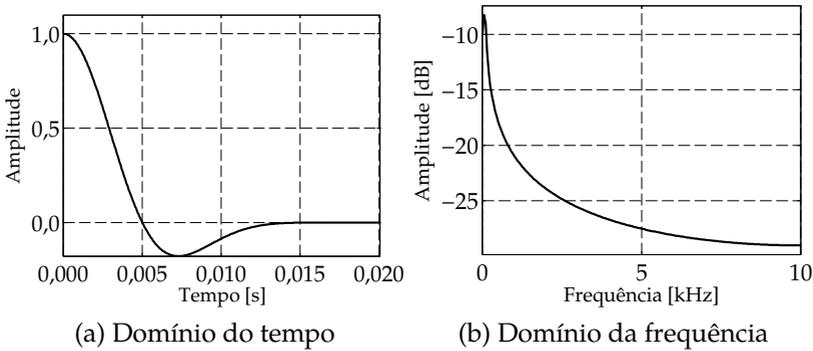


Figura 3.3.: Cosseno amortecido de 0,02 s com $f=50$ Hz e $\lambda=50$.

Para representar um pulso de fase zero, escolheu-se um pulso de Ricker com $f_M = 80$ Hz seguindo a Eq. (2.18). A frequência de amostragem foi de 20 kHz e a duração do pulso é de 0,03 s. O pulso de fase zero simulado é ilustrado na Figura 3.4.

O pulso de fase mista escolhido, que pode ser gerado através de fonte controlada, é um pulso do tipo *chirp* com frequências de 800 Hz a 8 kHz e com 2,5% de amortecimento através de uma janela gaussiana em cada uma das extremidades. A frequência de amostragem foi de 20 kHz e a duração do pulso é de 0,1 s. O pulso de fase mista simulado é ilustrado no domínio do tempo na Figura 3.5 (a) e no domínio da frequência na Figura 3.5 (b).

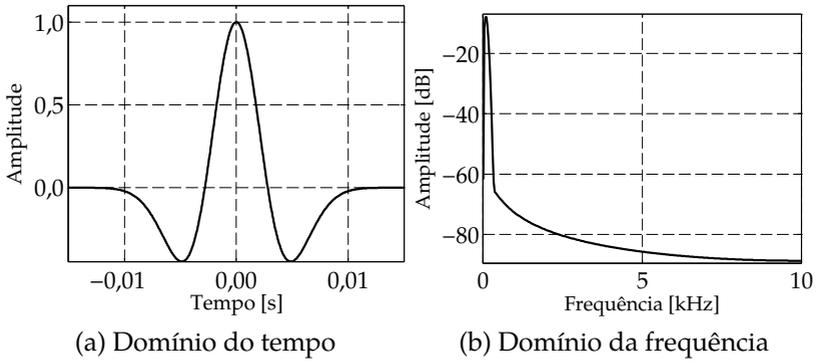


Figura 3.4.: Pulso de Ricker de 0,03 s com $f_M = 80$ Hz.

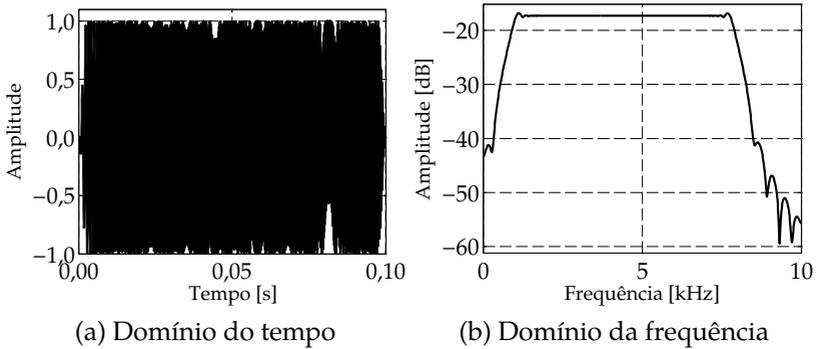


Figura 3.5.: Pulso *chirp* de 800 Hz a 8 kHz de 0,1 s.

De forma a facilitar a escrita do trabalho, os pulsos serão organizados numericamente. O pulso de fase mínima será referenciado como pulso (1), o de fase zero será o pulso (2) e, por fim, o de fase mista será o (3).

Para obter a resposta impulsiva do sistema, aqui considerada a refletividade, um ambiente foi modelado e é ilustrado na Figura 3.6 (a). A refletividade sintética nada mais é que uma série de impulsos modulados por coeficientes de reflexão, como exposto na Figura 3.6 (b).

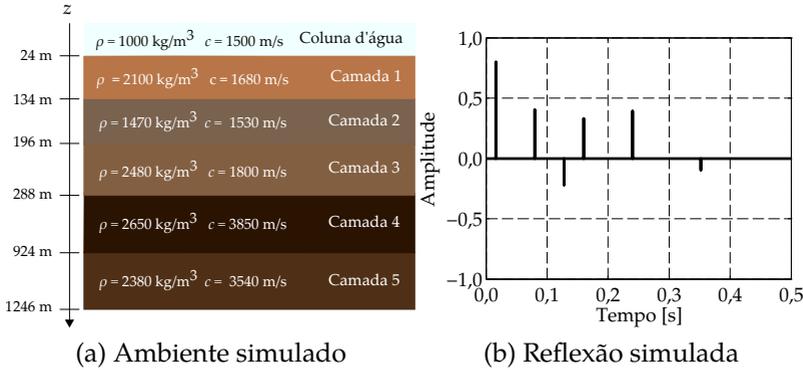


Figura 3.6.: Ambiente modelado e a refletividade obtida.

Os coeficientes de reflexão foram obtidos através da Eq. (2.9) para um ângulo de incidência de 90° . Com isso, foi realizada a convolução entre a refletividade simulada e os pulsos sonoros e os traços sísmicos foram obtidos.

Contudo, para alcançar uma situação mais próxima à real, um ruído característico do ambiente marinho foi adicionado. Para isto, os estudos de Wenz [68] foram seguidos e um filtro que inclui ruído de bolhas, vento, fluxo d'água e de tráfego marítimo em regiões rasas foi utilizado. O espectro do ruído característico resultante é obtido com a aplicação do filtro característico a um ruído gaussiano branco. O desvio padrão do ruído utilizado para as simulações é de $\sigma = 0,3$. A Figura 3.7 ilustra o ruído nos domínios do tempo e da frequência.

Os traços sísmicos resultantes da convolução entre os pulsos sonoros e a refletividade somados ao ruído são expostos na Figura 3.8. Da mesma forma que os pulsos, os traços serão referenciados numericamente seguindo os respectivos pulsos utilizados para sua geração via convolução como traço (1), traço (2) e traço (3). As relações sinal/ruído são -0,2 dB, 1,4 dB e 12,5 dB, respectivamente.

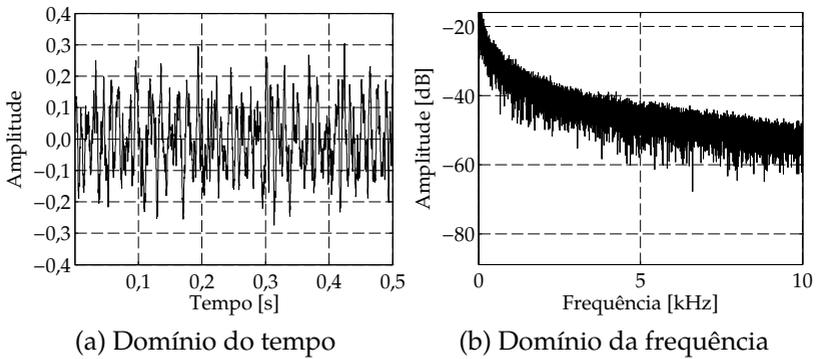


Figura 3.7.: Ruído ambiente gerado via estudos de Wenz [68].

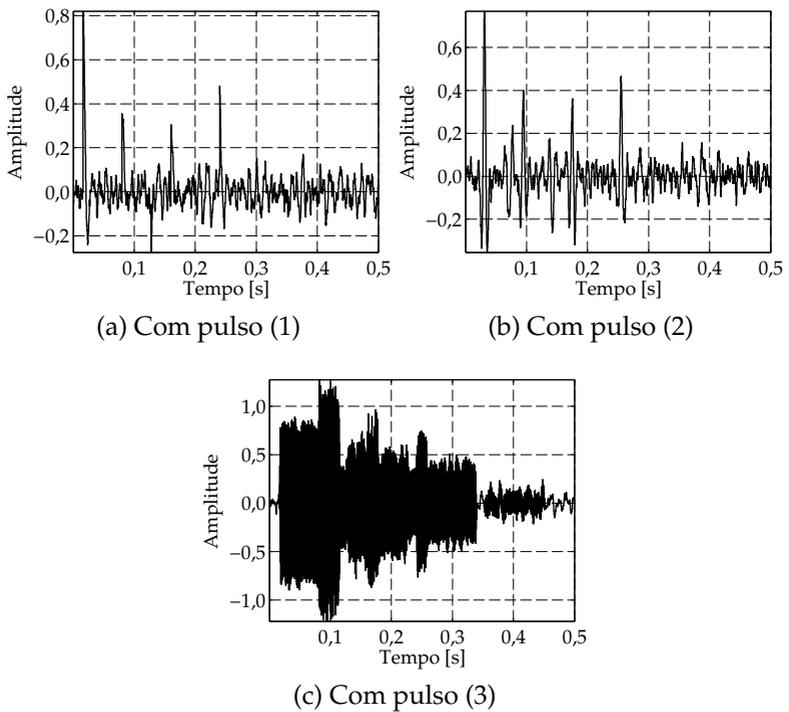


Figura 3.8.: Traços sísmicos gerados com os três pulsos e ruído.

Buscando avaliar a estabilidade da deconvolução clássica via

divisão espectral¹, o método foi aplicado para os três traços simulados na ausência e na presença de ruído (Figura 3.8). Os resultados no domínio do tempo são apresentados na Figura 3.9.

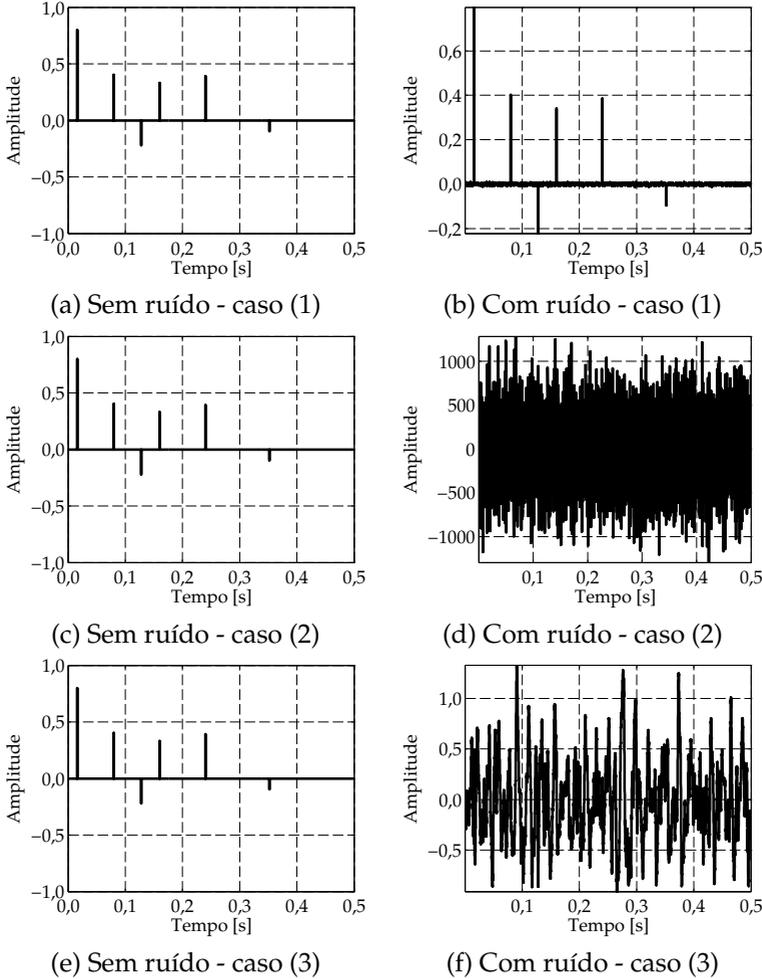


Figura 3.9.: Refletividades obtidas através da deconvolução clássica.

¹Os espectros foram calculados utilizando um algoritmo de Transformada Rápida de Fourier, sem média e sem janelamento no tempo.

Analisando a Fig. 3.9 e comparando com a refletividade exibida na Figura 3.6 (b), é perceptível que a deconvolução para os casos sem a adição de ruído, independentemente do tipo de pulso de entrada utilizado, tem como resultado a exata refletividade do substrato, $h(t)$, utilizada para a criação dos dados sintéticos. Nos casos com ruído, ao observar a deconvolução do caso (1), com o pulso de fase mínima, percebe-se que a estimativa é bem próxima à desejada. Isso é esperado, uma vez que, como mencionado, pulsos de fase mínima possuem uma inversa estável e carregam esta propriedade para o processo da deconvolução. Contudo, o mesmo desempenho não pode ser observado para os casos (2) e (3), de fase zero e fase mista, respectivamente. Nestes casos, a presença do ruído no dado e a questão da fase inviabilizam a obtenção de uma boa estimativa da refletividade do meio investigado devido às instabilidades adicionadas.

O ruído adicionado tem como característica a presença de componentes em todas as frequências. E ao observar os espectros dos pulsos se nota que possuem uma característica passa-baixa. Com isso, ao realizar a divisão espectral, o espectro do pulso da fonte no denominador age como um filtro passa-alta, atenuando as frequências mais baixas, no caso, a banda das frequências excitadas pelo pulso, e ampliando as frequências fora da região de interesse, no caso, ruído.

Na Fig. 3.10, os espectros dos sinais deconvolvidos ($h(t)$) são expostos. Como o resultado sem ruído é o mesmo para os três casos, apenas um espectro para o resultado sem ruído é exposto. Nos gráficos é possível perceber a característica plana do espectro sem ruído na Figura 3.10 (a). O caso (1), exposto na Figura 3.10 (b), acompanha a planificação do espectro com uma interferência baixa do ruído. Contudo, os espectros dos casos (2) e (3), expostos nas Figura 3.10 (c) e Figura 3.10 (d), possuem a região de interesse atenuadas e outras regiões amplificadas, o que faz com que os resultados sejam obtidos com ruído amplificado.

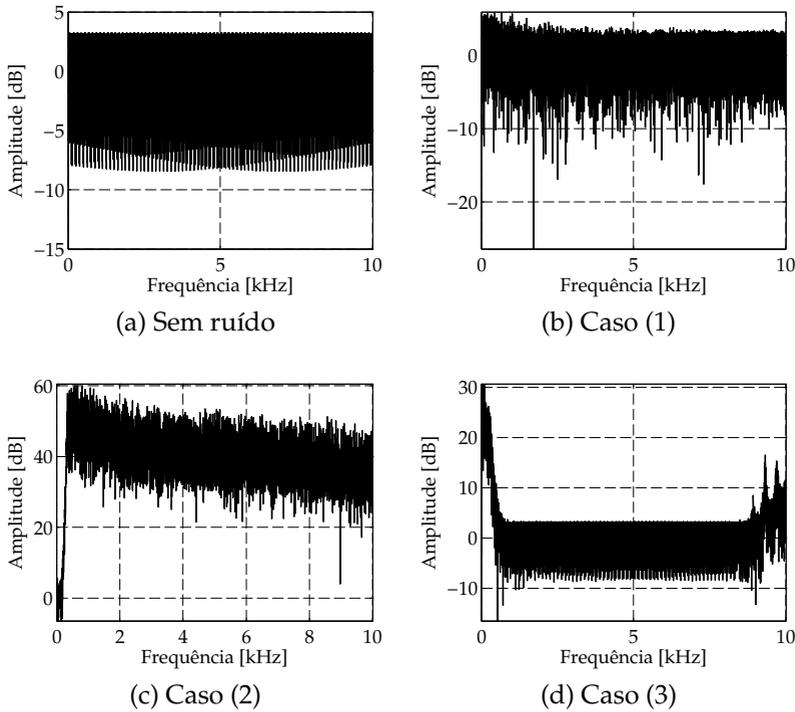


Figura 3.10.: Espectros de amplitude das refletividades obtidas.

Essas peculiaridades encontradas na deconvolução para estimativa da refletividade já foram estudadas por outros autores e algumas teorias e metodologias foram desenvolvidas para que sejam solucionadas. Algumas destas serão expostas a seguir, nas próximas seções.

3.3 Deconvolução com fator de amortecimento

Uma das formas usuais de estabilizar a divisão espectral é através de um fator de amortecimento ou de regularização, δ , para que valores próximos a zero no denominador da divisão espectral sejam evitados. Segundo Gurrola et al. [65] e Warner [67], a adição do fator de amortecimento no espectro é

equivalente à inserção de ruído branco no domínio do tempo, o que faz com que os pequenos valores no denominador sejam substituídos e a inversão seja estabilizada. Desta forma, o espectro da refletividade do meio investigado pode ser dado por:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f) + \delta}. \quad (3.12)$$

Para trabalhar com o fator de regularização (δ) proporcional à amplitude máxima do espectro do sinal de entrada, foi realizada a escolha de um fator de proporção, δ' , com valores de 0 a 1, relacionada ao fator de regularização como:

$$\delta = \delta' \max(X) \quad (3.13)$$

na qual $\max(X)$ representa o valor máximo de amplitude do espectro do pulso enviado ao ambiente.

Com o intuito de analisar a presença do fator de amortecimento δ no denominador da divisão espectral, foram feitas análises utilizando os traços sísmicos simulados, expostos na Figura 3.8. O efeito da adição do fator de regularização nos espectros dos pulsos da fonte ($X(f)$) é ilustrado na Figura 3.11, na qual um fator de proporção de $\delta'=0,5$ foi utilizado para a obtenção do fator de regularização δ e comparado com um caso sem fator de regularização.

É perceptível na Figura 3.11 que com a adição de δ há o aumento em amplitude e suave aumento da largura do espectro, o que altera o seu efeito como um filtro passa-baixa. Esta adição auxilia na redução do ruído de alta frequência, e conseqüentemente, leva a uma perda de amplitude da refletividade do meio. Isso se deve ao fato de que, por ser uma série de impulsos, a refletividade possui uma faixa de frequência ampla.

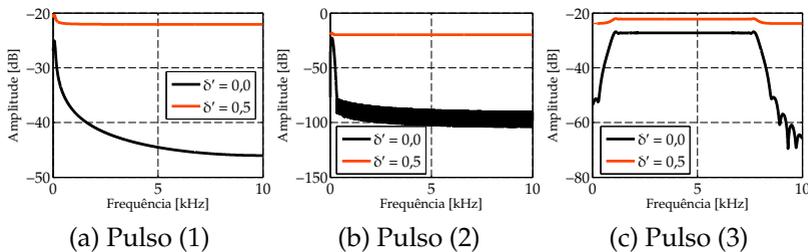


Figura 3.11.: Espectros de magnitude dos três sinais de entrada com amortecimento de $\delta' = 0, 0,5$ e sem amortecimento.

Quanto menor o fator de amortecimento, δ , mais próximo da divisão espectral bruta encontra-se a deconvolução. Quanto maior, há um aumento na tendência do espectro em se achatar.

Muitas vezes o fator de regularização é escolhido manualmente, observando o balanço entre resolução e amplitude. A fim de buscar relações que permitam selecionar o valor de δ que permita o retorno da refletividade mais próxima à real, criou-se um algoritmo iterativo que seleciona o melhor valor de δ através da minimização do erro entre a refletividade observada (no caso, simulada) e a obtida através da deconvolução estimada com a utilização dos fatores de regularização δ :

$$\Delta_h = \sum_{t=0}^T [h(t) - h_{\text{est}}(t)]^2. \quad (3.14)$$

no qual T é o tamanho do traço sísmico e $h_{\text{est}}(t)$ é a refletividade estimada através da deconvolução com fator de amortecimento. Vale ressaltar, que esta análise só é possível pelo fato de que a refletividade "original", neste caso, é simulada. Trata-se de uma análise para a melhor escolha do fator de amortecimento. Aplicou-se o algoritmo para a busca do menor valor de Δ_h com a utilização de valores de δ' de 0 a 1.

O fato de que a deconvolução utilizando pulso de fase mínima do caso (1) é estável faz com que o valor de δ ideal encontrado

pelo algoritmo seja $\delta'=0$, como exposto na Figura 3.12 (a).

Percebe-se, através do aumento da diferença Δ_h , que ao adicionar um fator de regularização em uma operação que já está estabilizada faz com que o erro aumente. Buscando exemplificar o efeito da alteração do fator de proporção δ' sobre o espectro, a Figura 3.12 (b) ilustra o espectro da refletividade sem a adição de fator de regularização e com a adição do fator com valores de 10%, 50% e 100% da amplitude máxima do espectro.

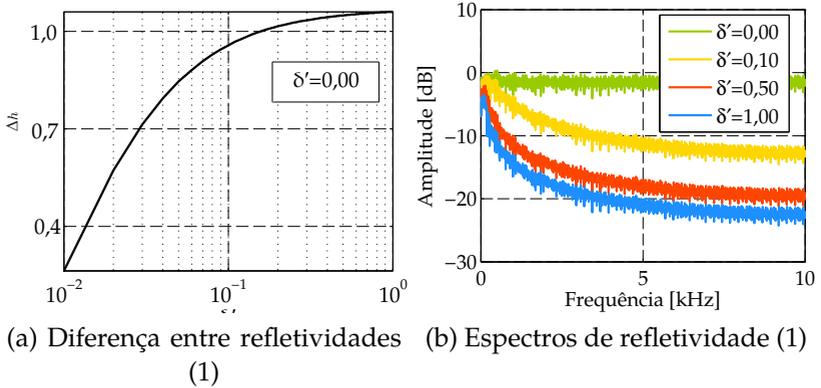


Figura 3.12.: Diferença entre refletividades original e estimada no caso (1) e espectros de refletividade.

A Figura 3.13 expõe as deconvoluções no domínio do tempo e com amplitude normalizada (AN), com fatores de regularização proporcionais a 0%, 10%, 30%, 50%, 90% e 100% para o pulso de fase mínima. Com isso, toda a faixa de δ' é atingida, incluindo a exibição da curva obtida com a utilização do δ' ótimo.

A utilização do erro entre as refletividades, Eq. (3.14), não permite a obtenção da precisão na detecção das amplitudes das reflexões. Desta forma, foi definido um fator de coerência de amplitudes (ζ) para que fosse usado como parâmetro de comparação. O fator de coerência de amplitudes é dado por:

$$\zeta = \sum^T \left[\frac{(h_{\text{est}}(t) + h(t))^2}{h_{\text{est}}(t)^2 + h(t)^2} - 1 \right] \frac{1}{NR'} \quad (3.15)$$

no qual NR é o número de reflexões presentes no ambiente. Deve-se perceber, que o coeficiente ζ varia entre -1 e 1, sendo que -1 significa oposição entre as amplitudes e 1 total semelhança. Mais detalhes sobre o parâmetro são dados no Apêndice B.

Com isso, por mais que os resultados sejam expostos com amplitude normalizada para que a visualização seja aprimorada, a recuperação da amplitude é avaliada através do parâmetro de comparação ζ .

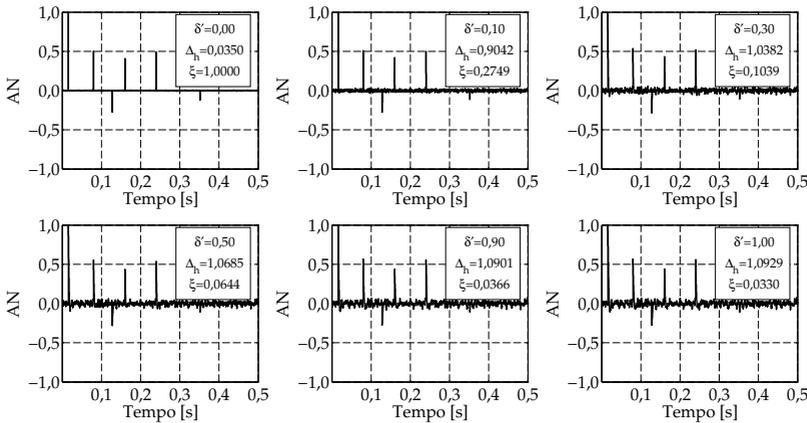


Figura 3.13.: Resultados da deconvolução com amplitude normalizada do caso (1) para valores de δ' .

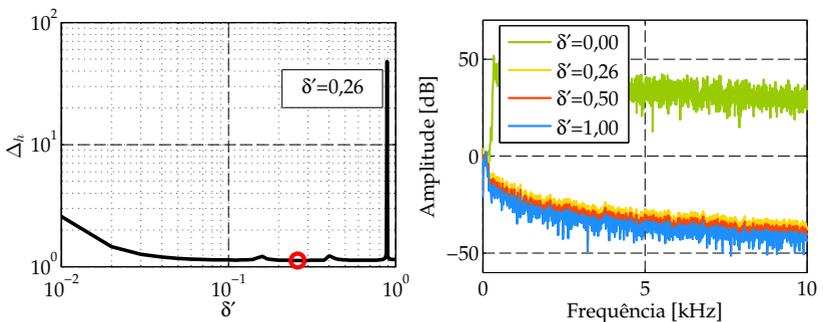
Corroborando com resultados expostos anteriormente, fazendo uma análise qualitativa para o caso (1), percebe-se que o fator de proporção ótimo $\delta' = 0$, é o que traz o melhor resultado quando comparado aos outros. Ao observar os valores dos parâmetros de comparação o mesmo é percebido. Para um $\delta' = 0$, o fator ζ possui valor máximo, ou seja, as amplitudes são bem localizadas e recuperadas. Além disso, o erro entre refletividades é bem baixo, com $\Delta_h = 0,035$. Quando um $\delta' =$

0,10 é utilizado, o erro entre refletividades sobe mais de 2000%, chegando a $\Delta_h = 0,9042$. Já o parâmetro ζ cai cerca de 73% alcançando um valor baixo de $\zeta = 0,2749$. Com o aumento de δ' a tendência é concretizada e o erro entre refletividades continua aumentando e o parâmetro de coerência de amplitudes caindo.

Já para o caso (2), no qual se utiliza um pulso de fase zero, a estabilização é necessária. A curva do erro Δ_h variando com os fatores de proporção é exposta na Figura 3.14 (a). O valor de δ' ideal é 0,26. Valores de δ' maiores e menores que o ideal apresentam erros Δ_h maiores.

Buscando exemplificar o efeito da alteração do fator de proporção δ' sobre o espectro, a Figura 3.14 (b) ilustra o espectro da refletividade sem a adição de fator de regularização e com a adição do fator com valores de 50%, o ideal 26% e 100% da amplitude máxima do espectro, na qual é possível perceber a suavização da amplificação de regiões desinteressantes para a análise, ou seja, suavização do ruído.

A Figura 3.15 expõe os resultados para a deconvolução com amplitude normalizada, com fatores de regularização proporcionais a 0%, 26%, 30%, 50%, 90% e 100% para o caso (2).



(a) Diferença entre refletividades (2) (b) Espectros de refletividade (2)

Figura 3.14.: Diferença entre refletividades original e estimada no caso (2) com e espectros de refletividade.

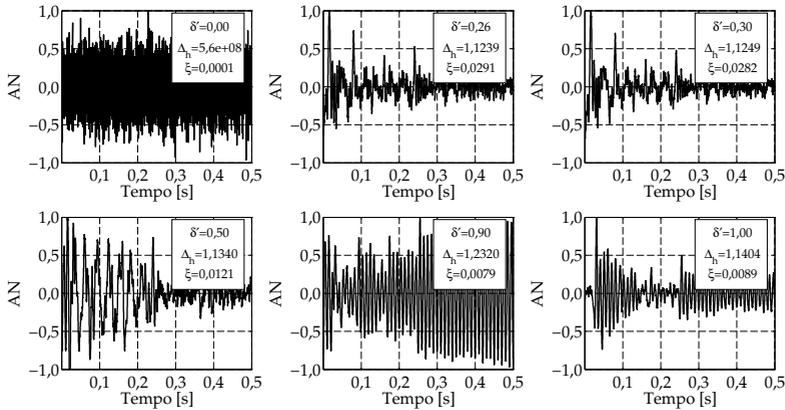


Figura 3.15.: Resultados da deconvolução com amplitude normalizada do caso (2) para valores de δ' .

Fazendo uma análise qualitativa, é notável que os melhores valores de δ' encontrados são os de $\delta' = 0,26$ e $\delta' = 0,30$. Todos os outros resultados trazem curvas completamente distintas da refletividade original (Figura 3.6 (b)). Corroborando com a curva da Figura 3.14 (a), o valor do parâmetro de erro entre refletividades começa elevado, cai e após a utilização do $\delta' = 0,5$ tem um pico e retorna a cair.

O menor valor de Δ_h é encontrado com a utilização de $\delta' = 0,26$. Da mesma forma, o maior valor do fator de coerência de amplitudes é encontrado no mesmo caso. Os parâmetros de comparação obtidos com $\delta' = 0,30$ se diferem em menos de 1% para os obtidos com $\delta' = 0,26$.

Analisando o caso (3), no qual se tem um pulso de fase mista, a estabilização também é necessária. A curva da diferença Δ_h variando com os fatores de proporção é exposta na Figura 3.16 (a). O valor de δ' ideal encontrado é 0,31. Valores de δ' maiores e menores que o ideal apresentam erros Δ_h maiores.

A Figura 3.16 (b) ilustra o espectro da refletividade sem a adição de fator de regularização e com a adição do fator com valores de 31%, o ideal, 50% e 100% da amplitude máxima

do espectro, na qual é possível perceber a suavização da amplificação de regiões desinteressantes para a análise (abaixo de 800 Hz e acima de 8 kHz), de forma semelhante ao caso (2).

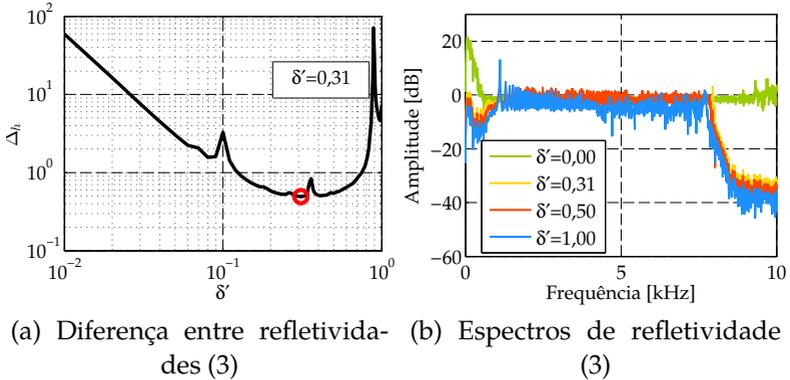


Figura 3.16.: Diferença entre refletividades original e estimada no caso (3) com e espectros de refletividade.

A Figura 3.17 expõe os resultados para a deconvolução e com amplitude normalizada com fatores de regularização proporcionais a 0%, 30%, 31%, 50%, 90% e 100% para o caso de fase mista. É possível observar que os δ proporcionais a 30%, 31% e 50% trazem curvas bem semelhantes à Figura 3.6 (b), com pouco ruído e reflexões bem definidas. Apesar de muito parecidas, as curvas obtidas utilizando fatores proporcionais a 30% e 31% possuem uma diferença de 0,4% e de 0,11% nos valores de Δ_h e ζ , respectivamente. Nota-se, também, a presença de pequenos artefatos na direção oposta às reflexões.

Com isso, ao analisar quantitativamente, é notável que o $\delta' = 0,31$ ideal traz o menor valor de erro entre refletividades e o maior fator de coerência de amplitudes, corroborando com os resultados expostos na Figura 3.16.

Observando as curvas da Figura 3.16 (b) é possível notar que com a adição do fator de amortecimento à divisão espectral e com os efeitos sob o espectro da entrada, é obtida a suavização

das altas frequências enquanto a região das frequências excitadas pela fonte permanecem semelhantes. Com isso, muito do ruído presente na refletividade resultante é eliminado. Porém, como já mencionado, devido à ampla faixa de frequência da refletividade em série de impulsos, será perdida amplitude das reflexões. Assim, o fator de regularização ótimo, que minimiza a diferença entre a refletividade original e a resultante da deconvolução, faz o balanço ideal entre eliminação do ruído e conservação da informação de amplitude.

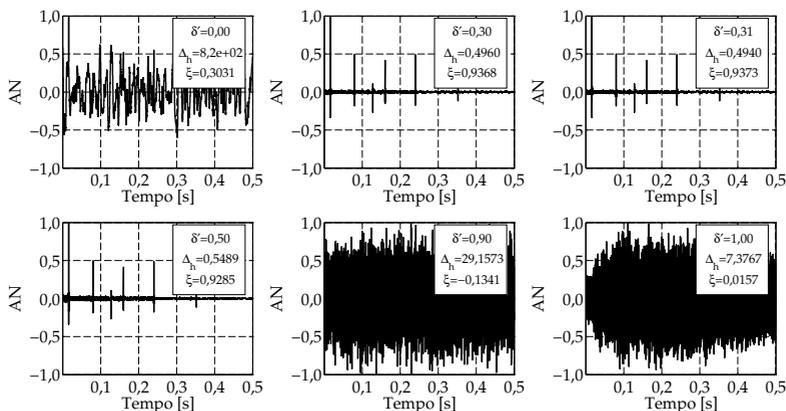


Figura 3.17.: Resultados da deconvolução com amplitude normalizada do caso (3) para valores de δ' .

Uma das hipóteses para o fato de que o pulso de fase mista utilizado traz melhores resultados para a deconvolução com amortecimento do que no caso que utiliza um pulso de fase zero é ligada à banda de frequências excitadas pela fonte. O pulso de Ricker excita uma pequena região na proximidade de 80 Hz enquanto o *chirp*, uma faixa de frequência entre 800 Hz e 8 kHz. Desta forma, ao realizar a deconvolução menos da energia do pulso é perdida por abranger uma faixa maior de frequências e mais das características das amplitudes das reflexões são conservadas e destacadas do ruído.

É comum a aplicação da deconvolução antes da realização do

empilhamento. Contudo, para alguns autores, como Bostock [69], o empilhamento dos traços sísmicos antes da divisão dos espectros é capaz de melhorar a relação sinal-ruído e de reduzir o amortecimento necessário para a obtenção de bons resultados.

3.4 Deconvolução simultânea no domínio do tempo

Assim como a deconvolução com amortecimento no domínio da frequência, a deconvolução simultânea no domínio do tempo possui, também, uma forma de regularização. Por ser iterativa e envolver inversão de matriz, segundo Pesce [70], possui um custo computacional maior, porém mais flexibilidade e adaptabilidade.

O método descrito por Gurrola et al. [65], por tratar a deconvolução como um problema linear inverso, permite a utilização de procedimentos de estabilização menos subjetivos do que os utilizados em deconvoluções amortecidas no domínio da frequência, por levar em conta as características da própria refletividade estimada.

Este tipo de deconvolução busca reduzir a diferença entre o traço observado $y(t)$ e o estimado através de propostas iterativas da convolução entre o pulso e o modelo da refletividade do fundo, $y_{\text{est}}(t)$. Gurrola et al. [65] sugere que o valor desejável fosse próximo ao desvio padrão do ruído presente antes dos registros de eventos (σ):

$$\|y(t) - y_{\text{est}}(t)\|^2 = \sigma. \quad (3.16)$$

Pela presença do ruído, assim como no domínio da frequência, a inversão é instável e deve ser regularizada. São diversas soluções para a estimativa da refletividade que satisfazem a Eq. (3.16), ou seja, são várias as estimativas de $h(t)$ que resultam em um mesmo traço $y_{\text{est}}(t)$. Uma das formas sugeridas para regularizar o problema é buscar o "menor" modelo de refletividade, no qual o seu tamanho u é definido como

$$u = \|h(t)\|^2. \quad (3.17)$$

Para aplicação do método, cria-se uma matriz que comporta o pulso emitido pela fonte, $x(t)$, organizado em g colunas, onde g é o número de elementos de $h(t)$ ², o modelo da refletividade. A matriz é preenchida com zeros até que tenha j linhas, onde j é o número de elementos de $y(t)$, o traço sísmico:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x(0) & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ x(1) & x(0) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & x(1) & x(0) & 0 & \cdots & 0 \\ x(n) & \vdots & x(1) & x(0) & \cdots & 0 \\ 0 & x(n) & \vdots & x(1) & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & x(n) & \vdots & \ddots & x(0) \\ 0 & 0 & 0 & x(n) & \vdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & x(n) \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

na qual n é o número de elementos do pulso da fonte. Desta forma, via convolução na forma matricial, obtém-se o vetor de traço sísmico estimado (y_{est}):

$$y_{\text{est}}(t) = \mathbf{X}h(t). \quad (3.19)$$

A fim de buscar uma relação de compromisso entre as restrições, multiplica-se a Eq. (3.16), por um multiplicador de Lagrange (μ) e soma-se à Eq. (3.17):

$$u = \|h(t)\|^2 + \mu \left(\|\mathbf{X}h(t) - y(t)\|^2 - \sigma \right) \quad \text{e} \quad (3.20)$$

²Levando em consideração a operação de convolução, o tamanho da refletividade, $h(t)$, é igual ao tamanho do traço, $y(t)$, subtraído do tamanho do pulso enviado pela fonte, $x(t)$, somado a 1.

diferencia-se em relação a $h(t)$:

$$h(t) = [(\mathbf{I} + \mu \mathbf{X}^T \mathbf{X})]^{-1} \mu \mathbf{X}^T y(t), \quad (3.21)$$

na qual \mathbf{I} é a matriz identidade $g \times g$.

Nesse método, o multiplicador de Lagrange exerce um papel parecido ao do fator de regularização utilizado nas deconvoluções amortecidas no domínio da frequência. Pela presença do ruído, não existe um valor específico de μ que satisfaz a condição imposta pela Eq. (3.16). Por isso, Gurrola et al. [65] sugere que se realize a deconvolução utilizando diferentes valores de μ até que o erro da estimativa do traço, dada por

$$\Delta_y = \|y(t) - y_{\text{est}}(t)\|^2, \quad (3.22)$$

não apresente mudanças significativas entre os resultados. Além disso, a utilização do erro do traço Δ_y ao invés do erro da refletividade Δ_h , permite a aplicação do método a casos reais, já que a refletividade original é objeto de estudo e, em geral, não é desconhecida.

Para a realização da deconvolução de diversos traços simultaneamente, repete-se o mesmo processo considerando que há uma convolução de diversas matrizes de pulsos da fonte com a desejada refletividade resultando nos diversos traços sísmicos:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(t) \\ h(t) \\ \vdots \\ h(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_M(t) \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

na qual $m = 1, \dots, M$ é o número do traço sísmico analisado. Desta forma, pode-se expandir o método baseado em:

$$h(t) = \left[\mathbf{I} + \mu \sum_{m=1}^M \mathbf{X}_m^T \mathbf{X}_m \right]^{-1} \mu \sum_{m=1}^M \mathbf{X}_m^T y_m(t). \quad (3.24)$$

A deconvolução simultânea de vários traços não necessita da inversão de uma matriz maior. Um empilhamento é realizado antes da operação, desta forma, não importa a quantidade de traços a serem deconvolvidos, o tempo de processamento será semelhante ao procedimento para um traço.

As vantagens da utilização de um multiplicador de Lagrange no domínio do tempo para a utilização de um fator de regularização do domínio da frequência, segundo Gurrola et al. [65] são: (1) a inversão é estabilizada com propriedades do próprio modelo de refletividade; (2) o critério da escolha do melhor fator μ pode ser especificado objetivamente fazendo com que os resultados possam ser reproduzidos e (3) pode-se selecionar a propriedade do modelo de refletividade que for conveniente para os objetivos da deconvolução.

Vale lembrar que a deconvolução com regularização no domínio da frequência (Seção 3.3) foi realizada com parâmetros do pulso enviado pela fonte, e não da refletividade estimada, como feito aqui.

Para a aplicação do método, a deconvolução foi aplicada com valores de μ variando de 10^5 a 10^{-4} diminuindo uma ordem de grandeza a cada aplicação, num total de 10. Uma das formas de avaliar os valores de μ que resultam em boas estimativas da refletividade $h(t)$, sugerida por Gurrola et al. [65], é através da alteração da diferença entre os erros do traço de um resultado para o outro dividido pelo tamanho do vetor do traço, para que a quantidade seja avaliada independente do dado. Os autores propõe que a diferença entre os erros subsequentes, dividida pelo tamanho do traço, seja menor que 0,05 para que se tenha um bom valor para μ .

Analisando o primeiro caso, em que trabalha-se com um pulso de fase mínima, o erro entre as refletividades, Δ_h , variando com valores de μ , é exposto na Figura 3.18 (a). Como já sabido, o primeiro caso não necessita de regularização, dessa forma, a diferença Δ_h é sempre baixa e diminui com os valores de μ . O valor mínimo da curva do erro da refletividade encontra o valor

de $\mu = 10^{-3}$. Os gráficos são plotados em dB devido à alta variação dos erros. O valor de referência utilizado é 1.

Já a Figura 3.18 (b) exibe o erro entre os traços, Δ_y , para o primeiro caso. Este, não tão baixo quanto o erro da refletividade, também decai com o valores de μ . Pode-se perceber, comparando as curvas, que o mínimo destas não coincidem sendo o mínimo erro entre traços encontrado é $\mu = 10^{-4}$. Este fato será percebido com maior notoriedade nos dois casos posteriores. A diferença entre os erros da refletividade e dos traços é devida ao fato de que a solução da Eq. (3.22) não é única e um mesmo traço pode ser gerado por diferentes refletividades, como já mencionado.

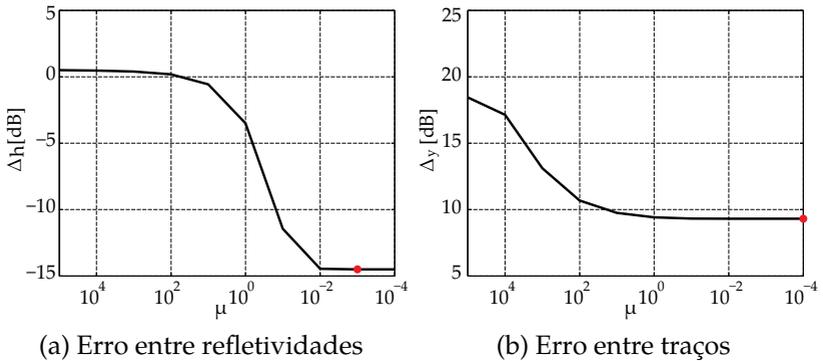


Figura 3.18.: Erros de refletividade estimada e traço estimado para um pulso de fase mínima variando com os valores de μ .

Como em casos reais não se tem acesso à refletividade original, não é possível o cálculo do erro da refletividade. Dessa forma, como a curva Δ_y traz resultados errôneos devido à não unicidade da solução de Eq. (3.22), buscam-se métodos para encontrar a iteração que leva a um valor ideal de μ , utilizando dados simulados que permitem o uso do parâmetro Δ_h como critério de comparação (por se tratar de dados simulados).

O método sugerido por Gurrola et al. [65], que avalia a alteração do erro do traço, escolhe valor empírico de 0,05 como

o critério de parada na escolha do melhor μ . Na tentativa de encontrar uma forma não empírica de buscar o melhor valor de μ , utilizando informações sobre os dados disponíveis, se sugere ponderar Δ_y pelo desvio padrão normalizado da refletividade estimada ($\sigma_{h_{est}}$) para que o ruído presente na estimativa da refletividade (h_{est}) seja levado em conta:

$$\Delta_{y_std} = \Delta_y \sigma_{h_{est}}. \quad (3.25)$$

A Figura 3.19 (a) ilustra a curva de diferenças entre o ajuste do erro Δ_y entre os resultados, mostrando que as diferenças entre os erros dos traços caem com μ , ou seja, o algoritmo passa a evoluir mais lentamente.

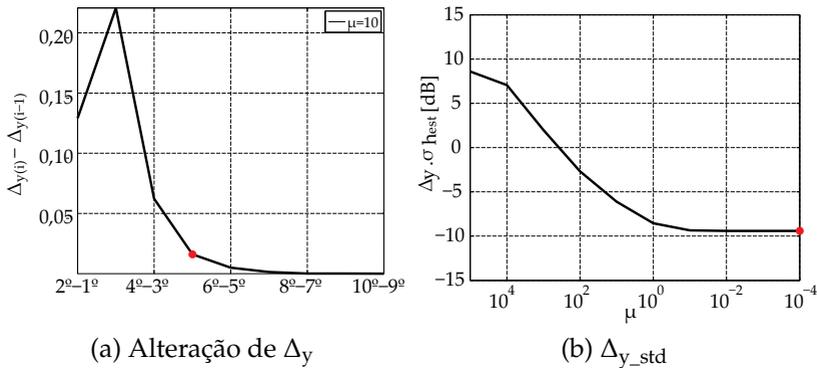


Figura 3.19.: Detecção de μ seguindo a alteração de Δ_y e buscando o mínimo de Δ_{y_std} .

O primeiro coeficiente a passar do limite de 0,05 é o $\mu = 10$. Pode-se observar que o valor encontrado é muito diferente do valor obtido para o erro mínimo de refletividade. Já a Figura 3.19 (b) ilustra o procedimento da escolha do critério de seleção após a inclusão da influência de $\sigma_{h_{est}}$ na diferença entre os erros. Nessa é possível perceber que a curva decai com o decréscimo de μ , corroborando com os resultados da curva de variação do erro da refletividade estimada em relação ao μ . O mínimo é encontrado na 10^a iteração, correspondente a

$\mu = 10^{-4}$, enquanto erro mínimo da refletividade está na 9ª. Desta forma, é possível ressaltar que o método da ponderação com o desvio padrão encontra um valor bem mais coerente.

A Figura 3.20 expõe as refletividades obtidas por meio do método para o caso (1), do pulso de fase mínima que, como visto, não necessita estabilização.

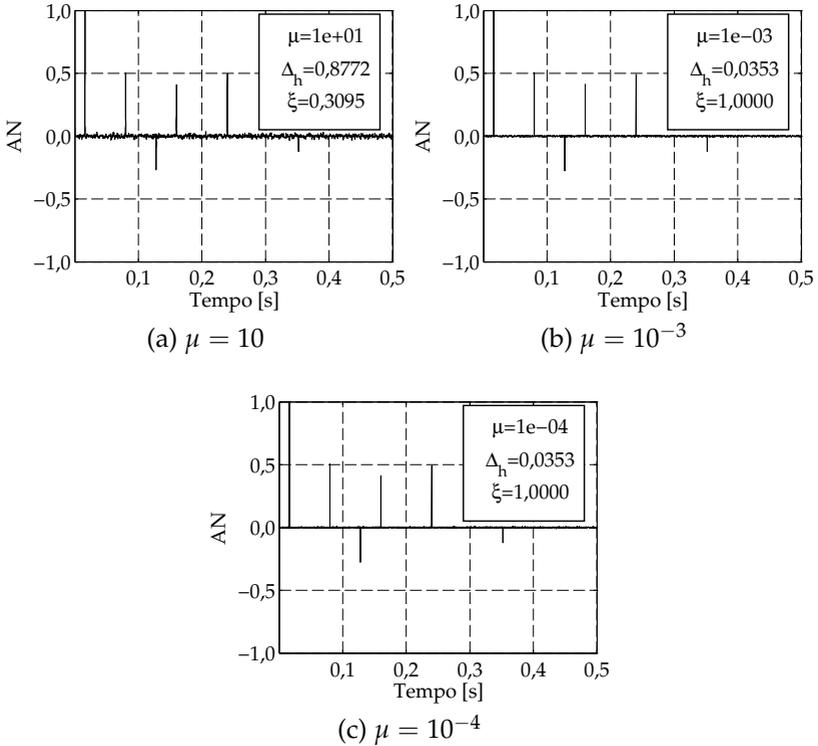


Figura 3.20.: Resultados da deconvolução simultânea para o pulso de fase mínima.

Fica evidente que a regularização, inclusive, piora a operação e traz resultados não tão bons, menos semelhantes à refletividade original (Figura 3.6 (b)). Não é observada diferença entre as refletividades obtidas com os μ encontrados com o mínimo das curvas de erro de refletividade ($\mu = 10^{-3}$) com o critério de

parada desenvolvido pela autora ($\mu = 10^{-4}$). Os parâmetros de comparação obtidos para estas duas curvas são idênticos, recuperando ao máximo da amplitude e possuindo um erro entre refletividades bem baixo. A curva encontrada via critério de parada sugerido por [65] ($\mu = 10$), se difere de forma mais acentuada, apresentando um erro entre refletividades de $\Delta_h = 0,8772$ (96% maior que o obtido via $\mu = 10^{-3}$ e $\mu = 10^{-4}$) e um fator de coerência de amplitude de $\zeta = 0,3095$ (69% maior que o obtido via $\mu = 10^{-3}$ e $\mu = 10^{-4}$).

Aplicando o método para o segundo caso, que envolve o pulso de fase zero, chega-se aos resultados exibidos na Figura 3.21 (a). Nessa, está exibido o erro entre as refletividades original e estimada, Δ_h , variando com o μ . A refletividade mais próxima à original encontrada é a resultante da utilização de $\mu = 10^2$, obtido na 4ª iteração. Além disso, como esperado, percebe-se que o erro aumenta com a diminuição de μ .

Ao observar a curva de erro entre os traços original e estimado, Δ_y , presente na Figura 3.21 (b), nota-se que a curva possui um padrão oposto e se a usássemos como única ferramenta para averiguar o valor de μ ideal, chegaríamos a um resultado não satisfatório.

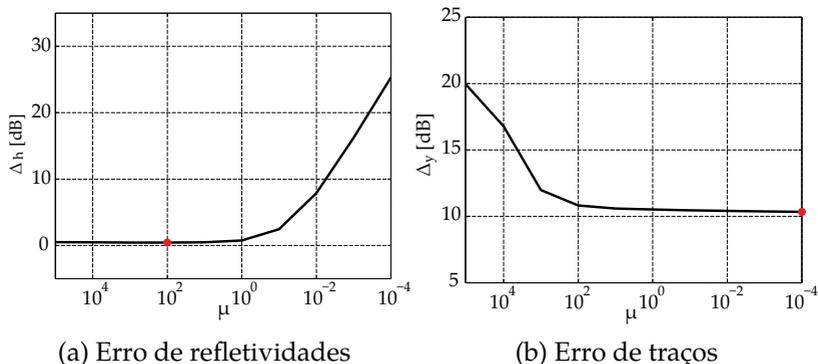


Figura 3.21.: Erros de refletividade estimada e traço estimado para um pulso de fase zero variando com os valores de μ .

A diferença entre os erros dos traços com μ diferentes (Figura 3.22 (a)) permite perceber que o valor selecionado é de $\mu = 10^2$, exatamente o valor que traz a menor diferença entre a refletividade original e estimada (Figura 3.21 (a)).

Utilizando o conceito da ponderação de Δ_y proposto pela autora, foi traçada a curva ilustrada na Figura 3.22 (b). Percebe-se nessa curva uma oscilação, e não um decaimento ou um aumento único. O valor mínimo obtido para esta curva é $\mu = 10^2$ e coincide com o encontrado através da alteração de Δ_y e é o valor que traz a refletividade mais próxima à original, com mesmo Δ_h .

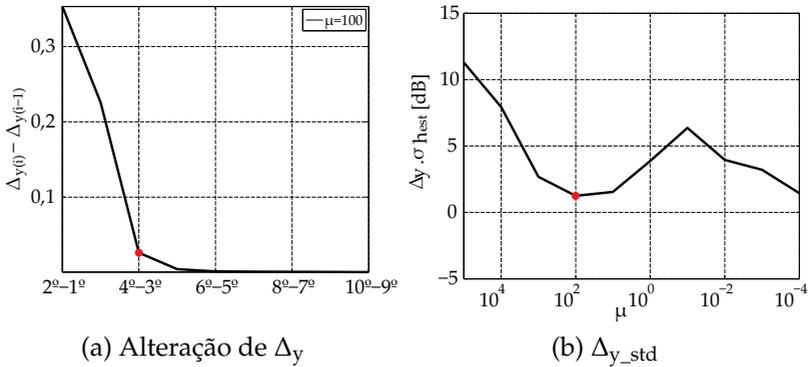


Figura 3.22.: Detecção de μ seguindo a alteração de Δ_y e buscando o mínimo de Δ_y_{std} .

A Figura 3.23 expõe as refletividades obtidas através da utilização dos fatores 10^5 , 10^2 , 10^{-1} e 10^{-4} . É notável na Figura 3.23, que corroborando com a Figura 3.21 (a), há uma ligeira queda no erro Δ_h com a utilização dos primeiros μ e um subsequente aumento.

Além disso, é possível perceber que a iteração corresponde a $\mu = 10^2$, selecionada através dos dois critério de parada é a que traz o melhor resultado para a deconvolução. Apesar de se mostrar muito semelhante à curva obtida utilizando $\mu = 10^5$, o valor de $\Delta_h = 1,1064$ é 2,5% menor e o fator de coerência de amplitudes é de $\zeta = 0,0335$, 95% maior. Deve-se ressaltar que os

resultados de deconvolução simultânea para este caso localizam bem as reflexões, porém deixam a desejar no que diz respeito à recuperação de amplitude.

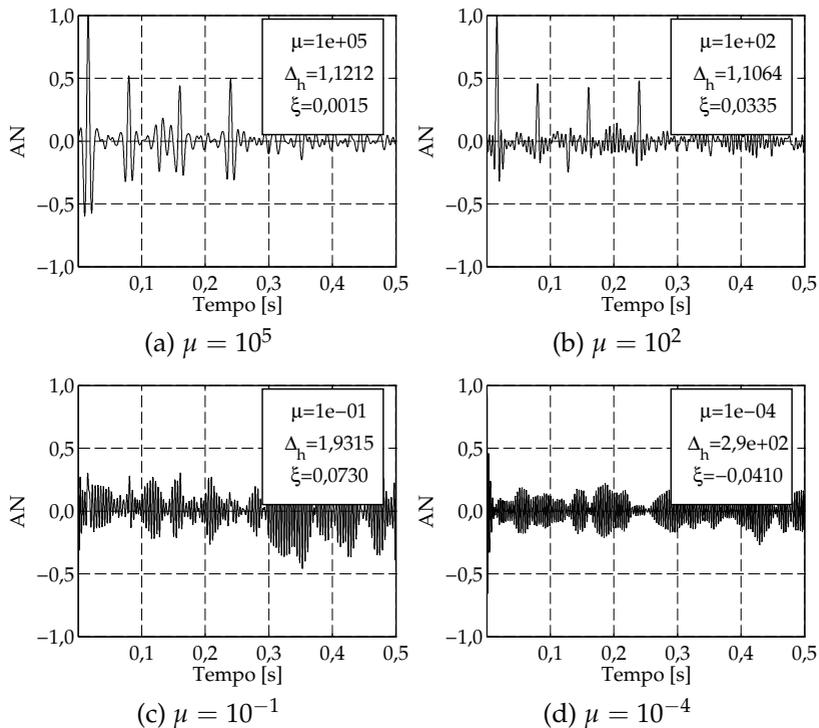


Figura 3.23.: Deconvolução simultânea com pulso de fase zero.

Aplicou-se o método, também, para o terceiro caso, no qual tem-se um pulso de fase mista. A Figura 3.24 (a) ilustra o erro entre as refletividades original e estimadas obtidas para cada valor de μ . A curva exibe uma oscilação, começando com valores de diferença um pouco altos, logo decaem e voltam a crescer. O valor mínimo da curva, ou seja, o menor erro da refletividade estimada corresponde a um valor de $\mu = 10$.

A Figura 3.24 (b) ilustra a curva para o erro entre os traços original e estimados ao longo das iterações. O padrão, como

esperado, é diferente do erro da refletividade e apresenta um decaimento com os valores de μ , sendo o mínimo localizado com o menor valor.

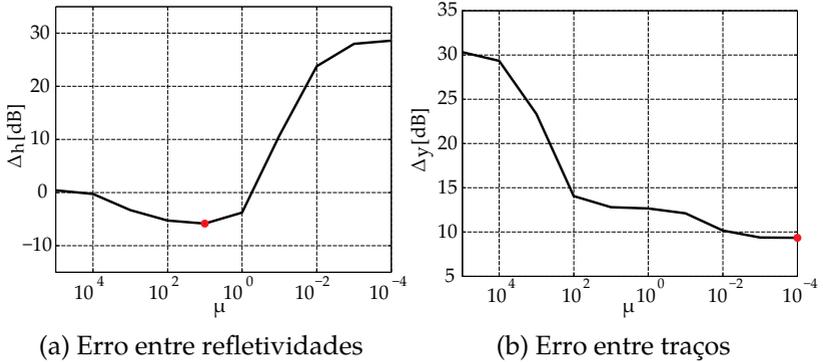


Figura 3.24.: Erros de refletividade e traço etimado para o caso de um pulso de fase mínima variando com os valores de μ .

Na Figura 3.25 (a) tem-se a alteração do erro dos traços com os valores de μ e na Figura 3.25 (b) a curva desse erro ponderado pelo $\sigma_{h_{est}}$. Em ambas as curvas o valor de $\mu = 10^1$ foi selecionado, valor igual ao encontrado como valor mínimo de erro da refletividade, Δ_h .

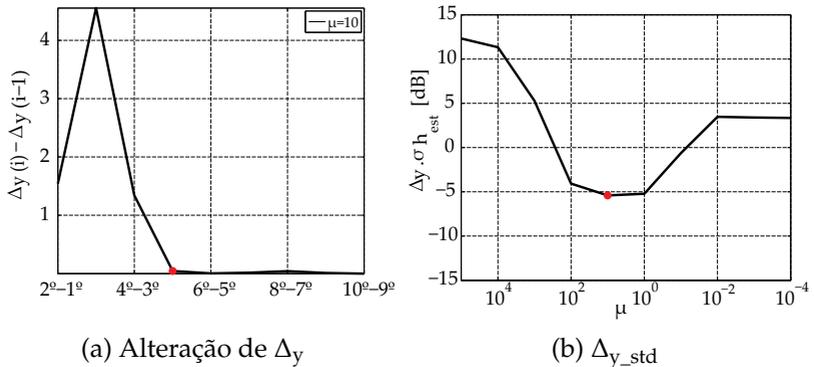
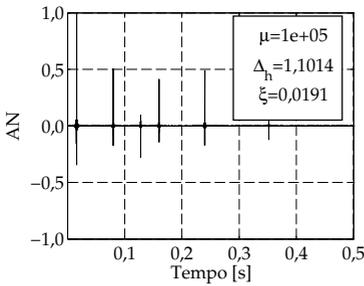


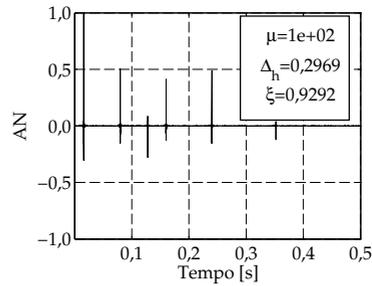
Figura 3.25.: Critério de escolha de μ seguindo o método de Gurrola e o proposto pela autora.

A Figura 3.26 expõe as refletividades obtidas com a utilização

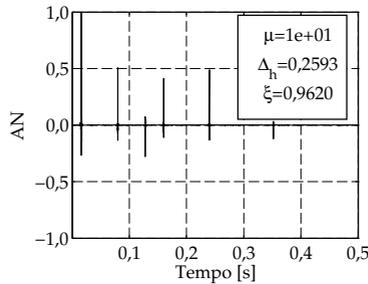
de valores de μ de 10^5 , 10^2 , 10^1 e 10^{-4} .



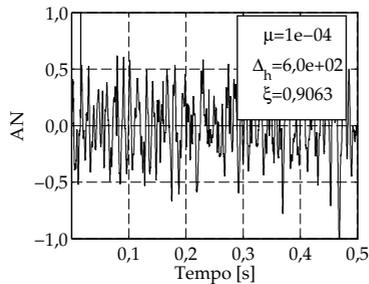
(a) 1ª iteração



(b) 4ª iteração



(c) 7ª iteração



(d) 10ª iteração

Figura 3.26.: Deconvolução simultânea para o pulso de fase mista.

As curvas corroboram com a tendência da Figura 3.24 (a), que decai até o μ ótimo e retorna a subir. Na Figura 3.26 é possível perceber que, tratando-se de forma, os valores de $\mu = 10^2$ e

$\mu = 10$ são muito semelhantes, encontram os picos e apresentam pequenos artefatos no sentido oposto da reflexão. Porém, a curva que utiliza $\mu = 10^1$, encontrada utilizando os critérios de seleção estudados, possui um erro de $\Delta_h = 0,2593$, cerca de 14% menor que o encontrado utilizando $\mu = 10^2$ e o fator de coerência de amplitude é de $\xi = 0,9292$, cerca de 12% maior.

Além disso, é possível notar que o resultado para $\mu = 10^5$, apesar de identificar a localização dos picos, apresenta artefatos e não consegue identificar bem as amplitudes, com um $\xi = 0,0191$. Já a última ($\mu = 10^{-4}$) encontra-se bastante ruidosa, com um erro entre refletividades bastante alto o que corrobora com a tendência observada na Figura 3.24 (a).

Como bons resultados foram obtidos através do critério de seleção sugerido neste trabalho quando comparado ao proposto na literatura, foi realizada uma análise de avaliação dos critérios para algumas situações. Desta forma, o método foi aplicado ao caso (2), escolhido arbitrariamente, 20 vezes alterando a geração do ruído porém o deixando com o mesmo desvio padrão, $\sigma = 0,3$, como exposto na Figura 3.7. Foi escolhido realizar a análise até a iteração de $\mu = 10$ por ter sido concluído por Gurrola et al. [65] que valores de μ entre 100 e 1 são considerados razoáveis para a utilização e capazes de retornar bons resultados. A Figura 3.27 (a) ilustra a variação do erro das refletividades, Δ_h , com os valores de μ , na qual percebe-se que para ruídos de mesma característica a curva se comporta de maneira bem semelhante, diferindo-se um pouco para as últimas iterações, com valores de μ menores que $\mu = 10$.

Já a Figura 3.27 (b), ilustra a variação do erro dos traços, Δ_y , com os valores de μ utilizados para cada iteração, na qual percebe-se que as curvas também seguem o mesmo padrão e não atingem valores muito baixos. Após a 3ª iteração, com $\mu = 10^3$ uma maior diferença entre as curvas passa a ser notada.

A alteração do erros dos traços de um valor de μ para o outro para as 20 situações está ilustrada na Figura 3.28 (a). Percebe-se que as curvas são muito semelhantes, diferindo-se um pouco

entre as alterações do 2º μ para a 1º e do 3º para a 2º.

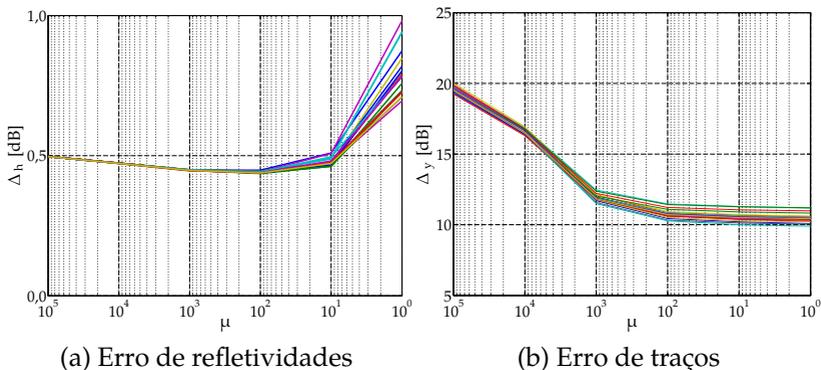


Figura 3.27.: Erros de refletividade e traço estimados variando com os valores de μ para 20 situações com ruído de $\sigma = 0,3$.

A Figura 3.28 (b) ilustra o erro dos traços ponderado pelo desvio padrão da refletividade estimada variando com os μ , na qual percebe-se que as curvas são muito semelhantes até a $\mu = 10$ e, após esta, há uma alteração de comportamento.

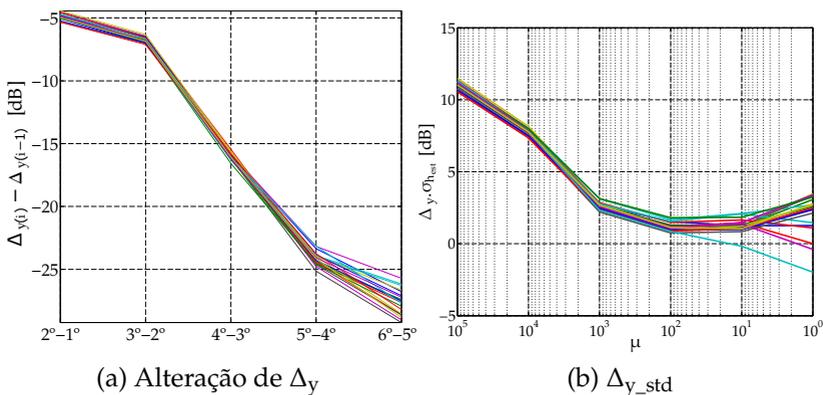


Figura 3.28.: Critérios de seleção de μ utilizando a alteração do erro dos traços e buscando o mínimo de $\Delta_y \cdot \sigma_{y_std}$ para as 20 situações.

Para comparação, avaliou-se os μ que deveriam ser sele-

cionados (mínimo do erro da refletividade) e os que foram selecionados pelos critérios de Eq. (3.22) e Eq. (3.25) para cada uma das 20 situações (Figura 3.29).

A Figura 3.29 mostra que a curva para o método da alteração de $\Delta_y \leq 0,05$ permanece sempre sobreposta à iteração que encontra o valor de μ ideal, desta forma, o método parece ser confiável. O ponto negativo é que o valor de 0,05 não é relacionado ao dado e é escolhido de forma empírica, podendo superestimar ou subestimar a iteração ideal selecionada.

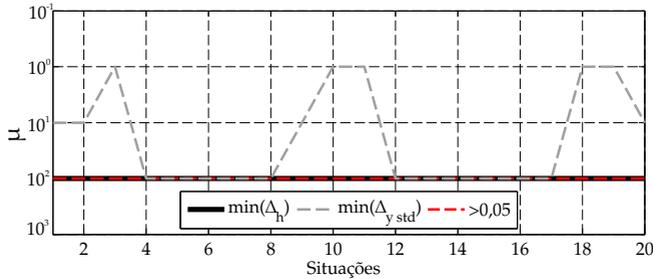


Figura 3.29.: Valor de μ selecionados para 20 situações com ruído variável.

Já o método sugerido, buscando o mínimo de Δ_y ponderando por σ_{h_est} , é baseado em uma seleção relacionada ao dado. Contudo, o critério encontra alguns mínimos que não coincidem com o valor objetivo encontrado através do mínimo da curva de erro das refletividades. O método pode também ser utilizado de forma menos automática e mais qualitativa.

Vale ressaltar que ao analisar os resultados pode-se considerar que a aplicação da deconvolução utilizando o mesmo valor de μ para um mesmo nível de ruído é aceitável. Tendo em vista que todos os 20 casos apontaram, via diferença de refletividade, para a quarta iteração ($\mu = 10^2$) e que a alteração de erro do traço encontrou o mesmo, pode-se considerar este valor de μ como sendo um bom valor para a estabilização da deconvolução.

Visando uma análise do efeito de ruídos de diversas amplitu-

des, aplicou-se a deconvolução para 20 situações em que o desvio padrão do ruído característico adicionado, exposto na Figura 3.7, varia de $\sigma = 1$ a $\sigma = 0,05$, diminuído 0,05 a cada iteração.

Desta forma, a Figura 3.30 (a) ilustra a variação do erro das refletividades com os valores de μ . Nessa, na ordem de lilás para verde, há o aumento do desvio padrão do ruído. É possível perceber que a diferença se mantém baixa e semelhante até o valor de $\mu = 10^1$ corroborando com a faixa proposta por [65]. Após esse valor, quando os fatores μ deixam de ser eficientes, interferem de forma distinta no resultado dependendo do ruído adicionado. Quanto menor o desvio padrão do ruído, menor a diferença entre as refletividades obtidas.

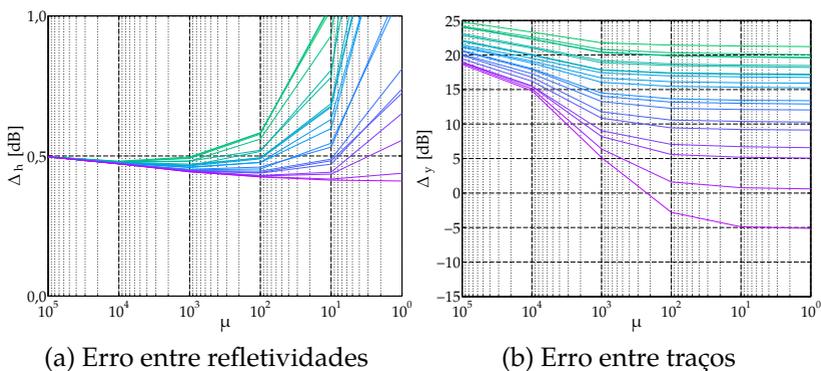


Figura 3.30.: Erro entre refletividades e traços para o um pulso de fase zero variando com os valores de μ para 20 situações com ruído variável.

Já a Figura 3.30 (b) ilustra o erro do traço estimado variando com os valores de μ . Percebe-se, que as curvas seguem um mesmo padrão porém com amplitudes de erro distintas, sendo que quanto menor o σ do ruído adicionado, menor a diferença entre os traços obtidos e maior a amplitude entre primeira e última iterações.

Os critérios de seleção do melhor valor de μ também foram aplicados. O método da alteração da diferença Δ_y , proposto

por Gurrola et al. [65] está ilustrado na Figura 3.31 (a), na qual percebe-se que as curvas seguem o mesmo padrão com pouca diferença em amplitudes.

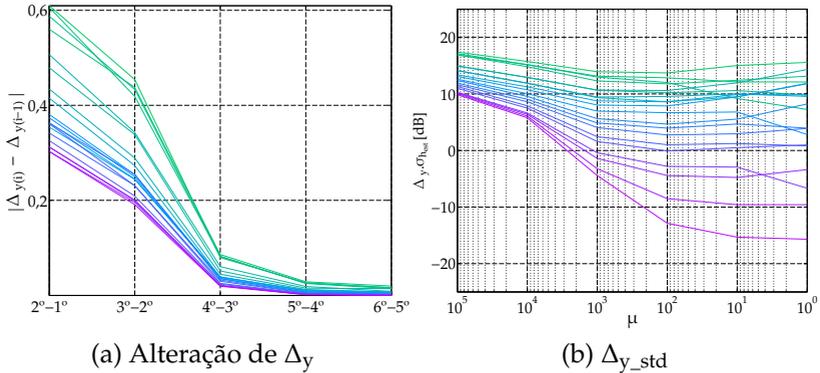


Figura 3.31.: Detecção de μ seguindo a alteração do erro do traço e buscando o mínimo de Δ_{y_std} para as 20 situações.

Já a Figura 3.31 (b) ilustra o método do erro do traço ponderado, na qual percebe-se que as curvas são bem espaçadas e diferem-se em amplitude dependendo do ruído adicionado. Contudo, ao reparar nas curvas relacionadas a ruídos com desvios padrões menores, estas seguem o mesmo padrão e desestabilizam e despadronezam após o μ selecionado através do erro de refletividades.

O gráfico ilustrado na Figura 3.32 expõe a curva dos μ que deveriam ter sido selecionados segundo a curva de erro de refletividade, sempre entre 10^4 e 10^0 . Quanto menor o ruído adicionado, menor o valor de μ necessário para obtenção de bons resultados. A curva do método da alteração de Δ_y , para os traços com maior ruído revela μ menores, ao redor de 10 e para os ruídos menos expressivos (com σ menor) se equiparam à curva do mínimo da refletividade. Já a curva para o método do erro dos traços ponderado se mostra bem variável, sem padrão, revelando que este método, apesar de considerar informações sobre o dado,

não se mostra eficiente, principalmente para situações em que há ruídos de amplitudes distintas.

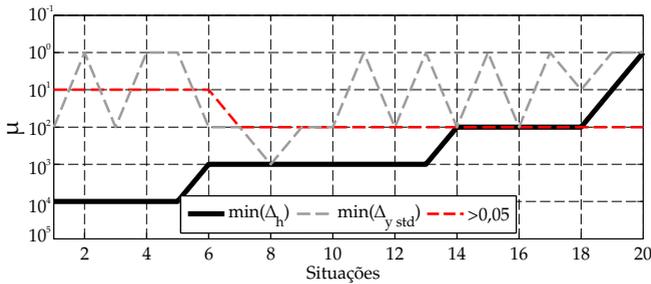


Figura 3.32.: Valores de μ selecionados para 20 situações com ruído variável.

O método descrito em [65] mostrou-se eficiente. Porém foi pensado para a aplicação de dados multicanais, ou seja, com a presença de vários traços a serem empilhados. Dessa forma, ao empilhar os dados antes da realização da deconvolução não há necessidade de realizá-la para cada um dos traços. No caso, como apenas um traço foi analisado e o procedimento envolve a inversão de matrizes, o método tem um custo computacional muito elevado e dispendioso, dependente do tamanho dos traços analisados.

3.5 Deconvolução iterativa no domínio do tempo

A deconvolução iterativa no domínio do tempo é um método descrito por Kikuchi e Kanamori [71], desenvolvido para análise de dados de terremotos. Segundo Ligorria e Ammon [72], o método permite a estimativa da refletividade do fundo marinho através de uma abordagem de minimização de mínimos quadrados (LMS³) de Δ_y , o erro entre o traço sísmico observado, $y(t)$ e o traço sísmico estimado iterativamente, $y_{est}(t)$. Nesse método, o traço sísmico estimado nada mais é que a convolução entre a

³Do inglês: *Least mean square*.

refletividade estimada a cada iteração com o pulso da fonte.

De forma distinta aos outros métodos apresentados, o procedimento não utiliza um fator de amortecimento para estabilização, e sim é baseado na análise da correlação cruzada entre o traço sísmico observado e pulso enviado pela fonte.

É considerado que a refletividade do fundo é modelada como uma sequência de impulsos modulados por coeficientes $m(t_p)$ nos instantes t_p :

$$h(t) = \sum_p m(t) \delta(t - t_p) \quad (3.26)$$

na qual p é o número de impulsos e $m(t_p)$ são valores constantes específicos que caracterizam as amplitudes de reflexão nos respectivos instantes t_p . Desta forma, uma das maneiras de obter a estimativa para o traço sísmico pode ser dada por

$$y_{\text{est}}(t) = \sum_p m(t_p) x(t - t_p), \quad (3.27)$$

no qual, $x(t)$ é o pulso gerado pela fonte.

Primeiramente, busca-se uma forma de avaliar o erro entre os traços original e estimado. Uma alternativa válida é a soma da diferença ao quadrado entre o traço sísmico observado $y(t)$ e o traço estimado $y_{\text{est}}(t)$ considerando a primeira reflexão:

$$\Delta_{y_1} = \int_0^{\infty} [y(t) - m(t_1)x(t - t_1)]^2 dt, \quad (3.28)$$

na qual aplica-se o valor esperado e pode-se reescrever em funções das correlações como

$$\Delta_{y_1} = r_y(0) - 2m(t_1)r_{xy}(t_1) + m(t_1)^2 r_x(0), \quad (3.29)$$

na qual r_y é a autocorrelação do traço sísmico, r_{xy} é a correlação cruzada entre pulso da fonte e traço sísmico e r_x é a autocorrelação do pulso da fonte. Considerando que $r_x(0)$ é positivo, pode-se encontrar o valor mínimo do erro Δ_{y_1} em

relação a $m(t_1)$ considerando que

$$\frac{\partial \Delta_{y_1}}{\partial m(t_1)} = 0 - 2r_{xy}(t_1) + 2m(t_1)r_x(0) = 0 \quad \text{e} \quad (3.30)$$

$$r_{xy}(t_1) = m(t_1)r_x(0), \quad (3.31)$$

que levada à Eq. (3.29) chega a

$$\Delta_{y_1} = r_y(0) - m(t_1)^2 r_x(0). \quad (3.32)$$

Pode-se obter a partir da Eq. (3.31) a amplitude da reflexão:

$$m(t_1) = \frac{r_{xy}(t_1)}{r_x(0)}. \quad (3.33)$$

A partir das equações, pode-se notar que para que a diferença entre o primeiro pico da refletividade original e de suas estimativas, Δ_{h_1} , seja minimizada, a correlação cruzada entre o pulso enviado pela fonte o traço deve ser máxima no instante t_1 . Assim, se obtém o atraso da primeira reflexão e o maior pico da refletividade. Pode-se, a partir da convolução entre a primeira refletividade estimada e o pulso enviado pela fonte, obter um traço residual, $y_{\text{res}}(t)$, que nada mais é que o traço observado subtraído pelo traço estimado para a primeira reflexão,

$$y_{\text{res}}(t) = y(t) - m(t_1)x(t - t_1). \quad (3.34)$$

Repete-se o processo para as próximas reflexões utilizando o traço residual e reflexões são adicionadas ao modelo de refletividade do fundo até que um critério de parada seja atingido. Depois de N iterações, correspondente à construção de N reflexões, os maiores valores de $m(t_p)$ e seus instantes t_p são obtidos e através da Eq. (3.27) pode-se restaurar a refletividade do fundo.

Para a aplicação do método para os três casos foram realizadas 20 iterações de forma que a progressão do método e a evolução

das diferenças fosse ilustrada. Contudo, como critério de parada, é possível cessar as iterações assim que a diferença entre o traço original e o estimado não altere mais que 1% com a iteração subsequente, valor sugerido por [72].

Para o caso do pulso de fase mínima, o erro entre as refletividades obtidas para cada uma das iterações é exposta na Figura 3.33 (a). Já o erro entre os traços, Δ_y , é exposto na Figura 3.33 (b). O padrão das curvas não é semelhante: enquanto o erro das refletividades diminui até a 5ª iteração (número inferior ao de picos da refletividade simulada), a curva de erro dos traços possui uma queda contínua.

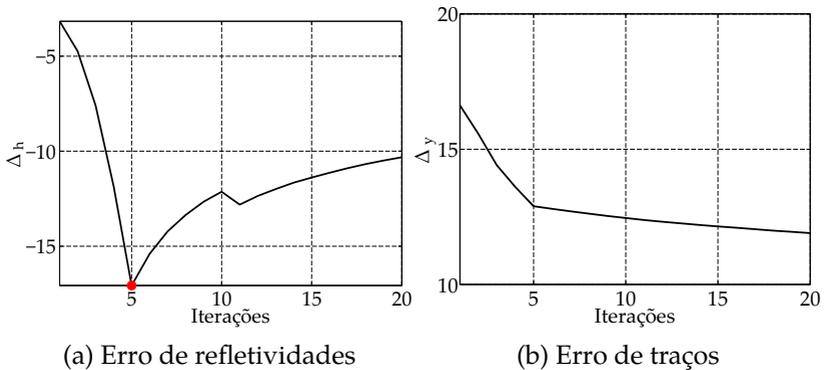


Figura 3.33.: Erros de traços e refletividades originais e estimadas.

Busca-se então, analisar a curva da alteração de erros dos traços com as iterações, exposta na Figura 3.34 (a). Nessa é possível observar que a partir da 6ª iteração não há mais mudança significativa (maior que 0,01) na diferença entre os traços original e estimado, ou seja, há convergência.

O resultado não corrobora com a refletividade ideal estimada através da curva da Figura 3.33 (a). A refletividade resultante da 6ª iteração é exposta na Figura 3.34 (b), muito semelhante à curva observada simulada, exposta na Figura 3.6 (b), com um erro $\Delta_h = 0,011$ baixo inclusive, recuperando bem a informação

de amplitude com um $\xi = 0,9863$.

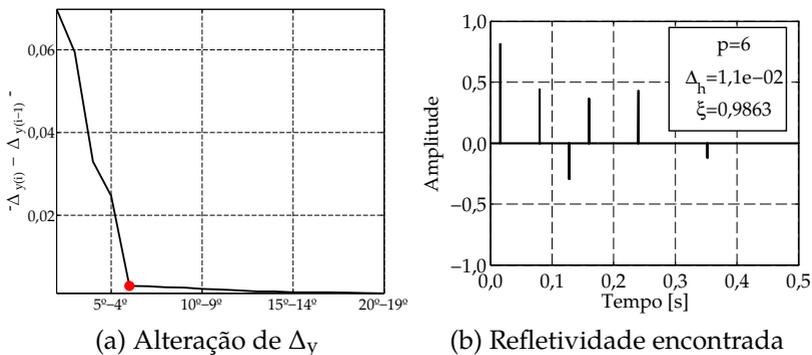


Figura 3.34.: Alteração do erro dos traços e refletividade para deconvolução iterativa para o pulso de fase mínima.

Para as iterações até a que alcançou alteração de Δ_y menor que 0,01, a Fig. 3.35 ilustra a correlação cruzada entre o pulso enviado pela fonte e o traço referente à iteração em questão com a marcação do instante com maior amplitude.

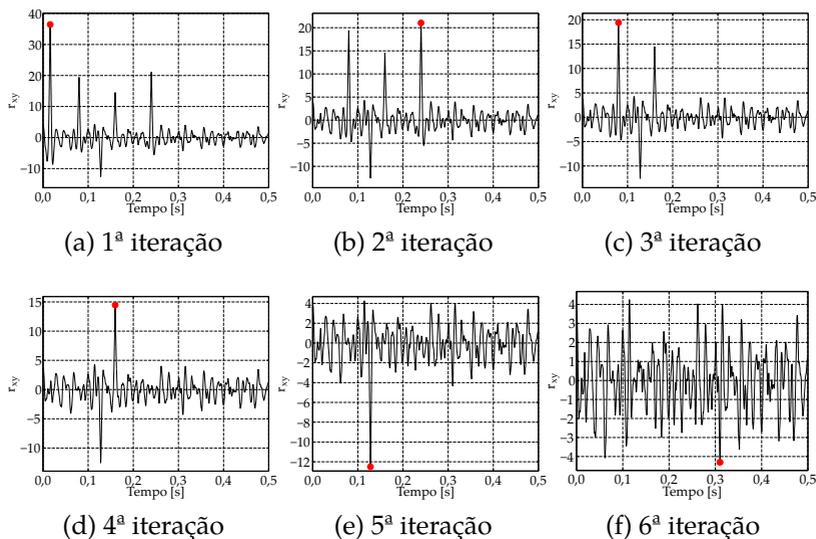


Figura 3.35.: Correlação cruzada entre traço e pulso.

É perceptível que o método encontra primeiramente os instantes com maior amplitude que vão sendo "retirados" do traço sísmico observado com as iterações para que os próximos instantes com grandes amplitudes possam ser analisados. Esta característica de observar primeiro as reflexões com maior amplitude torna o método estável [72].

Já para o caso (2), do pulso de fase zero, o erro Δ_h entre as refletividades obtidas para cada uma das iterações é exposto na Figura 3.36 (a). O erro entre os traços, Δ_y , é exposto na Figura 3.36 (b). Nesse caso a curva de erro de refletividade possui um padrão não regular até a 3ª iteração e depois se torna crescente, enquanto a curva de Δ_y possui um padrão decrescente. E como no outro caso, a curva do erro entre os traços revela um padrão decrescente.

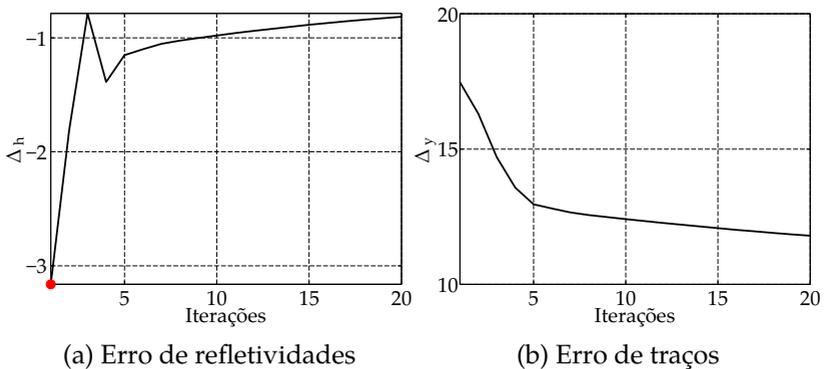


Figura 3.36.: Erro entre traços e refletividades originais e estimadas.

A Figura 3.37 (a) ilustra a alteração do erro dos traços com as iterações, na qual pode-se perceber que a 6ª iteração é a que apresenta a diferença menor que 0,01 em relação à anterior. O valor corresponde ao número de reflexões da refletividade original, exposta na Figura 3.6 (b). A refletividade resultante da 6ª iteração é exposta na Figura 3.37 (b).

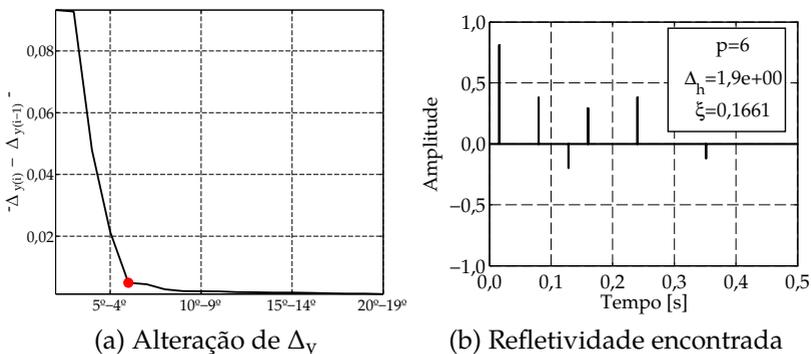


Figura 3.37.: Alteração do erro entre os traços e refletividade para deconvolução iterativa para o caso de fase zero.

Nesse caso, erro entre refletividades é elevado e fator de coerência de amplitude é baixo. Isso se dá devido ao fato de que as correlações cruzadas envolvendo este caso (Figura 3.38), apresentam lóbulos largos levando à localização errônea da reflexão. Mais detalhes são dados no final da seção.

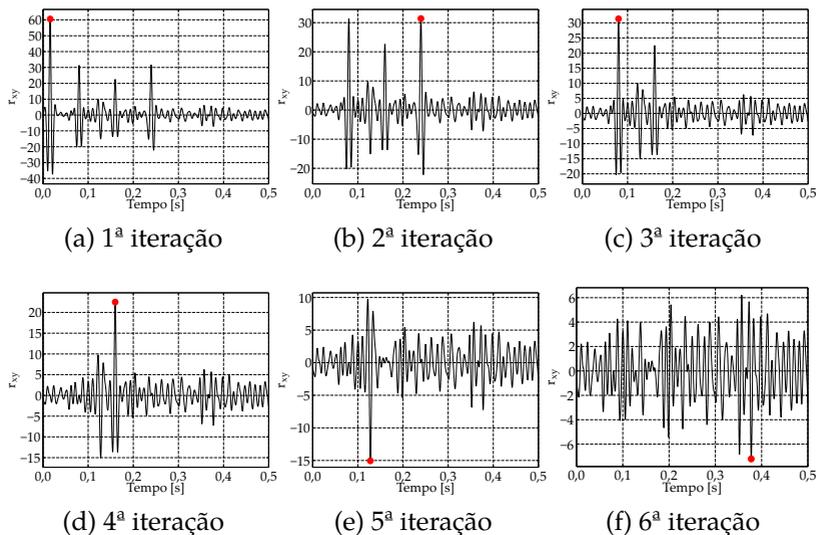


Figura 3.38.: Correlação cruzada entre traço e pulso.

A falha na localização é exposta na Figura 3.39, na qual um destaque na região das duas primeiras reflexões é dado.

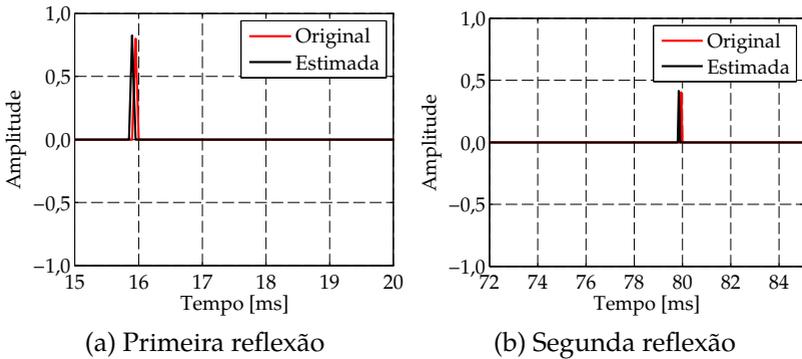


Figura 3.39.: Destaque nas reflexões.

Além disso, da mesma forma que no caso anterior, a Fig. 3.38 ilustra as correlações cruzadas entre pulso e o traço referente à iteração em questão até que o critério de 0,01 seja atingido, a qual encontra primeiro os instantes com as reflexões de maior amplitude (destacadas em vermelho) e as retira iterativamente para que a próxima reflexão possa ser encontrada.

Para o caso (3), no qual se tem um pulso de fase mista, as curvas para o erro entre as refletividades original e estimadas variando com as iterações é exposta na Figura 3.40 (a). Já a Figura 3.40 (b) ilustra o erro entre os traços original e estimados para cada iteração. Nota-se que a curva para a variação do erro entre refletividades tem um decaimento até a 6ª iteração, que corresponde ao número de reflexões e volta a subir a medida em que aumentam as iterações. Já a curva para a variação de Δ_y mostra um decaimento que aparentemente "estabiliza" a partir da 6ª iteração.

Com isso, a Figura 3.41 (a) ilustra a alteração de do erro entre os traços com as iterações, na qual percebe-se que a iteração que apresenta diferença menor que 0,01 em relação à anterior, é a 7ª iteração.

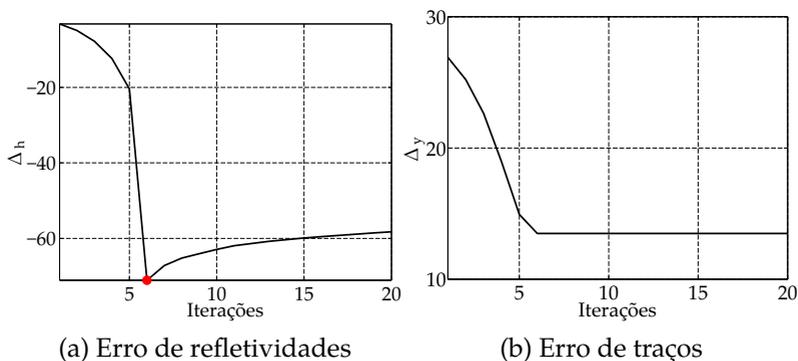


Figura 3.40.: Erro entre traços e refletividades originais e estimadas.

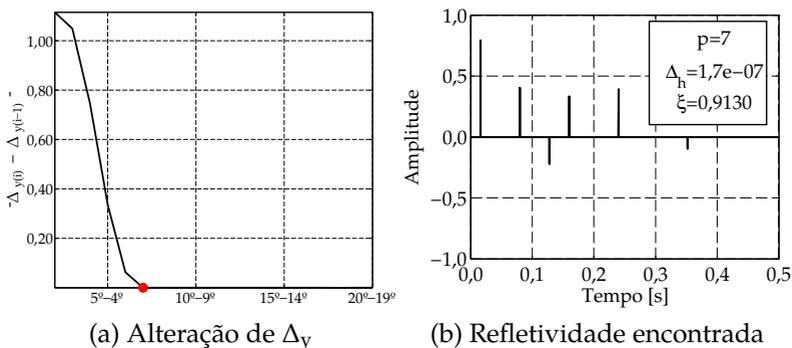


Figura 3.41.: Alteração de erros para o caso (3).

A Figura 3.41 (b) ilustra a refletividade obtida através da 7ª iteração. O resultado é bem semelhante ao original, porém devido à adição de uma iteração há uma reflexão a mais, tão pequena que visivelmente é imperceptível.

O fato da diferença entre os erros de traços subsequentes ter sido detectada na 7ª iteração, e não na 6ª, é um problema relacionado ao critério de parada, que escolhe a diferença menor que 0,01, sendo que a diferença entre a iteração ideal e a anterior foi de cerca de 0,06. Ou seja, dependendo do pulso, o valor de

0,01 pode não ser aplicável.

Dentre os três casos, o que utilizou o *chirp* foi o que apresentou o menor erro entre refletividades (Δ_h), porém o mesmo não foi registrado com o ζ devido à seleção de sete reflexões pelo critério de parada ao invés de seis.

A Figura 3.42 ilustra as correlações cruzadas entre pulso e traço sísmico variando com as iterações.

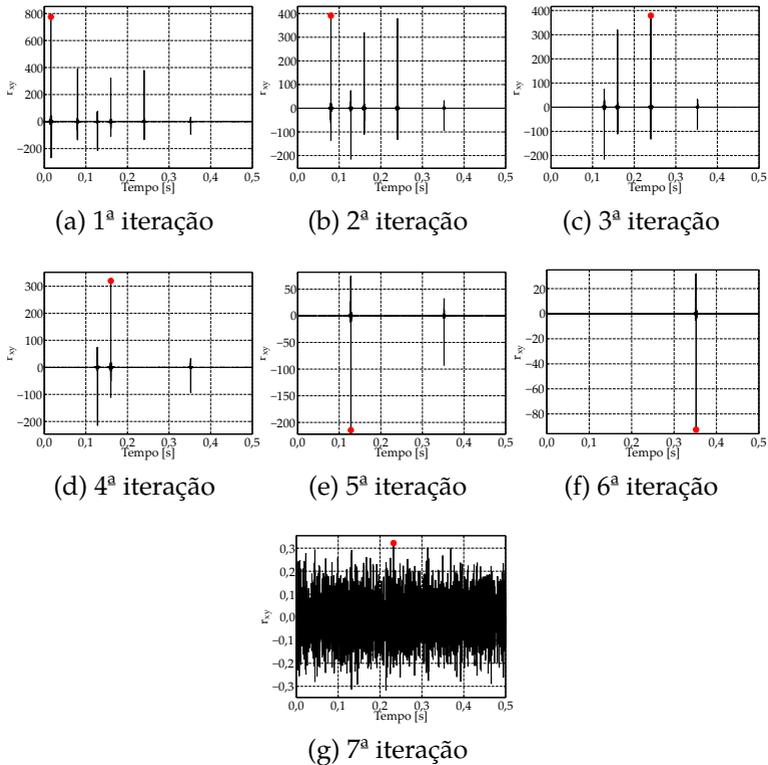


Figura 3.42.: Correlações cruzadas entre traço e pulso para cada iteração.

Nesta é possível perceber que a última das reflexões selecionadas é a reflexão que não existe na informação original, desta forma, a iteração selecionada deveria ter sido a 6ª.

É perceptível que a deconvolução iterativa no domínio

do tempo retornou bons resultados para as estimativas da deconvolução. Algumas adaptações podem ser feitas quanto ao critério de parada. Contudo, visando avaliar o seu desempenho na presença de um ruído de maior amplitude, o algoritmo foi aplicado aos três casos com a presença de um ruído de amplitude 0,8.

Para esta análise apenas as curvas para o critério de parada e a refletividade alcançada através da iteração selecionada são exibidas. Os resultados para o caso (1), que envolve o pulso de mínima fase, estão expostos na Figura 3.43.

Analisando os resultados da Figura 3.43 percebe-se, que com o aumento do ruído, o método se perde para este caso e confunde o conteúdo do pulso com o ruído, selecionando uma refletividade com 10 reflexões a mais que a esperada.

O mesmo pode ser percebido para o caso que envolve o pulso de fase zero, com os resultados expostos na Figura 3.44. De forma pior que no caso anterior, são selecionadas neste caso 12 reflexões a mais que as esperadas.

Para o terceiro caso, que envolve o pulso de fase mista, os resultados são expostos na Figura 3.45. Como é notável, o algoritmo seleciona a 7ª iteração, da mesma forma em que a situação com erro menor. Como já mencionado este problema está relacionado com a escolha do critério de parada. A refletividade resultante é muito semelhante à original (Figura 3.6 (b)) apesar da sétima imperceptível reflexão adicionada.

O fato de que os resultados do caso com o *chirp* são muito melhores que os outros dois casos mesmo na presença de um ruído mais elevado, está relacionado com a concentração de grande parte da energia do pulso no pico central da autocorrelação, desta forma, ao realizar as correlações cruzadas se torna muito mais fácil detectar a influência do pulso em relação ao ruído. Uma análise sobre estas características das autocorrelações dos pulsos está disposta no final da seção.

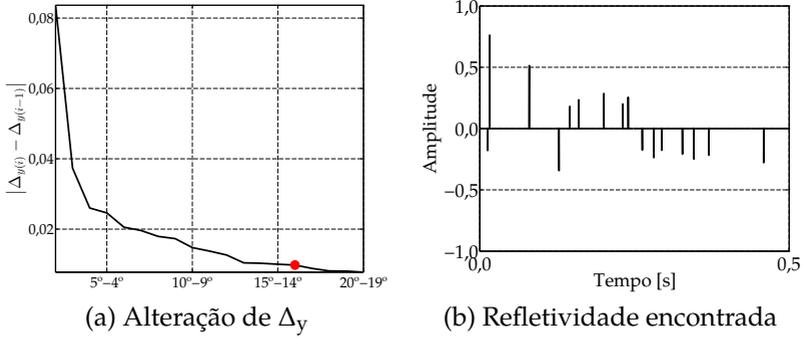


Figura 3.43.: Aplicação com pulso de mínima fase e mais ruído.

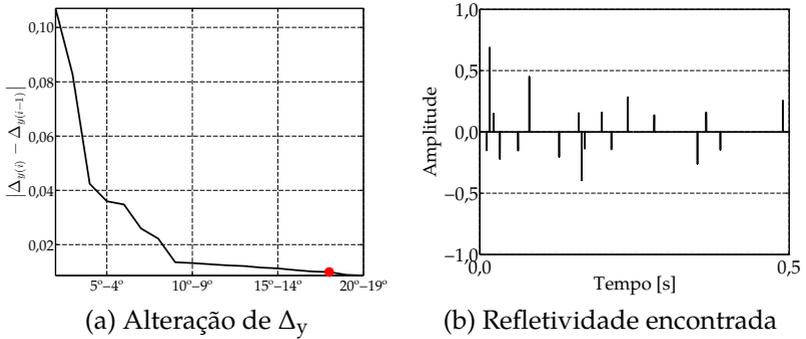


Figura 3.44.: Aplicação com pulso de fase zero e mais ruído.

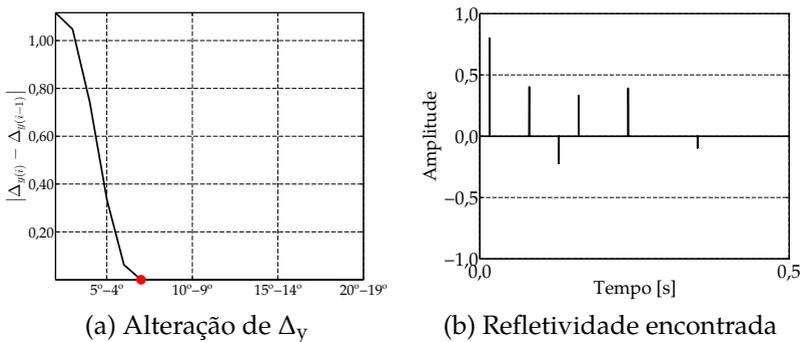


Figura 3.45.: Aplicação com pulso de fase mista e mais ruído.

Após a aplicação do método aos três casos percebe-se que o fato de que a forma da função da refletividade pode ser escolhida pelo usuário do método traz bons resultados, descartando possíveis artefatos e realçando apenas as reflexões de interesse, em ordem de importância. Contudo, dependendo do pulso e das características do ruído no traço, o algoritmo pode se confundir ao detectar as reflexões e gerar estimativas ambíguas e/ou errôneas da refletividade do meio.

Com a análise dos resultados para a deconvolução iterativa no domínio do tempo foi possível perceber que os resultados envolvendo o pulso de fase mista (neste caso, um *chirp*) são muito melhores quando comparados aos outros dois, independente da amplitude do ruído adicionado. Dentre os outros dois casos, o que traz melhores resultados para a deconvolução é o de fase mínima.

É possível analisar que o desempenho das deconvoluções é relacionado com a autocorrelação dos pulsos enviados. Com isto em vista, as autocorrelações dos pulsos utilizados no caso (1) de fase mínima, no caso (2) de fase zero e no caso (3) de fase mista foram avaliadas são expostas na Figura 3.46 (a) e a Figura 3.46 (b) ilustra um aumento para que os efeitos possam ser percebidos com mais clareza.

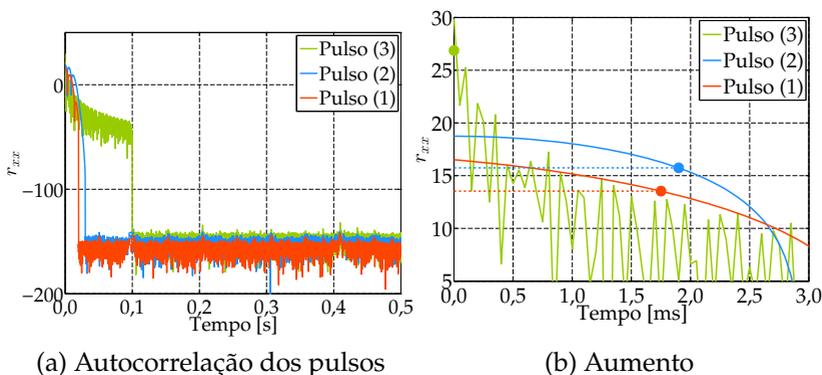


Figura 3.46.: Autocorrelação dos pulsos.

Na Figura 3.46 percebe-se que o pulso (1), de fase mínima, possui um lóbulo principal bastante largo e com bastante vazamento. O mesmo pode ser percebido no pulso (2), de fase zero, porém com uma largura de lóbulo principal menor e com menos erro de vazamento. Contudo, a largura de decaimento de 3 dB é maior no pulso de fase zero, o que pode valorizar o ruído quando adicionado e dificultar a estimativa do posicionamento e amplitude das reflexões, levando às alterações das curvas de Δ_h , como visto na aplicação dos métodos de deconvolução.

Contudo, ao observar a autocorrelação do pulso (3), de fase mista, percebe-se que este possui uma amplitude alta, até 10 dB mais alta que a dos outros dois pulsos, com um lóbulo lateral fino, com pouco vazamento e com uma largura de decaimento de 3 dB muito pequena, o que faz com que o ruído não seja valorizado, e sim, o conteúdo de interesse. Isso facilita de forma visível a identificação do posicionamento e amplitudes de reflexões ao realizar a deconvolução.

Desta forma, se salienta que além da quantidade de ruído adicionado e da fase do pulso, as características da autocorrelação são importantes para o desempenho dos algoritmos de deconvoluções.

3.6 Deconvolução em impulsos

Partindo das hipóteses de que o traço sísmico pode ser modelado com um processo aleatório estacionário e que sua parte previsível é relacionada ao pulso enviado pela fonte (nesse caso considerado de fase mínima) enquanto a resposta do substrato é não previsível e aleatória, alguns pesquisadores [62, 73], aplicaram a técnica desenvolvida por Wiener [74], a deconvolução preditiva, aos traços sísmicos. Nesse procedimento, o pulso enviado pela fonte é desconhecido e se deseja obter informações acerca da refletividade. Desta forma, estimativas estatísticas são realizadas para que resultados sejam obtidos. A deconvolução preditiva abriu muitos caminhos nas pesquisas

envolvendo processamento de dados sísmicos, porém suas premissas são frequentemente violadas a tornando inefetiva [61].

Um dos tipos de deconvolução preditiva mais utilizados é o da deconvolução por impulsos⁴. Segundo Mousa e Al-Shuhail [55], para a aplicação da deconvolução por impulsos em dados sísmicos é assumido que: (1) a Terra é composta por camadas horizontais de velocidade constante; (2) o pulso enviado é de fase mínima; (3) a refletividade do substrato é uma série de impulsos aleatórios; (4) não há componente de ruído.

O objetivo da deconvolução por impulsos é converter o pulso enviado pela fonte em um impulso de fase zero e de largura zero, ou seja, um Delta de Dirac ($\delta(t)$). Pode-se obter um filtro inverso que retira a parte previsível do traço sísmico, relacionada ao pulso [67, 75]. Com o efeito do pulso eliminado, se tem a informação sobre a refletividade do meio. O filtro inverso $v(t)$ é tal qual:

$$x(t) * v(t) = \delta(t), \quad (3.35)$$

o qual possui a Transformada de Fourier dada por:

$$X(f)V(f) = 1, \quad (3.36)$$

na qual $X(f)$ e $V(f)$ são as Transformadas de Fourier de $x(t)$ e $v(t)$, respectivamente. Remanejando a eq. (3.36), chega-se a

$$V(f) = \frac{1}{X(f)} = \left(\frac{1}{|X(f)|} \right) e^{-\phi_x(f)}, \quad (3.37)$$

na qual $\phi_x(f)$ é a fase do pulso. Vale perceber, então, que

$$|V(f)| = \frac{1}{|X(f)|} \quad \text{e} \quad \phi_v(f) = -\phi_x(f), \quad (3.38)$$

⁴Do inglês: *Spiking deconvolution*.

na qual $\phi_v(f)$ é o espectro de fase do filtro inverso $v(t)$. Pode-se perceber, então, que os espectros de amplitudes do pulso e do seu filtro inverso são inversos e os espectros de fase são de sinal opostos.

Com isso, é obtido o filtro inverso realizando a Transformada Inversa de Fourier e pode-se aplicá-lo ao traço sísmico ($y(t)$) para obter as reflexões do meio investigado:

$$v(t) * y(t) = v(t) * [x(t) * h(t)], \quad (3.39)$$

$$v(t) * y(t) = \delta(t) * h(t) = h(t). \quad (3.40)$$

Como, em geral, não tem-se a informação do pulso enviado pela fonte, a deconvolução por impulsos utiliza-se de uma solução para que esse não seja necessário para a obtenção da refletividade, ou seja, é uma técnica cega⁵. Deve-se, portanto, estimar o pulso enviado pela fonte ou encontrar relações entre espectro de amplitude ou autocorrelações do traço sísmico e o pulso.

Assume-se que a refletividade do meio pode ser aproximada a uma série de impulsos randômicos [9], desta forma, o espectro de amplitude pode ser considerado plano e constante:

$$|H(f)| = H_0. \quad (3.41)$$

A partir do modelo convolucional chega-se a

$$|Y(f)| = |H(f)| |X(f)| = H_0 |X(f)|, \quad (3.42)$$

ou seja, o espectro de amplitude do traço, $Y(f)$, é uma versão escalada por H_0 do espectro de amplitude do pulso enviado pela fonte, $X(f)$. Utilizando dados simulados (casos 1, 2 e 3 apresentados anteriormente), é possível comparar os espectros

⁵Do inglês: *Blind deconvolution*.

de amplitude. Sendo assim, a Figura 3.47 ilustra, para os três casos estudados, os espectros de amplitude do pulso ($X(f)$) e do traço ruidoso ($Y(f)$), na qual é perceptível que as curvas possuem um comportamento semelhante, sendo que a curva de ($Y(f)$) apresenta bastante oscilação devido ao caráter não tão constante do espectro da refletividade, como percebido na Figura 3.10 (a). Além disso, principalmente no caso (2) percebe-se uma diferença de escala.

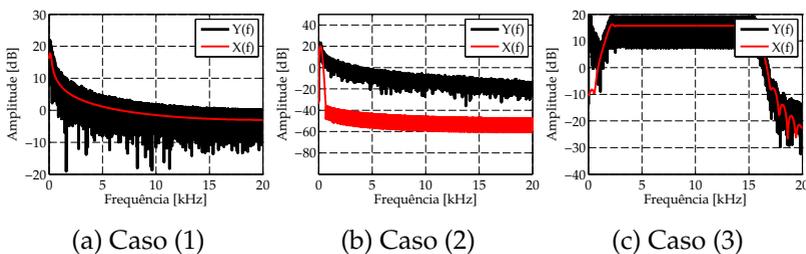


Figura 3.47.: Espectros de amplitude dos pulsos e dos traços para os pulsos de fase mínima, fase zero e fase mista, respectivamente.

Partindo do princípio de que a refletividade, $h(t)$, é um trem de impulsos aleatórios, sua autocorrelação, r_h é zero em todos os instantes com exceção de $t = 0$, na qual é igual à energia de $h(t)$, chamada $r_h(0)$. Com isso, a autocorrelação da refletividade pode ser aproximada por:

$$r_h(t) = r_h(0)\delta(t). \quad (3.43)$$

Com isto, é possível encontrar uma relação entre as autocorrelações do traço sísmico ($r_{yy}(t)$) e do pulso enviado pela fonte ($r_x(t)$):

$$r_{yy}(t) = y(t) * y(-t) = [h(t) * x(t)] * [h(-t) * x(-t)], \quad (3.44)$$

levando em conta que a operação de convolução é comutativa:

$$r_{yy}(t) = r_h(t) * r_x(t) = r_h(0)r_x(t). \quad (3.45)$$

Dessa forma, tem-se que a autocorrelação do traço sísmico é uma versão escalada por $r_h(0)$ da autocorrelação do pulso enviado pela fonte. A Figura 3.48 ilustra, para os três casos estudados nesse trabalho, as autocorrelações do pulso ($X(f)$) e do traço ruidoso ($Y(f)$), na qual nota-se que as curvas possuem um comportamento semelhante. Deve-se destacar que para o terceiro caso, o eixo temporal foi exibido até 0,01 s para que as curvas pudessem ser melhor visualizadas.

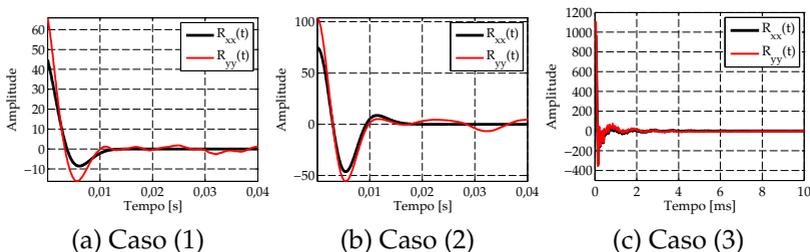


Figura 3.48.: Autocorrelações dos pulsos e dos traços para os pulsos de fase mínima, fase zero e fase mista, respectivamente.

A partir das Eq. (3.45) e Eq. (3.41), pode-se inferir que é possível utilizar o espectro ou a autocorrelação do traço sísmico na ausência da informação sobre o pulso.

Tendo em vista que em casos reais sempre existirá algum tipo de ruído e que a amostragem do traço desempenha um papel importante, o resultado obtido em Eq. (3.35) pode não ser exatamente o desejado. Desta forma, é desejável encontrar um filtro inverso, $v(t)$, que minimize a diferença

$$B = \sum [\delta(t) - v(t) * x(t)]. \quad (3.46)$$

Isto pode ser alcançado, segundo Mousa e Al-Shuhail [55],

obtendo a variação da diferença B em relação ao filtro inverso $v(t)$:

$$\frac{\partial B}{\partial v(t)} = 0, \quad (3.47)$$

como resultado, tem-se que

$$r_x(t) * v(t) = r_{\delta x}(t), \quad (3.48)$$

na qual $r_x(j-t)$ é a autocorrelação de $x(t)$ e $r_{\delta x}(j)$ é a correlação cruzada entre $\delta(t)$ e x . A Eq. (3.48) pode ser escrita em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(N-1) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(N-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_x(N-1) & r_x(N-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(0) \\ v(1) \\ \vdots \\ v(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(0) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Em geral, r_x e $r_{\delta x}$ estão disponíveis, o que torna possível encontrar o filtro $v(t)$, já que a matriz de autocorrelação é uma Matriz Toeplitz⁶ que pode ser facilmente invertida.

Com o filtro inverso em mãos, basta aplicá-lo ao traço, de acordo com a Eq. (3.40), para obter a estimativa da refletividade do ambiente. A Figura 3.49 ilustra os resultados para a aplicação da deconvolução em impulsos para os três casos tratados no trabalho.

Corroborando com informações de bibliografia [9, 55], os resultados para a refletividade obtida são significantes apenas para o caso (1), que envolve o pulso de fase mínima. Há a identificação dos picos, uma subestimativa da amplitude com um $\xi = 0,2276$ e a criação de artefatos que podem tornar a identificação das reflexões ambigua.

⁶Matriz que possui, da esquerda para a direita, diagonais descendentes contantes.

Nos outros dois casos, a deconvolução em impulsos não é capaz de trazer bons resultados. Isso pode ser devido ao fato de que o método assume que o pulso possui uma fase mínima, quando não tem.

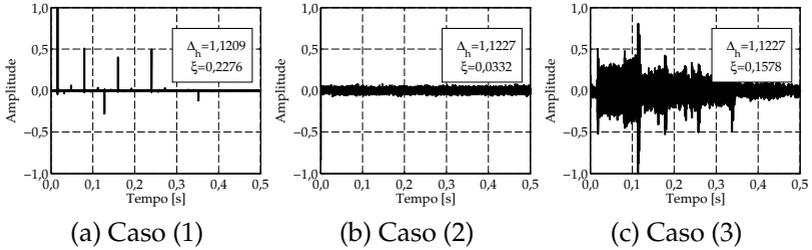


Figura 3.49.: Refletividades via deconvolução por impulsos para os pulsos de fase mínima, fase zero e fase mista, respectivamente.

Mesmo para o caso de fase mínima, os resultados não são tão satisfatórios quanto os encontrados com a aplicação dos algoritmos de deconvolução determinísticos.

De acordo com as observações de Warner [67], apesar de as hipóteses assumidas serem restritivas, o método quando aplicado a dados sísmicos que se adequem a elas, retornam resultados expressivos. Porém, o grande problema está relacionado a encontrar dados sísmicos que sigam todas as premissas.

3.7 Considerações sobre os métodos

Neste capítulo foram expostos e analisados três métodos determinísticos e um estatístico para a deconvolução de traços sísmicos. Dentre os determinísticos foram avaliadas a deconvolução clássica no domínio da frequência sem e com regularização, a deconvolução simultânea no domínio do tempo e a deconvolução iterativa no domínio do tempo. A técnica

estatística abordada foi a deconvolução em impulsos.

Três casos foram avaliados para os métodos. O primeiro envolveu um pulso de fase mínima, o segundo um de fase zero e por último, um de fase mista. Por ser estável, o pulso de fase mínima faz com que a deconvolução seja estável. Contudo, para os outros pulsos, devido a sua natureza, devem ser encontradas formas de estabilização para a obtenção de bons resultados no que diz respeito a estimativa das reflexões.

Simple e intuitiva, a deconvolução no domínio da frequência com amortecimento não trouxe bons resultados para o caso do pulso de fase zero, que necessita de regularização. Valores de $\Delta_h = 1,2320$ e $\zeta = 0,0291$ foram obtidos para o erro entre refletividades e fator de coerência de amplitudes com a utilização do δ' ideal selecionado. Para o caso de fase mista, os resultados quando analisados qualitativamente, apresentaram reflexões bem definidas e menos ruído. Foram obtidos valores de $\Delta_h = 0,4940$ e $\zeta = 0,9373$ para os parâmetros de comparação. A melhora do pulso de fase zero utilizado para o de fase mista foi de 149% se tratando do erro entre refletividades e 96% para o fator de coerência de amplitudes. Essa diferença do desempenho da deconvolução com amortecimento para os pulsos de fase zero e mista é devida à largura de banda do pulso. Por ser mais largo, o *chirp*, utilizado como pulso de fase mista, faz com que menos da energia da refletividade seja perdida na deconvolução e com que as reflexões se apresentem mais proeminentes.

Deve-se ressaltar que o parâmetro δ' foi introduzido para que a regularização fosse realizada baseada na amplitude máxima do espectro do pulso. Valores de regularização para cada um dos pulsos, levando em conta parâmetro do pulso são sugeridos.

A deconvolução simultânea no domínio do tempo, apesar de apresentar um maior custo computacional devido à inversão de matrizes, permite encontrar bons resultados com regularizações coincidentes, baseadas em parâmetros da própria refletividade estimada. Uma vantagem em relação à deconvolução no domínio da frequência. Os parâmetros podem ser alterados de-

pendendo da intenção da análise. Oferece melhores resultados aos dois casos que necessitam de regularização, com destaque ao pulso de fase zero, com o qual foi possível chegar a valores de $\Delta_h = 1,1064$ e $\xi = 0,0335$. Estes valores são cerca de 11% e 13% melhores que os valores encontrados para este caso através da deconvolução com regularização no domínio da frequência. Já para o pulso de fase mista utilizado, os valores encontrados foram $\Delta_h = 0,9620$ e $\xi = 0,2593$, cerca de 90% e 2,5% melhores que os resultados para a deconvolução com regularização no domínio da frequência.

Como critério de parada para a detecção da melhor regularização na aplicação da deconvolução simultânea no domínio do tempo é utilizada a alteração do erro entre traço original e estimado de uma iteração para a outra. Contudo, foi sugerida uma nova abordagem para que a análise não seja tão empírica e tenha relação com o dado. Para isso, leva-se em conta o desvio padrão da estimativa da refletividade. Bons resultados foram obtidos, principalmente levando em conta que o método desenvolvido não é empírico. Contudo, deve-se aprimorar a técnica para que melhores resultados sejam obtidos. Com a análise de diversos casos, foi possível observar, corroborando com a bibliografia, que valores de regularização entre 1 e 100 são os que oferecem menores erros na estimativa da refletividade. Deve-se ressaltar que o ruído do traço pode ser minimizado com a aplicação da técnica simultaneamente a um mesmo conjunto de traços, o que não adiciona custo computacional à aplicação já que a inversão de matriz é realizada apenas uma vez.

Já a técnica da deconvolução iterativa, que não lida com regularização, se mostrou eficiente na detecção das reflexões para todos os casos com a aplicação do ruído característico de amplitude 0,3. Por permitir a definição de uma forma para a função refletividade, apenas estimando localização e amplitude de reflexões através das correlações cruzadas entre pulso e traço sísmico, o método traz resultados limpos e claros. Para o pulso de fase mínima os valores dos parâmetros de comparação

obtidos são de $\Delta_h = 0,0010$ e $\xi = 0,9863$, ou seja, erro entre refletividades baixo e alta recuperação da localização e amplitudes das reflexões. Já para o pulso de fase zero os valores encontrados foram de $\Delta_h = 1,9000$ e $\xi = 0,1661$. Apesar do valor elevado do erro, a recuperação da amplitude é melhor do que a obtida através dos outros dois métodos apresentados anteriormente. Já para o pulso de fase mista utilizado, o erro entre refletividades Δ_h é muito próximo a zero enquanto o fator de coerência de amplitudes é elevado com um valor de $\xi = 0,9130$.

Apesar de a deconvolução iterativa retornar melhores valores de parâmetros de comparação para o pulso de fase zero, quando os fatores de coerência de amplitude dos três casos de trabalho são comparados para esta deconvolução percebe-se que o pulso de fase zero é o que traz os piores resultados. Este fato é devido à alta largura de banda do lóbulo principal da autocorrelação deste pulso, alta largura de lóbulo principal e vazamento de lóbulos secundários. Estas características são refletidas na correlação cruzada entre traço e pulso, fazendo com que a localização da amplitude máxima possa ser equivocada, resultando em uma estimativa errada da posição da reflexão.

Para avaliar o desempenho da deconvolução iterativa, foi adicionado um ruído maior de amplitude 0,8. Desta forma, a técnica obteve dificuldades em estimar a refletividade dos pulsos de fase mista e fase zero, adicionando ambiguidades ao resultado. Contudo, o pulso de fase mista utilizado continuou retornando o mesmo resultado que com a adição de um ruído menor. Da mesma forma que explica-se o péssimo desempenho do pulso de fase zero, explica-se o bom desempenho do pulso *chirp*. Sua largura de banda do lóbulo principal da autocorrelação é muito pequena e a energia é concentrada no pico principal, o que faz com que a energia do pulso seja valorizada e o ruído rejeitado mesmo em situações não favoráveis.

A deconvolução por impulsos, única técnica estatística tes-

tada, é aplicada de forma simples e intuitiva. Trabalha com a relação entre características do traço sísmico e do pulso na ausência da informação de geração do sinal. O método assume muitas condições para que seja aplicado. Quando as premissas são satisfeitas, como no primeiro caso avaliado, de fase mínima, a abordagem traz uma estimativa satisfatória da refletividade, na qual é possível identificar as reflexões e a presença de artefatos. Os parâmetros de comparação encontrados são $\Delta_h = 1,1209$ e $\xi = 0,2276$. Contudo, para situações em que as premissas não são válidas, o método deixa a desejar e outras alternativas devem ser avaliadas.

Em todas as técnicas, é perceptível que melhores resultados são obtidos através da utilização do pulso de fase mínima devido à sua estabilidade. Em geral, segundo Leinbach [47], filtros de fase mínima são encontrados de forma comum na natureza. Porém, como a assinatura da fonte enviada para o meio pode apresentar características de fase não mínima, é possível aplicar técnicas para a reconstrução do pulso para que a fase se torne mínima e as técnicas possam se tornar mais efetivas. Estas técnicas envolvem a utilização do espectro de amplitude e de transformadas de Hilbert e são exploradas em alguns trabalhos [49, 76, 77].

Os resultados são sumarizados na Tabela 3.1. Pode-se observar que a deconvolução em impulsos, única técnica probabilística empregada, traz resultados piores que as deconvoluções determinísticas aplicadas para todos os três casos. Com isso, ao ter conhecimento ou estimativa sobre o pulso enviado pela fonte, melhores resultados para a deconvolução podem ser obtidos. No próximo capítulo, a recuperação e estimativa do pulso enviado pela fonte é abordada.

Tabela 3.1.: Resultados das deconvoluções sumarizados.

	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Δ_h	ξ	Δ_h	ξ	Δ_h	ξ
Deconvolução com regularização	0,0350	1,0000	1,1239	0,0291	0,4940	0,9373
Deconvolução simultânea	0,0353	1,0000	1,1064	0,0335	0,2593	0,9620
Denconvolução iterativa	0,0010	0,9863	1,9000	0,1661	$1,7 \times 10^{-7}$	0,9130
Deconvolução em impulsos	1,1209	0,2276	1,1227	0,0332	1,1227	0,1578

4 Recuperação de pulso

De acordo com Spadini [78] e White e O'Brien [79], a deconvolução é considerada determinística quando há conhecimento da forma do pulso enviado ao ambiente ou cega quando a única informação possuída é o traço sísmico. A deconvolução determinística é usualmente utilizada para encontrar com melhor exatidão a refletividade do fundo e/ou a forma do pulso (quando tem-se a informação sobre a refletividade). A deconvolução cega é, no entanto, mais comumente utilizada pois em casos reais é raro o conhecimento a respeito da forma de onda enviada pela fonte. Com isso, na maioria dos casos, o pulso utilizado para a realização da deconvolução é apenas uma estimativa do pulso real emitido.

O pulso enviado pela fonte pode ser gravado diretamente sempre que é enviado ao ambiente. Porém, os registros do pulso se sobrepõe e tornam-se complicados de se diferenciar. Além disso, as medições diretas não incluem as funções de transferência da coluna d'água e da subsuperfície [79]. Apesar disso, a forma do pulso permanece relativamente constante durante as medições, o que permite mediante a aplicação de algumas técnicas, que seja possível restaurá-la [79].

É mais comum que a recuperação do pulso seja feita estatisticamente através das gravações ou através de dados de poços¹. Os métodos estatísticos são abordados desde meados

¹Dados obtidos através de métodos geológicos, diretamente no local de estudo que podem ser comparados ao traço sísmico e permitem a estimativa do pulso enviado pela fonte.

dos anos 1950, quando o assunto foi abordado por Robinson [73] e desde então são utilizados por diversos autores ([79], [75], [80], [81], [82]) que buscam novas técnicas de recuperação de pulso a partir do espectro de magnitude ou da função autocorrelação do traço sísmico. Este tipo de abordagem, não permite a recuperação da fase do pulso, que é possível através da medição direta e de dados de poços.

Ao aplicar técnicas de deconvolução cega para obtenção da estimativa do pulso enviado pela fonte podem ocorrer distorções. Estas diferenças entre o pulso real e o estimado podem camuflar pequenas reflexões, distorcê-las e causar ambiguidades na exposição da imagem sísmica [83]. Porém, segundo White e O'Brien [79], mediante uma série de premissas, é possível obter o pulso enviado e modificado pelas funções de transferência do ambiente.

Com isso, a estimativa da assinatura da fonte é um dos problemas clássicos da sísmica de exploração [84]. Segundo Rondenay [85] e Warner [67], é uma etapa importante e que pode contribuir para a inserção de erro na deconvolução para obtenção da refletividade do meio. Busca-se alternativas para estimar o pulso, já que se este é bem estimado, pode ser deconvolvido com o traço sísmico mediante a aplicação de diferentes técnicas [86], como as estudadas no Capítulo 3.

Yi et al. [87] compararam quatro diferentes métodos para a estimativa do pulso enviado pela fonte: (1) através do sinal do fundo; (2) através dos dados de poços; (3) estatisticamente recuperando a amplitude através de dados sísmicos e a fase através de dados de poços e (4) através da deconvolução por impulsos. As estimativas de pulso foram aplicadas à deconvolução e trouxeram resultados tão bons quanto aos obtidos por métodos computacionais mais robustos.

Partindo do princípio que dados de poços nem sempre estão disponíveis, Edgar e der Baan [88] aplicaram três métodos para a estimativa de pulsos de fonte que permitem a detecção da fase sem a necessidade dos dados *in situ*. Os resultados foram

satisfatórios quando comparados com os dados de poços. Foi concluído que os métodos estatísticos podem ser utilizados como controladores de qualidade dos dados de poços, ou na ausência destes, como método principal.

Zheng et al. [89] propuseram um método para a recuperação do pulso da fonte baseado na Transformada de Laplace e no Método de Mínimos Quadrados (LMS)², que permite reconstruir os componentes coerentes e estimar o pulso principal mesmo quando a Relação Sinal Ruído³ é baixa.

No presente trabalho, busca-se a aplicação de uma técnica baseada na busca por uma combinação de funções simples que recuperam a forma do pulso enviado pela fonte através de um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo LMS, apresentada em [90]. Primeiramente, a escolha de funções simples e o algoritmo adaptativo são expostos. Em seguida, o método é validado utilizando-se de traços sísmicos simulados gerados através das funções simples e corrompidos por ruído. Com o método validado, aplica-se técnicas de deconvolução determinísticas e a técnica estatística exposta no trabalho (deconvolução em impulsos) para a comparação.

4.1 Decomposição em funções simples

Para apresentar e validar o método, um pulso de *airgun* foi escolhido para ser utilizado como referência. Sua escolha ocorreu devido à sua ampla utilização na investigação sísmica marinha e devido à repetibilidade e à confiabilidade da sua assinatura espectral. Pulsos emitidos *airgun* podem ser considerados como sendo de fase mínima [91], devido à sua característica de apresentar alta energia nos primeiros instantes, apresentando estabilidade para deconvolução. Apesar desta escolha, o método pode ser adaptado para ser aplicado a qualquer outro pulso.

²Do inglês: *Least Mean Square Method*.

³Do inglês: *Signal-to-noise ratio*.

Uma série de métodos de decomposição pode ser utilizada para modelar o sinal de referência, tais como: Fourier, Séries de Wavelet e Decomposição Empírica de Modos. Contudo, é possível escolher duas ou mais funções simples que quando combinadas podem reconstruir as principais características do pulso da fonte com a utilização de menos coeficientes, o que possibilita a diminuição do ruído, como será visto em frente. O conceito de decomposição de um sinal em várias funções já foi utilizado por alguns autores em diversos campos de pesquisa como uma abordagem de decomposição de pulsos arteriais [92] e na confecção de métodos para comunicação em banda larga [93].

O método proposto faz a união de duas ou mais funções simples no domínio do tempo (t) para a reconstrução do pulso enviado pela fonte. No caso, como um pulso de *airgun* é analisado, foram escolhidos um cosseno e uma função exponencial:

$$f_1(t) = \cos(2\pi\alpha t) \quad e \quad (4.1)$$

$$f_2(t) = e^{-\pi^2\beta^2 t^2}, \quad (4.2)$$

na qual α , correspondente à frequência da função cossenoidal, e β , corresponde à abertura da função exponencial, são os coeficientes a serem adaptados.

Deve-se ressaltar que é desejável ter um conhecimento prévio da possível forma de onda do pulso para que as funções sejam escolhidas. Com isso, qualquer outra combinação de funções que seja capaz de recuperar o pulso enviado pode ser utilizada. Desta forma, existe uma relação de compromisso que deve ser observada. Quanto menos funções simples e coeficientes a combinação tiver, mais robusto será o sistema já que menos graus de liberdade reconstruirão o padrão de ruído intrínseco ao traço, fazendo com que o sistema não seja afetado por ele. Por outro

lado, o número de graus de liberdade também influencia na eficiência da fiel reprodução do pulso estimado.

Considerando que $f_1(t)$ e $f_2(t)$ possuem 60 ms com uma frequência de amostragem de 10 kHz⁴, a multiplicação das Eq. (4.1) e Eq. (4.2) resulta no pulso de fase mínima ilustrado na Figura 4.1.

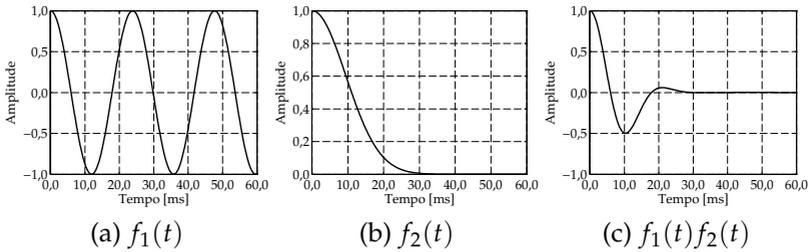


Figura 4.1.: Decomposição em funções simples - fase mínima.

A Figura 4.2 ilustra um exemplo de um pulso gerado através da composição das funções expostas na Eq. (4.1) e Eq. (4.2) sobre um pulso de *airgun* medido por Mikaelson [94], utilizando o algoritmo que será apresentado nas próximas seções.

Nota-se que no domínio do tempo (curva exposta na Figura 4.2 (a)) e principalmente no domínio da frequência (curva exposta na Figura 4.2 (b)) há uma concordância qualitativa satisfatória entre as curvas real e estimada.

No domínio do tempo, o padrão de oscilação entre parte positiva e negativa com suavização ao longo do pulso é recuperado. Já no domínio da frequência o pico máximo e o decaimento ao longo das frequências é resgatado. A concordância, como mencionado, pode ser melhorada com o

⁴No Capítulo 3 a frequência de amostragem de 20 kHz foi utilizada em todos os casos para que houvesse uniformidade nas comparações já que o pulso de fase mista, do tipo *chirp*, utilizado tinha como característica uma banda de frequência entre 800 Hz e 8 kHz. Para este caso, não se faz mais necessário uma frequência de amostragem tão elevada e uma frequência de amostragem menor é utilizada para que as operações sejam mais rápidas.

aumento do número de funções base e coeficientes a adaptar.

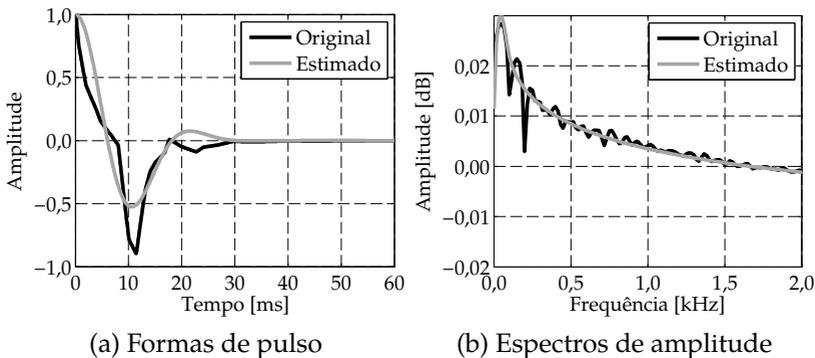


Figura 4.2.: Estimativa de um pulso de *airgun* através de funções base.

4.2 Algoritmo adaptativo

Um algoritmo adaptativo foi projetado para encontrar automaticamente os coeficientes adaptativos das funções simples que minimizam o erro entre a referência e o pulso que é estimado através dos coeficientes adaptados. É possível discretizar o tempo total de medição em blocos que representam a obtenção cada traço (n). Nestes n traços o tempo pode ser considerado tanto discreto quanto contínuo uma vez que apenas operações analíticas são realizadas sobre os mesmos.

O algoritmo adaptativo realiza iterações sobre os n traços, resultando em um sistema bidimensional. A Figura 4.3 ilustra o diagrama de blocos do sistema adaptativo retroalimentado proposto no qual as linhas grossas indicam o fluxo de um vetor e as linhas finas indicam o fluxo de um escalar.

A entrada do sistema é o pulso original enviado pela fonte \bar{x} , que passa a ser corrompido por ruído z e resulta no sinal ruidoso observado x , aqui utilizado como referência. O pulso de referência, x , pode ser obtido através da onda direta presente no

traço. Tendo conhecimento da distância entre fonte e receptor e da velocidade de propagação do som na água, é possível calcular a posição da onda direta e o pulso de referência pode ser obtido de forma simples.

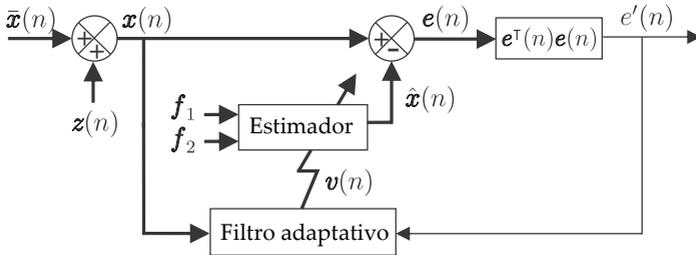


Figura 4.3.: Diagrama de blocos do algoritmo adaptativo.

A partir de análises qualitativas do pulso de referência, x , nos domínios do tempo e da frequência, definem-se as funções simples, os coeficientes de entrada a serem adaptados pelo algoritmo e um erro inicial. As condições iniciais e o pulso de referência, x são enviados para o filtro adaptativo para que com base nas informações dadas os coeficientes adaptativos das funções simples, v , possam ser atualizados. Os coeficientes atualizados são levados para o estimador, que configura os novos valores na combinação de funções simples, gerando o pulso estimado, \hat{x} .

Desta forma, é possível calcular o erro entre o pulso de referência, x , e o estimado, \hat{x} , que pode ser dado pela subtração vetorial

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n). \quad (4.3)$$

Contudo, é necessária uma função objetivo capaz de retornar um valor escalar para servir de parâmetro de semelhança entre pulso de referência e estimado e para ser utilizado na próxima iteração na descoberta dos novos coeficientes, v . Porém, a simples soma do vetor de erro (Eq. (4.3)) pode camuflar a

diferença entre $\hat{x}(n)$ e $x(n)$ devido à oposição de sinais, que acarreta em interferência destrutiva. Tendo isso em vista, foi estabelecida uma função objetivo que retorna um escalar, dada pela soma do erro, $e(n)$, ao quadrado ponderada pelo tamanho do vetor de erro (T), exibida na forma vetorial:

$$e'(n) = \frac{1}{T} e^T(n) \cdot e(n). \quad (4.4)$$

A Figura 4.4 esquematiza a obtenção do vetor de diferença entre os traços, $e(n)$, do erro escalar, $e'(n)$ e do vetor de coeficientes adaptados, $v(n)$. Além disso, ilustra a montagem da curva de erro com as iterações, que para que haja bons resultados, deve sempre cair. Quando a análise for realizada com apenas um pulso, é possível que seja selecionado um número de iterações ao qual o algoritmo será aplicado sobre o mesmo pulso.

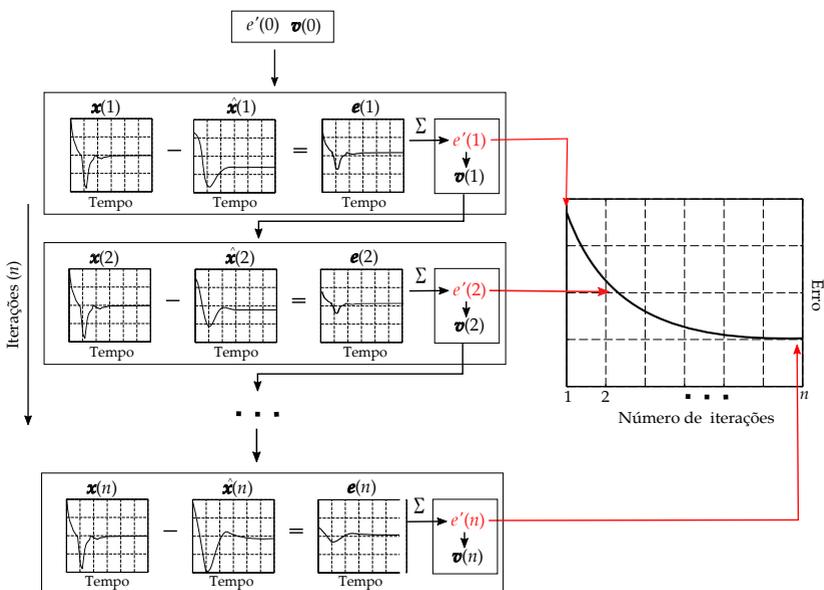


Figura 4.4.: Esquema de obtenção de erro e coeficientes adaptativos com as iterações.

Buscando a atualização dos coeficientes adaptativos baseada nas informações pretéritas, foi escolhido o Método dos Mínimos Quadrados (LMS). O método é de implementação computacional simples e intuitiva e permite a alteração do vetor gradiente através da modificação da função objetivo [95].

Para que a minimização da função objetivo (Eq. (4.4)) fosse realizada a cada iteração, foi escolhido o Método do Gradiente de Descida⁵. Este método busca o ponto mínimo da função objetivo escolhida seguindo a direção oposta do vetor gradiente do erro, gerando a atualização dos coeficientes como segue:

$$\mathbf{v}(n) = \mathbf{v}(n-1) - \mu \nabla^2 e'(n-1), \quad (4.5)$$

na qual

$$\mathbf{v}(n) = [\alpha \quad \beta]^\top, \quad (4.6)$$

é o vetor de coeficientes atualizados, μ é o coeficiente de convergência e $\nabla e'(n)$ é o gradiente de $e'(n)$ ou a derivada parcial do erro instantâneo em relação ao vetor de coeficientes $\mathbf{v}(n)$. Considerando a combinação de Eq. (4.1) e Eq. (4.2), as derivadas parciais da função objetivo podem ser dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \alpha} = 4 \mathbf{x}^\top(n) & \left(\pi \mathbf{t} \circ \text{sen}(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) \\ & - 2\pi \sum_{t_i=0}^T \left(t_i \cdot \text{sen}(4\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right); \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \beta} = 4 \mathbf{x}^\top(n) & \left(\pi^2 \beta \mathbf{t}^2 \circ \cos(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\beta^2\mathbf{t}^2} \right) \\ & - 4\pi^2 \beta \sum_{t_i=0}^T \left(t_i^2 \cdot \cos^2(2\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\beta^2 t_i^2} \right), \end{aligned} \quad (4.8)$$

na qual \circ é o produto de Hadamard.

⁵Do inglês: *Steepest Descent Method*

4.3 Validação do método

Com o intuito de validar o algoritmo adaptativo proposto, três avaliações foram feitas com a utilização de um sinal gerado pela combinação das Eq. (4.1) e Eq. (4.2) com ruídos com características distintas. Inicialmente, foi escolhido um pulso analítico com o objetivo de analisar a capacidade do algoritmo em encontrar a referência, que neste caso é conhecida. Para os três casos foram utilizados os coeficientes $\alpha = 60$ e $\beta = 35$ para que um sinal original de 60 ms fosse simulado.

Para a primeira avaliação, visando obter o sinal ruidoso x , adicionou-se ao pulso original \bar{x} um ruído gaussiano branco de amplitude igual a 0,5, caracterizado por possuir componentes em todas as frequências. A Figura 4.5 (a) ilustra o espectro do pulso comparado ao espectro do ruído branco adicionado.

Assim, filtro adaptativo apresentado na Seção 4.2 foi aplicado para verificar a sua capacidade em estimar os coeficientes do pulso original simulado. O pulso ruidoso, aqui, foi utilizado como referência. Um passo de convergência de $\mu = 1$ foi utilizado com 500 iterações. O pulso original, o ruidoso e o estimado através do algoritmo são expostos na Figura 4.5 (b). Percebe-se na Figura 4.5, que o pulso original (\bar{x}) e o estimado (\hat{x}) são muito semelhantes, apesar do alto ruído adicionado.

A observação qualitativa corrobora com as curvas expostas na Figura 4.6. Na Figura 4.6 (a) percebe-se que o erro entre o pulso original, \bar{x} , e o estimado, \hat{x} , tende a zero, enquanto a diferença entre o pulso ruidoso, x , e o estimado, \hat{x} , tende ao valor constante da diferença entre o original e o ruidoso, que é proporcional ao desvio padrão do ruído adicionado.

Além disso, na Figura 4.6 (b) percebe-se que há a convergência com o número de iterações dos coeficientes adaptativos estimados (linhas cheias) para os valores utilizados para emular o pulso original (linhas pontilhadas).

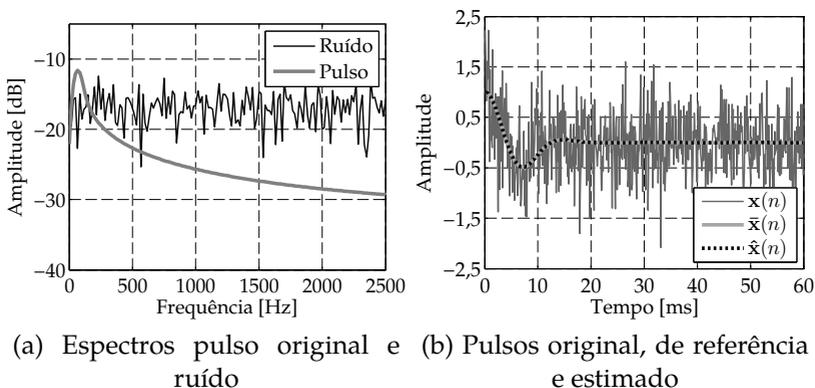


Figura 4.5.: Características dos pulsos original, de referência e estimado para a validação utilizando ruído branco.

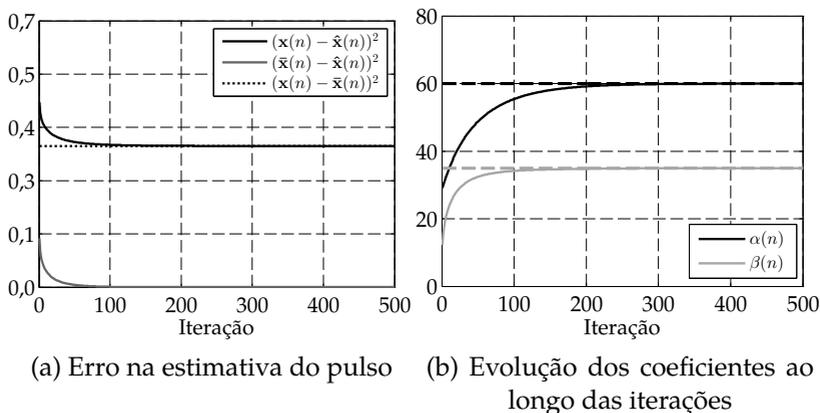


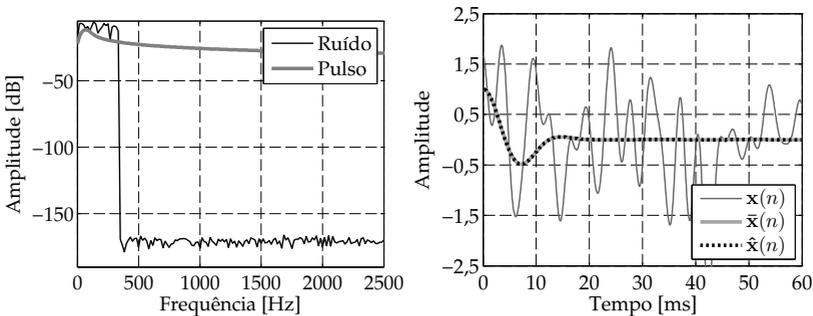
Figura 4.6.: Validação do método utilizando pulso corrompido por ruído branco.

Na segunda análise, utilizou-se de um ruído de baixa frequência para que o sinal original fosse corrompido. Além de ser mais próximo de uma situação real que um ruído branco, é sabido que o algoritmo LMS se comporta como um filtro passa-baixa com baixa frequência de corte quando o coeficiente

de convergência é pequeno [96], o que pode fazer com que o algoritmo tenha problemas para atingir resultados satisfatórios nesses casos.

O ruído de baixa frequência foi gerado por seleção de frequências entre 0-350 Hz de um ruído gaussiano branco de amplitude 1,5. Seu espectro, comparado ao do pulso, é ilustrado na Figura 4.7 (a), na qual percebe-se que as maiores componentes de frequência do ruído estão na mesma faixa que as do pulso. Aplicou-se o algoritmo com um passo de convergência de $\mu = 1$ por 500 iterações.

Apesar do ruído de baixa frequência adicionado, qualitativamente, percebe-se uma concordância entre o pulso original e o estimado (Figura 4.7 (b)). Assim, o algoritmo tende a uma performance satisfatória mesmo em uma situação em que a tendência é que este não revele bons resultados.



(a) Espectros do pulso original e ruído (b) Pulsos original, de referência e estimado

Figura 4.7.: Características dos pulsos original, de referência e estimado para a validação utilizando ruído de baixa frequência.

As curvas para a diferença entre os traços e para a evolução com as iterações dos coeficientes adaptativos podem ser visualizadas na Figura 4.8. As curvas de diferença convergem para os

valores desejáveis nas primeiras iterações. De uma forma mais lenta, os coeficientes convergem para os valores utilizados para confecção do sinal original.

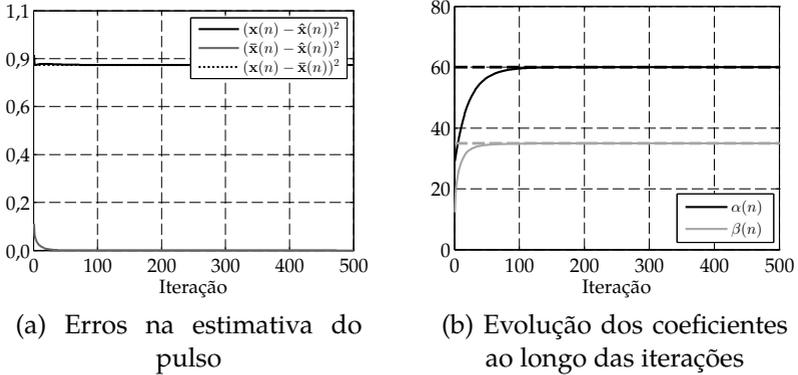


Figura 4.8.: Validação do método utilizando pulso corrompido por ruído de baixa frequência.

A terceira situação aplica ao pulso original o ruído com espectro característico de ambiente de situações reais, já utilizado no Capítulo 3, ilustrado na Figura 3.7. O espectro do ruído comparado ao do pulso original pode ser visualizado na Figura 4.9 (a), na qual percebe-se que os espectros são bem semelhantes, o que pode confundir o algoritmo durante a estimativa dos coeficientes adaptativos.

O algoritmo foi aplicado com um coeficiente de convergência $\mu = 2$ para 500 iterações e as curvas para os pulsos original, ruidoso e estimado são expostas na Figura 4.9 (b). Deve-se ressaltar que o coeficiente de convergência, dependendo das características do pulso e do ruído presente, pode sofrer mudanças bruscas e se mostrar instável. Com isso, recomenda-se uma seleção minuciosa do coeficiente que leve à convergência sem desestabilizar o problema.

Como nos outros dois casos, o algoritmo, apesar do ruído, se mostra extremamente capaz de identificar os coeficientes adaptativos e estimar o pulso original de forma adequada.

Corroborando com as curvas da Figura 4.9 (b), nota-se que há convergência, com o número de iterações, para os valores desejáveis de diferença e coeficientes (Figura 4.10).

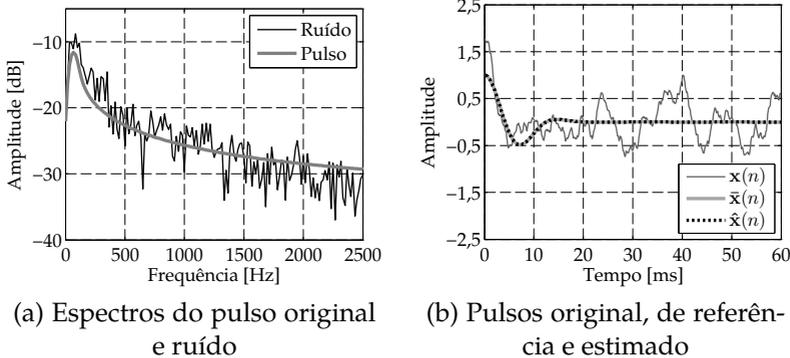


Figura 4.9.: Características dos pulsos original, de referência e estimado para a validação utilizando ruído real característico.

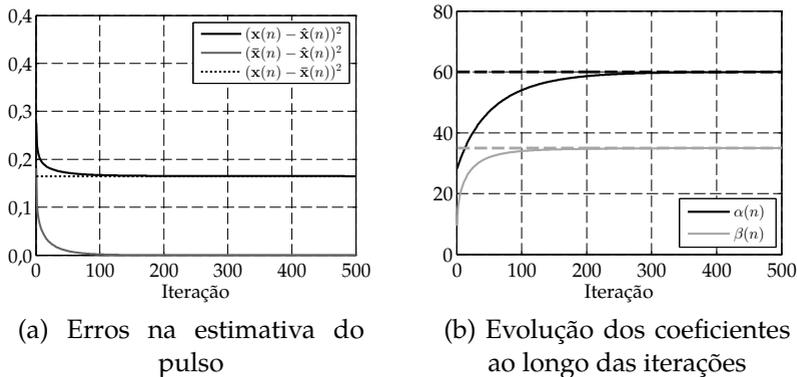


Figura 4.10.: Validação do método utilizando pulso corrompido por ruído real característico.

Na Figura 4.10 (a) nota-se que a diferença entre o pulso original e o estimado tende a zero e que a diferença entre o ruidoso e o

estimado tende à diferença constante entre original e ruidoso, proporcional ao desvio padrão do ruído adicionado.

Já na Figura 4.10 (b) percebe-se a fácil convergência dos coeficientes adaptativos para os valores que foram utilizados para emular o sinal de referência \bar{x} .

Uma quarta análise foi realizada para que o algoritmo adaptativo proposto fosse analisado em sua aplicação pulso-a-pulso, em um conjunto de sinais, e não repetidas vezes sobre o mesmo sinal como feito nas três anteriores. Da mesma forma, o pulso utilizado para emular o conjunto é analítico, com 60 ms e com coeficiente $\beta = 35$. A fim de simular uma não-estacionariedade do pulso original mas manter a coerência da emissão da fonte sonora, adicionou-se um padrão de evolução da frequência do cosseno, α , com o número de pulsos do conjunto a ser emulado, na forma

$$\alpha(n) = \begin{cases} 1,5n, & \text{se } n \geq N/2 \\ 1,5N - 1,5n, & \text{se } n \leq N/2 \end{cases} \quad (4.9)$$

na qual, N é o número de pulsos do conjunto e $n = 1 \dots N$. Foram gerados 150 pulsos, que são expostos na Figura 4.11. A cada pulso foi adicionado um ruído característico do ambiente de estudo (exposto na Figura 3.7) para gerar o conjunto de pulsos ruidosos simulado, disposto na Figura 4.12 .

Aplicou-se, então, o algoritmo proposto ao longo dos traços, totalizando 150 iterações, utilizando coeficientes atualizados e erros do traço anterior como base para a estimativa do próximo. Como referência, foi utilizado o pulso anterior e um passo de adaptação de $\mu = 200$ foi utilizado. O conjunto de pulsos estimado pelo algoritmo proposto pode ser visualizado na Figura 4.13.

Como é possível perceber, o algoritmo adaptativo proposto estimou os pulsos de forma eficiente na aplicação ao longo do conjunto. A modulação frequencial (coeficiente α) é bem estimada com um processo de adaptação perceptível até,

aproximadamente, o décimo sinal, o que acarreta num atraso do padrão. Este comportamento é comum em algoritmos adaptativos e é comumente referenciado como tempo de amortecimento.

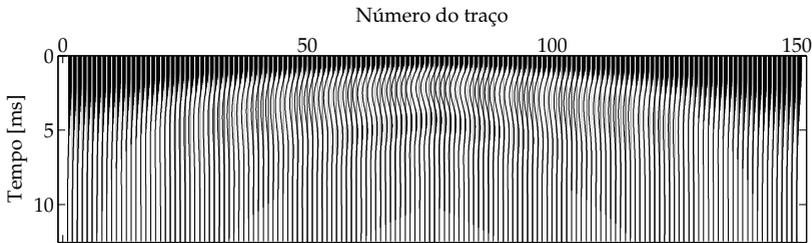


Figura 4.11.: Conjunto de pulsos originais simulados.

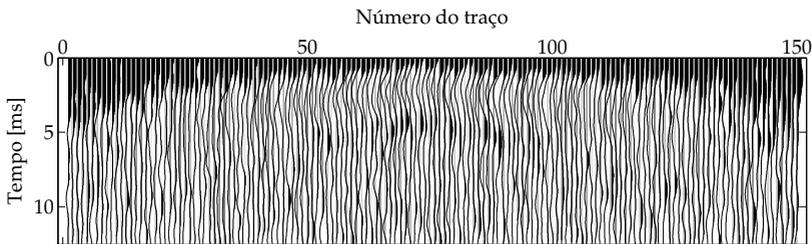


Figura 4.12.: Conjunto de pulsos ruidosos simulados.

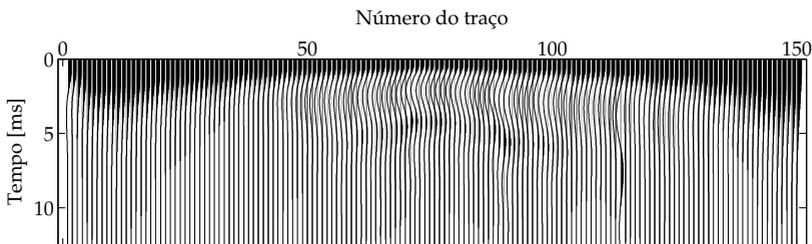


Figura 4.13.: Conjunto de pulsos estimados através do algoritmo proposto.

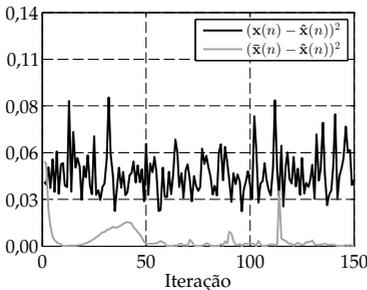
Os gráficos de evolução dos erros e dos coeficientes com o número de iterações são expostos na Figura 4.14 e corroboram

com as observações feitas a partir da Figura 4.13.

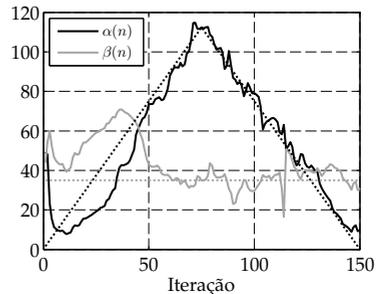
A Figura 4.14 (a) ilustra as diferenças entre os pulsos originais e os ruidosos em preto e a diferença entre os originais e os estimados em cinza. Pode-se perceber que a curva cinza, após o amortecimento, está sempre abaixo da preta. Ou seja, os pulsos estimados estão sempre mais próximos aos originais quando são comparados aos ruidosos.

Já na Figura 4.14 (b), o gráfico de convergência dos coeficientes mostra que, após o período de amortecimento, os coeficientes estimados tendem aos originais (linhas tracejadas). Percebe-se que até aproximadamente o 50º traço, o coeficiente β é influenciado de forma leve pelo coeficiente α . Isso se deve ao fato de que os coeficientes não são ortogonais, ou seja, mais de uma combinação de α e β origina o mesmo pulso.

O sucesso na aplicação do algoritmo, tanto para estudos sobre o mesmo pulso como ao longo de diferentes pulsos, valida o método e expõe que este é capaz de estimar coeficientes mesmo na presença de ruídos tendenciosos e da não-estacionariedade da emissão da fonte.



(a) Erros na estimativa do pulso



(b) Evolução dos coeficientes ao longo dos pulsos avaliados

Figura 4.14.: Validação do método utilizando um conjunto de pulsos corrompidos por ruído e com variação do parâmetro α .

4.4 Deconvoluções utilizando o pulso estimado

Com o método já validado, buscou-se a simulação de um conjunto de pulsos reais. A assinatura de *airgun* registrada por Mikaelson [94] e exposta na Figura 4.15 (a) foi utilizada para a geração de um traço sísmico simulado, resultado da convolução entre o pulso e a refletividade modelada, exposta na Figura 3.6, com adição do ruído característico, exposto na Figura 3.7, com amplitude de 0,6. O traço sísmico resultante é exposto na Figura 4.15 (b).

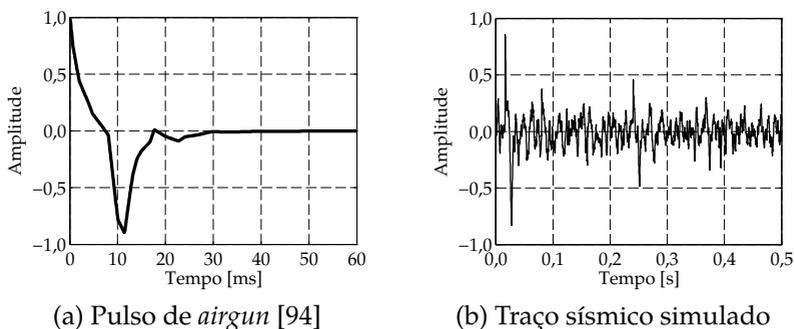


Figura 4.15.: Pulso real de *airgun* e traço sísmico simulado utilizados para validação do método.

Com o traço sísmico originado a partir da emissão de um pulso de *airgun* o algoritmo proposto pode ser aplicado sobre a onda direta a fim de verificar se a estimativa do pulso traz melhorias às deconvoluções em relação à utilização da própria onda direta.

Partindo do princípio que se tem conhecimento sobre a localização de fonte, receptor e a velocidade de propagação do som na coluna d'água investigada, é possível realizar a localização no tempo do traço sísmico em que está a onda direta.

O algoritmo foi aplicado com um coeficiente de convergência de $\mu = 3 \times 10^{-3}$ e um total de 10^3 iterações. Como referência para o algoritmo, a própria onda direta foi utilizada tendo em vista que em uma situação real esta é a única que pode ser

utilizada.

A Figura 4.16 (a) ilustra a onda direta (pulso ruidoso) em azul, o pulso original (que se busca estimar) em vermelho e o pulso estimado através do algoritmo em verde. Nessa, é qualitativamente perceptível que o pulso estimado recupera alguma informação sobre frequência e amplitude, mas não atinge o pulso original de forma exata. Isso se deve ao fato de se tratar de um pulso real de *airgun*, não tão simples de estimar através de apenas duas funções simples. Duas ou mais funções simples podem ser adicionadas à combinação, porém, a adição de graus de liberdade, além de poder contribuir para uma estimativa mais acertiva, poderia levar a reprodução do ruído da onda direta.

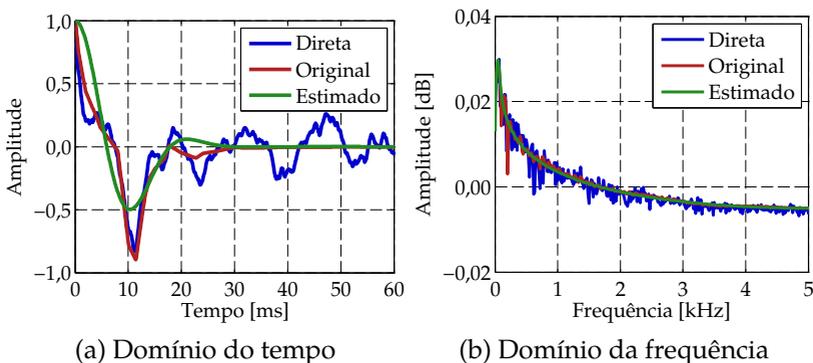


Figura 4.16.: Comparação entre os pulsos *airgun* original, de referência e estimado.

Na Figura 4.16 (b) tem-se os espectros de amplitude, nas mesmas cores, mostrando que a estimativa do espectro se mantém fiel aos outros dois espectros com uma limpeza, devido à não reprodução do ruído pelas funções simples.

A evolução do erro entre o pulso estimado e a onda direta com o número de iterações é exibida no gráfico da Figura 4.17 (a), na qual percebe-se que logo após a 100^a iteração há uma

convergência da diferença. Já a Figura 4.17 (b) ilustra a evolução dos coeficientes, na qual percebe-se que o algoritmo, com o número de iterações, converge para valores únicos. Pode-se perceber, inclusive, que o coeficiente β passa do valor selecionado e depois retorna para que haja a convergência.

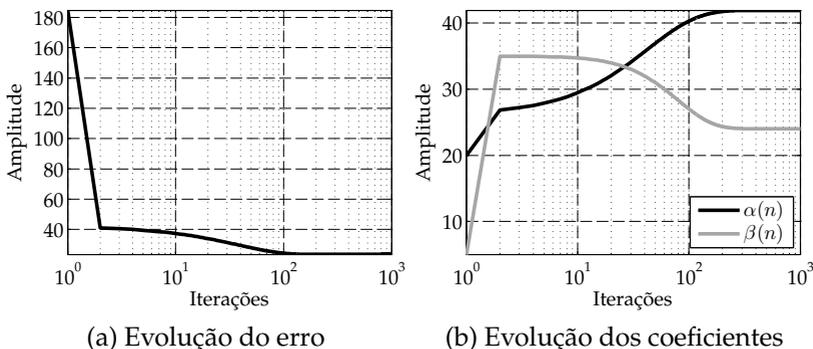


Figura 4.17.: Convergência do método com pulso real de *airgun*.

Como o pulso é estimado com a utilização de funções simples, sua Transformada de Fourier pode ser facilmente calculada. Com isso, um filtro inverso pode ser definido diretamente e os coeficientes adaptativos podem ser utilizados como entrada do filtro:

$$V(\omega) = \frac{2\sqrt{2}\pi\beta}{i} \left(\exp\left(-\frac{(\omega - 2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\omega + 2\pi\alpha)^2}{4\pi^2\beta^2}\right) \right)^{-1}. \quad (4.10)$$

A utilização do filtro inverso, com a inserção dos coeficientes adaptativos estimados faz com que o custo computacional seja bastante reduzido e permite a realização da deconvolução de forma prática e rápida.

O pulso estimado foi utilizado para a aplicação dos algoritmos de deconvolução expostos no Capítulo 3. A estimativa do pulso permite a aplicação de técnicas de deconvolução determinística. Desta forma, é possível comparar a performance das

deconvoluções determinísticas com a utilização da onda direta e do pulso estimado e também, comparar a performance da deconvolução determinística com a utilização do pulso estimado com a Deconvolução em Impulsos, técnica probabilística.

A Figura 4.18 ilustra as refletividades estimadas através da deconvolução via divisão espectral sem amortecimento, tendo em vista que, teoricamente, se trata de um pulso considerado de fase mínima e não necessita de fator de regularização, como mencionado no Capítulo 3.

Qualitativamente é possível perceber que a refletividade obtida através do pulso estimado (Figura 4.18 (a)) apresenta menos ruído e encontra de forma mais precisas as reflexões do ambiente simulado do que a obtida através da utilização da onda direta retirada do traço sísmico (Figura 4.18 (b)).

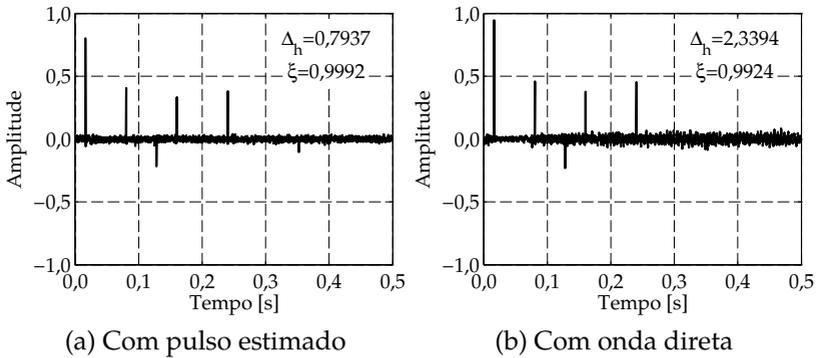


Figura 4.18.: Comparação de deconvolução com amortecimento entre pulso estimado e onda direta.

A refletividade estimada (h_{est}) através da utilização do pulso estimado (\hat{x}) apresenta todas as seis reflexões, enquanto a que utiliza a onda direta (x) mascara a sexta reflexão, próxima à 0,35 s. Fazendo uma análise quantitativa, a diferença entre as refletividades estimadas pela deconvolução e as simuladas (Δ_h) é menor quando estima-se o pulso através do algoritmo adaptativo

com um valor de $\Delta_h = 0,7937$, enquanto o valor para a utilização da onda direta é de $\Delta_h = 2,3394$, aproximadamente 95% maior. O fator de coerência de picos (ξ) para o caso em que utiliza-se o pulso estimado é de $\mu = 0,9992$ enquanto para o caso da onda direta é de $\mu = 0,9924$, ou seja, as amplitudes são melhores estimadas quando utiliza-se do pulso estimado para deconvolver o traço sísmico.

De forma semelhante, foi aplicada a deconvolução simultânea no domínio do tempo. Neste caso, de acordo com as considerações do Capítulo 3, também não foi utilizado coeficiente para a regularização. Os resultados para a refletividade estimada, h_{est} , obtidos através da deconvolução estão dispostos na Figura 4.19.

Os resultados são muito semelhantes aos obtidos via divisão espectral. Da mesma forma que no caso anterior, é perceptível que, analisando qualitativamente, a deconvolução simultânea no domínio do tempo aplicada com a utilização do pulso estimado é melhor que a utilizando a onda direta. Com o pulso estimado, todas as reflexões simuladas são identificadas e há menos ruído no resultado. Já com a onda direta há a supressão da última das reflexões e um maior ruído.

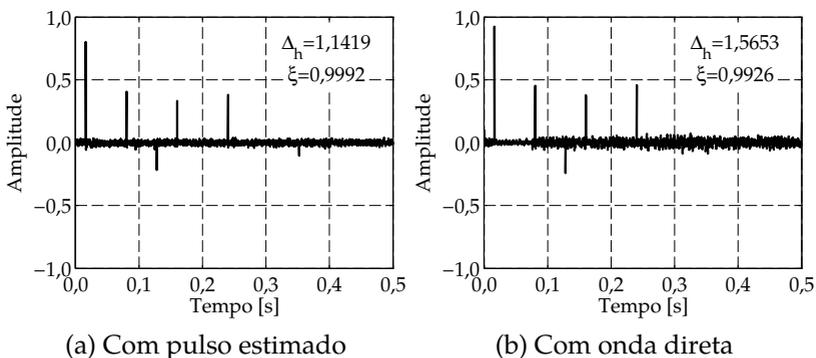


Figura 4.19.: Comparação de deconvolução simultânea entre pulso estimado e onda direta.

A análise quantitativa corrobora com a análise qualitativa. Um

valor de erro entre refletividades de $\Delta_h = 1,1419$ é obtido através da utilização do pulso estimado enquanto através da onda direta o valor é de $\Delta_h = 1,5653$, cerca de 37% maior. Já para o fator de coerência de amplitudes a diferença é sutil. Para a utilização do pulso estimado o valor é de $\zeta = 0,9992$ e para a onda direta é $\zeta = 0,9926$, uma diferença de menos de 1%.

Os resultados para a aplicação da deconvolução iterativa no domínio do tempo estão dispostos na Figura 4.20. Por permitir a escolha da forma da função da refletividade estimada, esta deconvolução apresenta uma característica sem ruído, expondo apenas a amplitude e localização das reflexões, obtidas através das correlações cruzadas entre traço e pulso. Com tudo, dependendo das características da autocorrelação do pulso enviado e do ruído adicionado, como discutido no Capítulo 3, pode estimar de forma equivocada a localização e amplitude das reflexões.

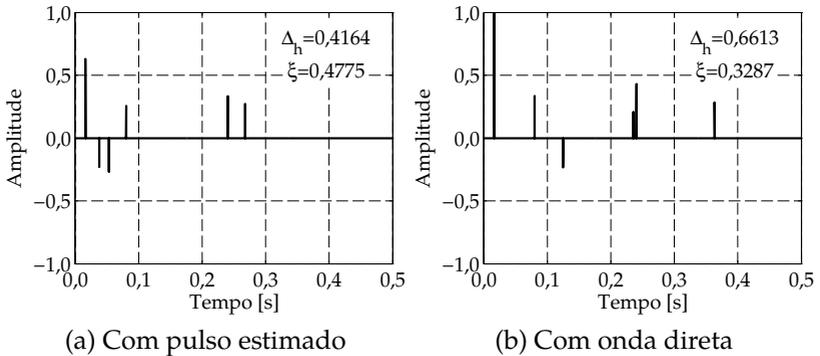


Figura 4.20.: Comparação de deconvolução iterativa entre pulso estimado e onda direta.

Por não possuir ruído nos resultados, a deconvolução iterativa apresenta baixas diferenças Δ_h , sendo que para o caso em que a deconvolução foi realizada com o pulso estimado se tem $\Delta_h = 0,4164$ e para o caso em que a onda direta foi utilizada o valor é de $\Delta_h = 0,6613$, cerca de 58% maior. Já o valor de ζ é

baixo, sendo $\xi = 0,4775$ para o pulso estimado e $\xi = 0,3287$ para a onda direta. Contudo, é possível perceber através da Figura 4.20 (a) que com a utilização da estimativa do pulso há o acerto da localização de três picos (1,2 e 5), já com a onda direta são quatro (1,2,3 e 5), ou seja, o algoritmo não acerta a localização das reflexões como nas outras técnicas. Como já comentado, esta técnica não tem um bom desempenho na presença de um ruído mais elevado, errando localização dos picos e gerando ambiguidades para a interpretação.

Apesar de mais picos serem localizados com a utilização da onda direta, além de um Δ_h maior, este caso apresenta um coeficiente ξ menor quando comparado à utilização do pulso estimado.

Para comparar as técnicas determinísticas com as estatísticas, foi aplicada a deconvolução em impulsos, técnica que é capaz de estimar a refletividade do ambiente de forma estatística, sem a informação sobre o pulso que foi enviado ao meio. A Figura 4.21 ilustra o resultado obtido.

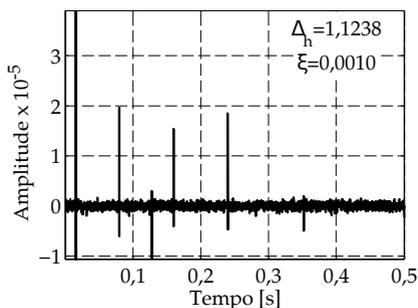


Figura 4.21.: Aplicação a deconvolução em impulsos ao traço sísmico

Apesar de não demandar muito esforço para a aquisição ou estimativa do pulso, a deconvolução em impulsos traz resultados, quando analisados qualitativamente, com ruído semelhante às técnicas de divisão espectral e simultânea no tempo, porém há a inserção de artefatos em direção oposta

às reflexões detectadas. O valor de $\Delta_h = 1,1238$ é um bom valor quando comparado às outras técnicas, ficando abaixo da deconvolução via divisão espectral utilizando do pulso estimado. Porém, apesar de localizar bem as reflexões, as amplitudes não são bem estimadas, sendo alteradas em até 5 ordens de grandeza, o que leva a um baixo valor de $\zeta = 0,001$.

Deve-se levar em conta que a utilização de diversos traços sísmicos e a realização do empilhamento pretérito à deconvolução pode diminuir consideravelmente o ruído presente nas refletividades estimadas para as técnicas de deconvolução.

4.5 Considerações parciais

Neste capítulo foi apresentado um filtro adaptativo alimentado por um algoritmo LMS capaz de estimar o pulso enviado pela fonte a partir da onda direta presente no traço sísmico. Além da exposição, o método foi validado através de dados simulados e reais. Mesmo em situações não favoráveis, como na presença de diferentes tipos de ruído, o método se mostrou robusto e eficiente na busca da melhor estimativa do pulso enviado pela fonte.

Com isso, foi possível aplicar as técnicas de deconvoluções descritas e avaliadas no Capítulo 3 com a utilização do pulso estimado e da onda direta para a comparação. Também foi possível comparar o desempenho das técnicas determinísticas de deconvolução mediante a utilização da estimativa de pulso com a técnicas de deconvolução probabilística.

Dentre as deconvoluções determinísticas aplicadas foi possível perceber que a que se mostrou mais eficiente com a utilização do pulso estimado foi a divisão espectral sem amortecimento. A técnica apresentou um alto fator de coerência de amplitude e baixas diferenças entre refletividade original e estimada através da deconvolução. Para a onda direta, os melhores resultados foram obtidos via deconvolução simultânea no domínio do tempo. Contudo, o resultado obtido com onda direta via de-

convolução simultânea é pior que o obtido com pulso estimado via deconvolução via divisão espectral. A Tabela 4.1 sumariza os resultados obtidos para os parâmetros de comparação obtido nas deconvoluções determinísticas empregadas neste capítulo.

Tabela 4.1.: Parâmetros de comparação obtidos com a aplicação das deconvoluções determinísticas com a utilização de onda direta e do pulso estimado.

	Estimado		Direta	
	Δ_h	ζ	Δ_h	ζ
Deconvolução com regularização	0,7933	0,9992	2,3394	0,9924
Deconvolução simultânea no domínio do tempo	1,1419	0,9992	1,5653	0,9926
Denconvolução iterativa no domínio do tempo	0,4164	0,4775	0,6613	0,3287

A técnica da deconvolução simultânea no domínio do tempo resultou em boas refletividades, com um erro entre refletividades cerca de 43% maior para o caso do pulso estimado e cerca de 33% menor para a onda direta. Contudo, apesar de trazer um resultado melhor que a deconvolução por divisão espectral para o caso da onda direta, o fato de possuir um alto custo computacional de aplicação devido à inversão de matrizes, esta deconvolução pode começar a apresentar desvantagens em algumas aplicações. Pouca diferença entre o fator de coerência de amplitudes foi registrada.

A deconvolução iterativa no domínio do tempo não se mostrou eficiente para este caso devido à alta presença de ruído e pela possível baixa correlação entre pulso estimado e traço sísmico. Os valores de erro entre refletividades foi cerca de 47% menor para ao pulso estimado e 71% menor para a onda direta quando comparada à deconvolução via divisão espectral. Esta redução do erro é devido ao fato da característica sem ruído resultante da deconvolução iterativa. Todavia, ao avaliar

a precisão na detecção das reflexões os valores do fator de coerência de amplitudes encontrados foram de 52% menor para o pulso estimado e 66% para a onda direta. Além disso, a análise qualitativa mostra que as reflexões não são bem localizadas e as amplitudes não são bem detectadas. O desempenho da técnica está ligado as características da autocorrelação do pulso e ao ruído presente no dado sísmico. Com isso, não recomenda-se a utilização desta técnica, a não ser que as características do problema sejam boas para a aplicação do mesmo. Além de trazer ambiguidades na localização dos refletores, pode-se ter a falsa interpretação das amplitudes.

Ao comparar a performance das deconvoluções com a utilização do pulso estimado através do algoritmo e através da onda direta, foi possível notar que para todos os algoritmos de deconvolução, a estimativa do pulso enviado pela fonte foi capaz de trazer melhores resultados quando comparado à utilização da onda direta para a deconvolução determinística. Isso se deve ao fato de que a estimativa do pulso limpa o sinal do ruído deixando, na medida do possível, as características principais do pulso.

Ao implementar a deconvolução em impulsos, técnica probabilística, foi obtida uma boa localização das reflexões. O erro entre as refletividades só ficou acima da deconvolução via divisão espectral com o pulso estimado, com cerca de 41% de acréscimo e acima da errônea deconvolução iterativa. Contudo, houve bastante discrepância na detecção das reflexões e a presença de artefatos nas direções opostas. O valor do fator de coerência de amplitudes encontrado foi muito baixo, cerca de $\xi = 0,0010$. Desta forma, a aplicação de técnicas determinísticas se mostraram mais robustas para a detecção da refletividade mesmo quando não há informação sobre a forma do pulso, que pode ser estimada através do algoritmo proposto.

Tabela 4.2.: Parâmetros de comparação obtidos com a implementação da deconvolução em impulsos.

	Δ_h	ξ
Deconvolução em impulsos	1,1238	0,0010

Como a onda direta está presente no traço sísmico e pode ser utilizada para estimar o pulso enviado pela fonte através do filtro adaptativo proposto, o método é promissor para a realização desta etapa do processamento sísmico. Além disso, o fato de lidar com funções simples para realizar a estimativa do pulso oferece a possibilidade do cálculo analítico do filtro de forma simples, que pode ser utilizado de forma direta apenas com a inserção dos coeficientes adaptativos estimados.

5 Aplicação a dados reais

Com os métodos, técnicas e conclusões preliminares apresentados nos Capítulos 3 e 4, tem-se em mãos um leque de alternativas e procedimentos a serem realizados com a finalidade de melhorar uma imagem sísmica processada. Desta forma, neste capítulo, foram aplicadas as metodologias expostas e desenvolvidas a dados reais de forma a verificar a abordagem.

5.1 Informações sobre os dados

Para a aplicação das técnicas de estimativa de pulso e deconvolução foram utilizadas dados sísmicos reais da indústria do petróleo cedidos à Universidade Federal de Santa Catarina pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). O dado foi concedido por meio do protocolo FID 060283 do pedido número 7665.

Dentre o conjunto de traços em duas dimensões cedidos, a linha sísmica analisada será a Caravela 93, adquirida no ano de 1993 na plataforma continental do estado de Santa Catarina, Brasil. A linha está destacada em vermelho na Figura 5.1, na qual é possível perceber a sua localização entre as isóbatas de 200 m e 1600 m de profundidade.

Segundo as informações do relatório do observador o navio percorreu 83,8 km com a emissão de 36 fontes do tipo *airgun* com volume de $0,07 \text{ m}^3$. O arranjo de sensores possui um total de 150 canais distantes entre si por 26,6 m, sendo que cada um possui uma associação de 12 hidrofones em paralelo. A distância entre a associação de fonte e o primeiro receptor é de 241 m. Os dados

foram adquiridos com um intervalo de 2 ms, resultando em uma frequência de amostragem de 500 Hz. Cada traço sísmico possui 4096 amostras e foram arquivados com as informações de tempo de propagação por amplitude. As características do levantamento estão sumarizadas na Tabela 5.1.

Como a análise será utilizada para validação e comparação de métodos e não para a caracterização do local no qual os traços foram adquiridos, apenas uma parte da linha de 83,8 km foi utilizada e apenas o primeiro canal (241 m distante da fonte) foi selecionado para ser processado. A linha de trabalho possui 150 amostras, totalizando 4 km de extensão, adquirida do mar em direção à costa.

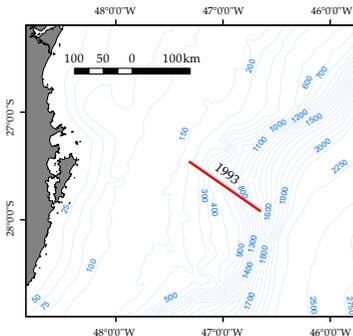


Figura 5.1.: Localização da linha de aquisição dos dados.

Extensão da linha	83,8 km
Canais	150
Hidrof. por canal	12
Freq. amostragem	500 Hz
Interv.o amostragem	2 ms
Fonte - 1º receptor	241 m
Número de <i>airguns</i>	36
Volume do <i>airgun</i>	0,07 m ³
Frequência de pico	10-50 Hz

Tabela 5.1.: Características da aquisição dos traços sísmicos.

Na Figura 5.2, são exibidos 150 traços com 4096 amostras temporais, totalizando uma duração de 8,2 s (tempo de propagação em duas vias) em estado bruto. Analisando os traços, é possível perceber que no primeiro traço, a primeira reflexão que corresponde ao fundo marinho está a um TWTT de 0,922 s, ou seja, aproximadamente 700 m de profundidade. O último traço está a um TWTT de 0,816 s, correspondente a 612 m de profundidade.

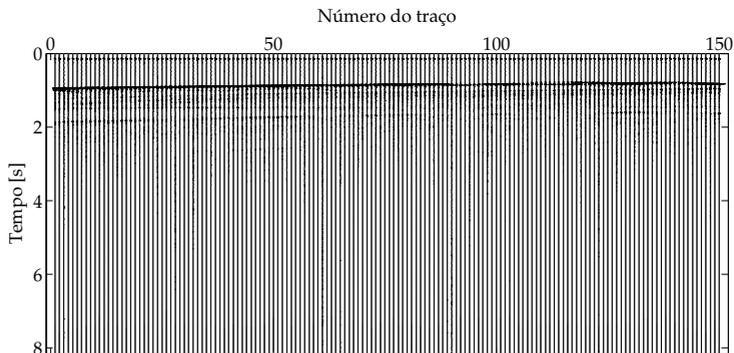


Figura 5.2.: Traços da linha de aquisição Caravela 93 em estado bruto.

5.2 Aplicação das técnicas

Por ser uma região profunda, com grande coluna de substratos, deve-se levar em conta a divergência geométrica da propagação. Desta forma, feições e eventos relacionados a grandes distâncias do arranjo de aquisição podem estar subestimadas. Por isso, foi aplicada aos dados uma correção para este decaimento de amplitude. Os dados com a correção para a divergência esférica estão dispostos na Figura 5.3.

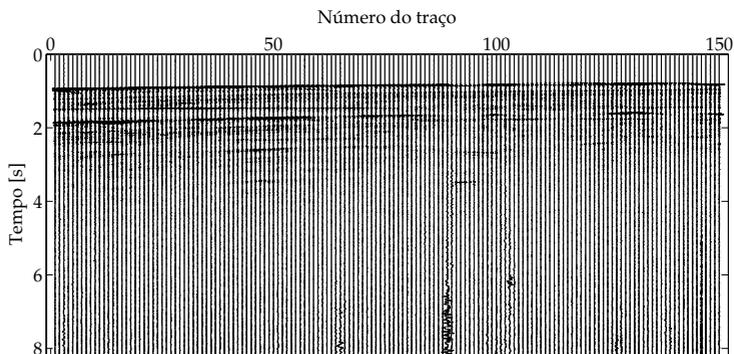


Figura 5.3.: Traços da linha de aquisição Caravela 93 com correção para divergência esférica.

Com os dados corrigidos, se deu início à análise por meio da aplicação do algoritmo da estimativa do pulso para apenas um traço. O primeiro traço do conjunto é exibido na Figura 5.4.

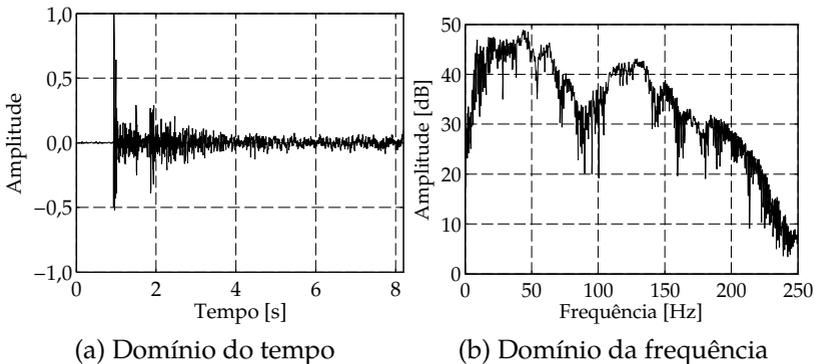


Figura 5.4.: Primeiro traço dos dados selecionados e pré-processados.

A aplicação da correção da divergência esférica, como pode ser percebido, minimiza a visualização da onda direta proveniente da fonte. Desta forma, para a aplicação do algoritmo neste capítulo, as ondas diretas foram selecionadas do dado antes da aplicação da correção. Tomou-se cuidado em selecionar a onda direta de forma a obter um pulso de fase mínima, tendo em vista que é sabido que este tem um desempenho melhor nas técnicas de deconvolução. Além disso, uma janela do tipo *hanning* foi aplicada para que o decaimento da onda direta culminasse em uma amplitude zero. A Figura 5.5 ilustra a onda direta extraída do primeiro traço sísmico do conjunto, já janelada.

Como é possível perceber, o pulso de *airgun* emitido pode ser estimado com as mesmas funções base utilizadas para a validação do método, dispostas nas Eq. (4.1) e Eq. (4.2). Desta forma, o algoritmo para estimativa do pulso enviado pela fonte foi aplicado ao primeiro traço. O coeficiente de convergência utilizado foi de $\mu = 0,6$ e foram realizadas 1000 iterações.

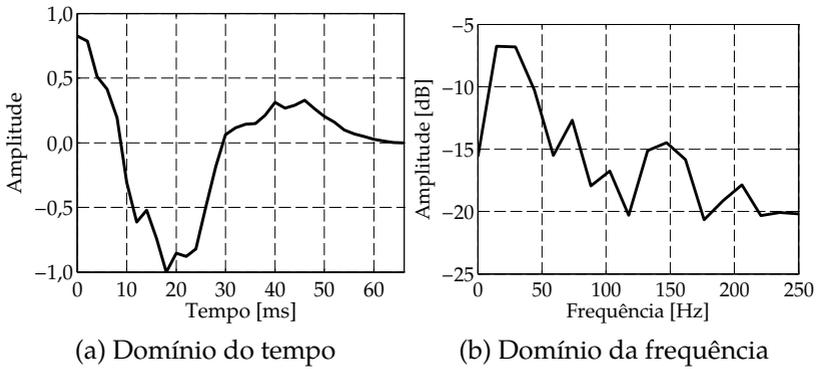


Figura 5.5.: Onda direta extraída do primeiro traço.

Vale ressaltar que é interessante configurar coeficientes iniciais para o algoritmo iterativo que correspondam a valores próximos aos que se deseja obter. No caso, como a onda direta é conhecida, é possível observar que o primeiro e maior pico no espectro de amplitude se encontra próximo à 25 Hz. Com isso, é possível fazer com que o algoritmo convirja de forma mais rápida e eficiente. Pode-se analisar os outros picos, e se estes se mostrarem relevantes é possível inserir novas funções simples que sejam capazes de reconstruir o pico de frequência. Nesse caso, para uma primeira análise, será utilizado apenas o cosseno e a exponencial como funções para reconstrução do pulso, o que torna possível apenas a reconstrução de um pico de frequência.

A Figura 5.6 ilustra a estimativa do pulso obtida no domínio do tempo e da frequência. Mediante análise qualitativa se nota que o pulso estimado é muito semelhante à onda direta e recupera a sua forma de maneira satisfatória. O espectro, por ter sido utilizado apenas um cosseno para a estimativa do pulso, reproduz apenas um dos picos.

A convergência dos coeficientes α (frequência do cosseno) e β (abertura da exponencial) ocorre antes de 200 iterações e pode ser visualizada na Figura 5.7. A mesma convergência é percebida para o erro (Eq. (4.4)) entre a onda direta e estimada, que cai e

estabiliza próximo a 2.

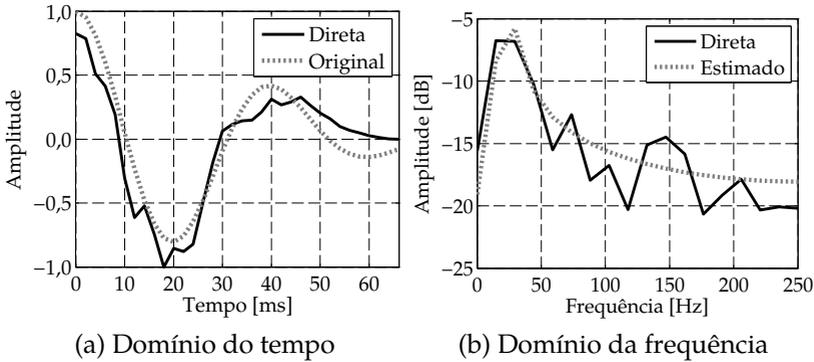


Figura 5.6.: Estimativa do pulso enviado para o primeiro traço.

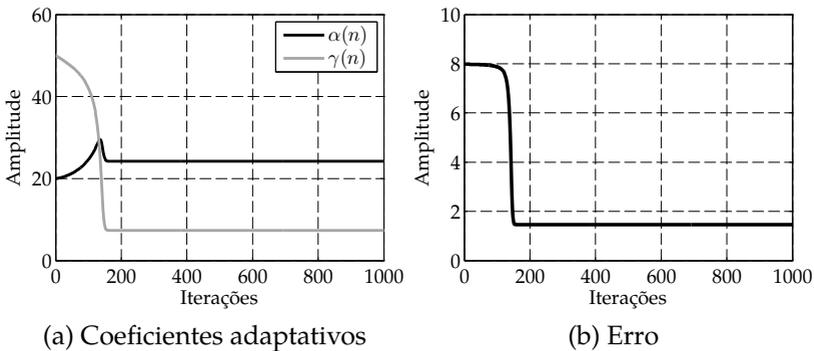


Figura 5.7.: Convergência de coeficientes e erro para estimativa da onda direta do primeiro traço.

Partindo das conclusões preliminares do Capítulo 4, a deconvolução utilizada para este caso será a da divisão espectral. Com o pulso estimado em mãos, foi realizada a deconvolução com amortecimento sobre o primeiro traço, exposta na Figura 5.8 (a). A Figura 5.8 (b) ilustra o mesmo traço deconvoluído, com um aumento na região de até 2 s. O fator de amortecimento utilizado foi de $\delta = 0,01$. Percebe-se que a deconvolução ressalta os

refletores. Este padrão poderá ser melhor visualizado através da aplicação do algoritmo de estimativa e da deconvolução com amortecimento ao conjunto de traços.

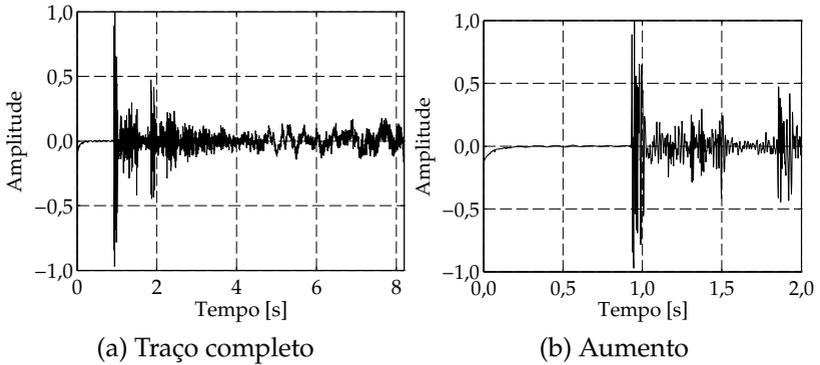


Figura 5.8.: Deconvolução com pulso estimado por duas funções simples com fator de amortecimento com $\delta = 0,01$ do primeiro traço.

Sabe-se que o *airgun* apresenta repetibilidade de emissão, como pode ser visualizado na Figura 5.9. Todas as ondas diretas extraídas dos traços apresentam um padrão de forma semelhante.

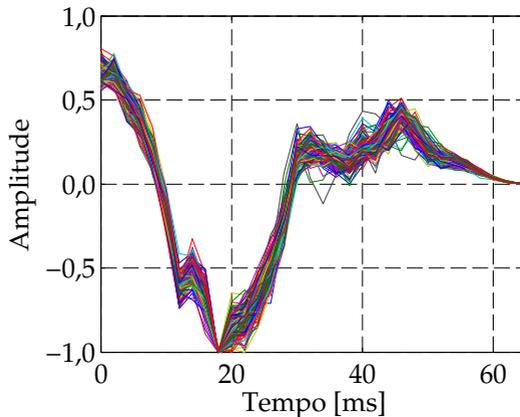


Figura 5.9.: Ondas diretas extraídas dos 150 traços sísmicos.

Desta forma, foi utilizada a estimativa do pulso do primeiro traço para deconvoluir todos os traços sísmicos com $\delta = 0,01$. A Figura 5.10 ilustra o resultado, no qual percebe-se qualitativamente a melhora e o realce na visualização dos refletores. Além disso, há a visualização de novos refletores entre 1 s e 2 s.

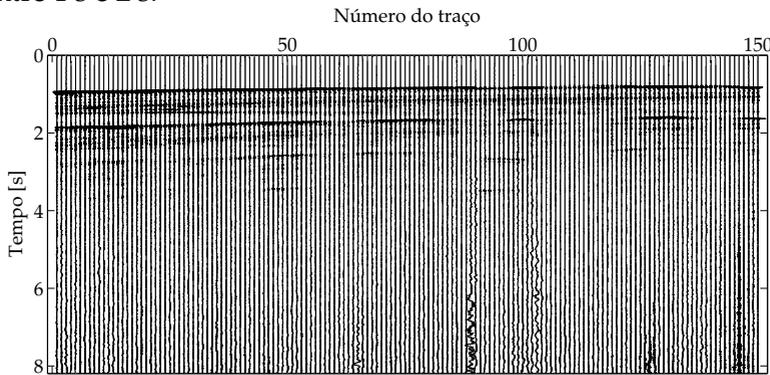


Figura 5.10.: Deconvolução de todos os 150 traços utilizando o pulso estimado com duas funções simples.

Como espectro da onda direta (Figura 5.5) apresenta outros picos de frequência, foi feita uma avaliação da estimativa do pulso com a utilização de três funções simples ao invés de duas. Adicionou-se mais um cosseno, com uma menor amplitude. A amplitude do segundo cosseno adicionado corresponde a 10% da amplitude do primeiro, como segue

$$\hat{x} = [A \cos(2\pi\alpha t) + 0,1 A \cos(2\pi\beta t)] e^{-\pi^2\gamma^2 t^2}. \quad (5.1)$$

Foram adaptadas apenas as frequências dos cossenos, α e β , e a abertura da exponencial, γ . Poderia ter sido adaptada a amplitude do segundo cosseno, porém isso adicionaria dificuldade ao cálculo dos gradientes e a abordagem foi deixada para um trabalho futuro. Com isso, as derivadas parciais do erro em relação aos coeficientes adaptativos são dadas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \beta} &= 4A \mathbf{x}^\top(n) \left(\pi \mathbf{t} \circ \text{sen}(2\pi\alpha\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\gamma^2\mathbf{t}^2} \right) \\ &- 4A\pi \sum_{t_i=0}^T \left(t_i \cdot [\cos(2\pi\alpha t_i) \cdot \cos(2\pi\beta t_i)] \cdot \text{sen}(2\pi\alpha t_i) \cdot e^{-2\pi^2\gamma^2 t_i^2} \right); \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \beta} &= 0, 4A \mathbf{x}^\top(n) \left(\pi \mathbf{t} \circ \text{sen}(2\pi\beta\mathbf{t}) \circ e^{-\pi^2\gamma^2\mathbf{t}^2} \right) \\ &- 0, 4A\pi \sum_{t_i=0}^T \left(t_i \cdot [\cos(2\pi\alpha t_i) \cdot \cos(2\pi\beta t_i)] \cdot \text{sen}(2\pi\beta t_i) \cdot e^{-2\pi^2\gamma^2 t_i^2} \right); \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e'}{\partial \gamma} &= 4\mathbf{x}^\top(n) \left(\pi^2\gamma\mathbf{t}^2 \circ [A \cos(2\pi\beta\mathbf{t}) + 0, 1A \cos(2\pi\beta\mathbf{t})] \circ e^{-\pi^2\gamma^2\mathbf{t}^2} \right) \\ &- 4\pi^2\gamma \sum_{t_i=0}^T \left(t_i^2 \cdot [A \cos(2\pi\beta t_i) + 0, 1A \cos(2\pi\beta t_i)]^2 \cdot e^{-2\pi^2\gamma^2 t_i^2} \right). \end{aligned} \quad (5.4)$$

Primeiramente, o algoritmo adaptativo foi aplicado ao longo do tempo do primeiro pulso. Configurou-se as frequências iniciais para que estivessem próximas aos maiores picos do espectro da onda direta. Foram realizadas 1000 iterações com um coeficiente de convergência de $\mu = 0,4$. A comparação entre a onda direta e o pulso estimado no domínio do tempo e no domínio da frequência são dispostos na Figura 5.11.

É possível perceber que para esse caso em que uma função simples a mais é utilizada há maior proximidade entre pulso estimado e a onda direta, quando comparado ao caso anterior.

As curvas para a progressão dos coeficientes e do erro com o número de iterações estão dispostas na Figura 5.12. Nessas, se nota que há a convergência após a 200ª iteração, ou seja, o algoritmo se torna um pouco mais lento em relação ao caso anterior.

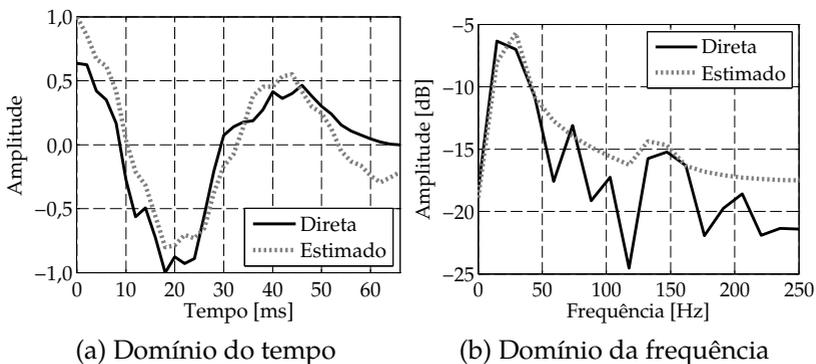


Figura 5.11.: Estimativa do pulso enviado para o primeiro traço.

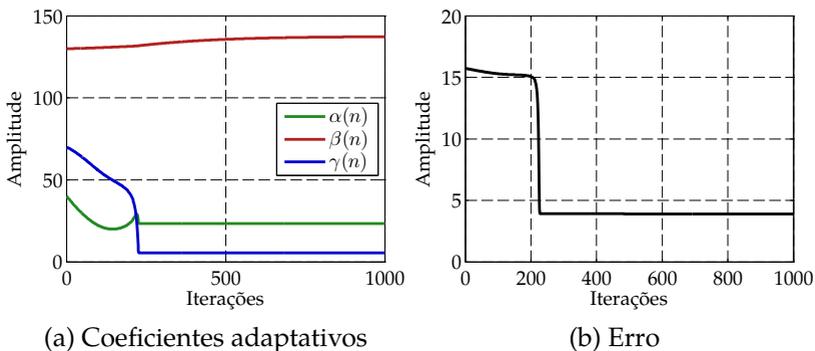


Figura 5.12.: Convergência de coeficientes e erro para estimativa da onda direta do primeiro traço utilizando três coeficientes adaptativos.

Com o pulso estimado, a deconvolução foi aplicada com um fator de regularização de $\delta = 0,01$. O traço deconvoluído e seu respectivo destaque em 2 s são expostos na Figura 5.13. Nesses, pouca diferença é notada em relação à deconvolução utilizando o pulso estimado através de duas funções simples.

Avalia-se da mesma forma que no caso anterior, a deconvolução do conjunto inteiro de traços utilizando o mesmo pulso

estimado a partir das três funções. Um fator de regularização de $\delta = 0,01$ foi utilizado. O resultado é exposto na Figura 5.14. Percebe-se, através dos traços deconvoluídos, pouca mudança em relação à utilização de duas funções simples. Além disso, é perceptível o aparecimento de um pouco de ruído.

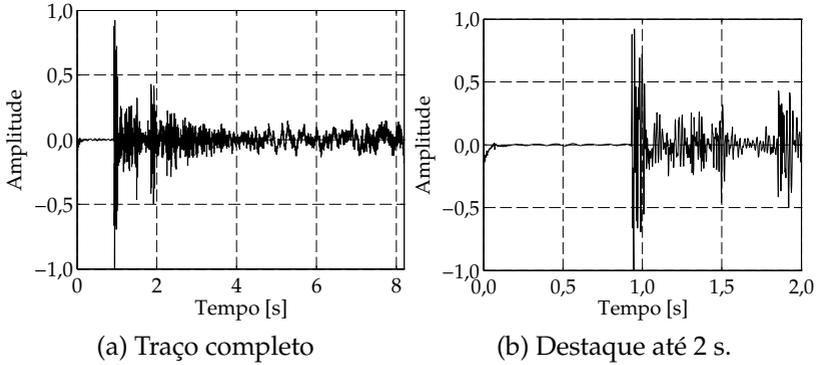


Figura 5.13.: Deconvolução com $\delta = 0,01$ e pulso estimado com três funções simples do primeiro traço.

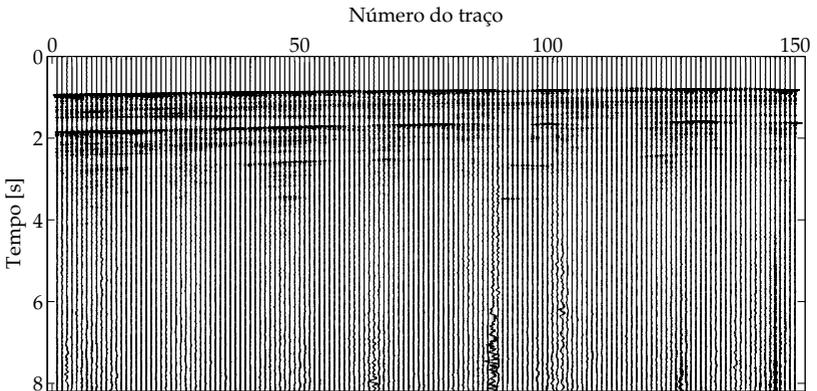


Figura 5.14.: Deconvolução de todos os 150 traços utilizando o pulso estimado com três funções simples.

Como o algoritmo adaptativo permite a iteração pulso-a-

pulso, é possível aplicá-lo em tempo real. Para ilustrar a metodologia e expor alguns resultados a estimativa do pulso enviado pela fonte foi aplicada utilizando três funções simples ao longo do conjunto de ondas diretas (Figura 5.9), usadas como referência. Um passo de convergência de $\mu = 2$ foi utilizado. O conjunto de pulsos estimados é exposto na Figura 5.15.

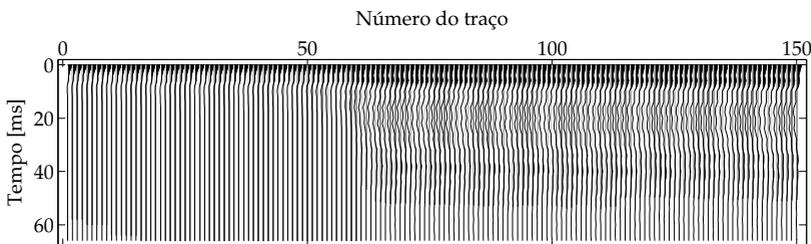


Figura 5.15.: Pulsos estimados através das ondas diretas.

Por se tratar de um algoritmo adaptativo, no qual está se utilizando a própria onda direta como referência há um tempo de amortecimento até que haja convergência dos coeficientes e erro para valores próximos aos reais. Desta forma, como se pode notar na Figura 5.15 apenas a partir do traço 60 os pulsos estimados começam a ser bem semelhantes às ondas diretas. As curvas para a progressão dos coeficientes adaptativos e do erro com o número de iterações são expostas na Figura 5.16.

Corroborando com a Figura 5.15, é percebe-se a convergência apenas a partir da 60ª iteração, quando os pulsos passam a ser muito parecidos com as ondas diretas obtidas a partir dos traços. Com o conjunto de pulsos estimados, foi realizada a deconvolução de cada traço com seu respectivo pulso estimado. O coeficiente de regularização utilizado foi de $\delta = 0,01$ e os traços deconvolvidos estão expostos na Figura 5.17.

Nessa, percebe-se de forma sutil, que o realce nas reflexões ocorre apenas para os últimos traços, quando se tem a boa estimativa de pulso. Todavia, como ponto positivo se tem que os traços do início, antes da convergência, não são comprometidos após a deconvolução.

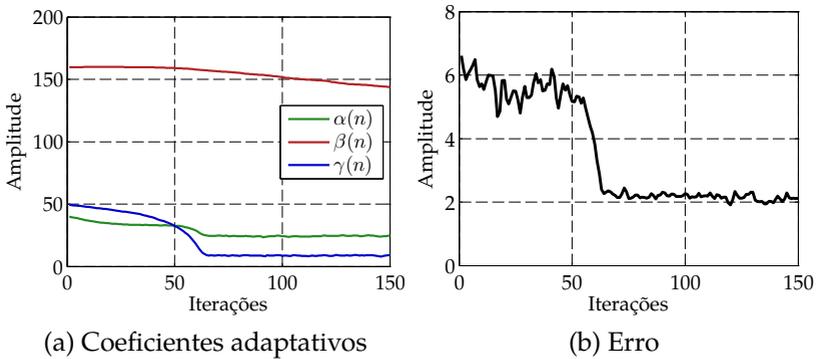


Figura 5.16.: Convergência dos coeficientes e do erro para estimativa dos pulsos enviados realizando a iteração entre os pulsos.

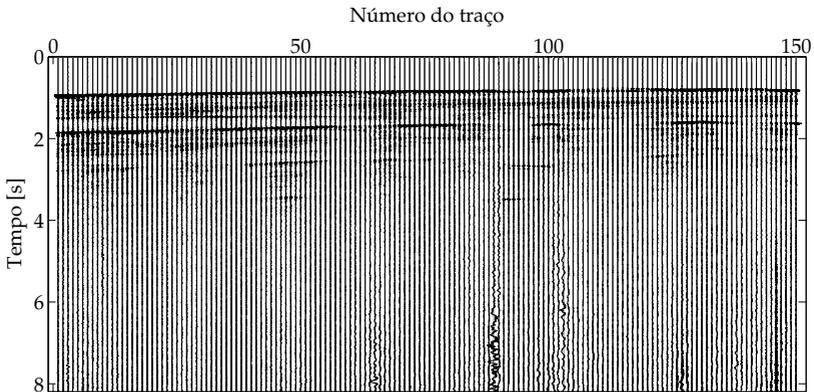


Figura 5.17.: Deconvolução de todos os 150 traços utilizando os pulsos estimados com três funções simples para cada um dos traços.

De forma a comparar melhor os efeitos e alterações entre as deconvoluções, aproximou-se os traços para um tempo de duas vias de 3 s. A deconvolução utilizando o pulso estimado através de duas funções simples é exposta na Figura 5.18, a que utiliza o pulso estimado através de três funções simples é exposta na

Figura 5.19 e a que utiliza um pulso estimado para cada traço é exposta na Figura 5.20.

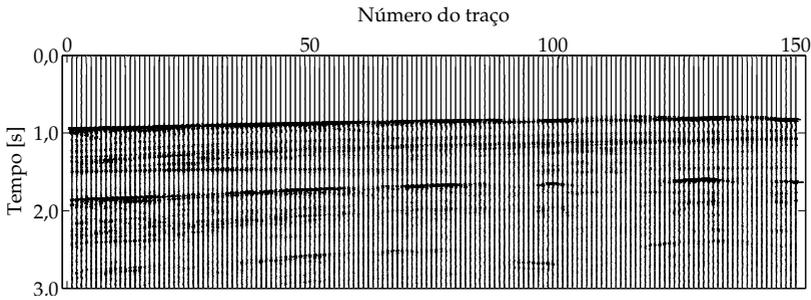


Figura 5.18.: Deconvolução com pulso estimado - 2 funções.

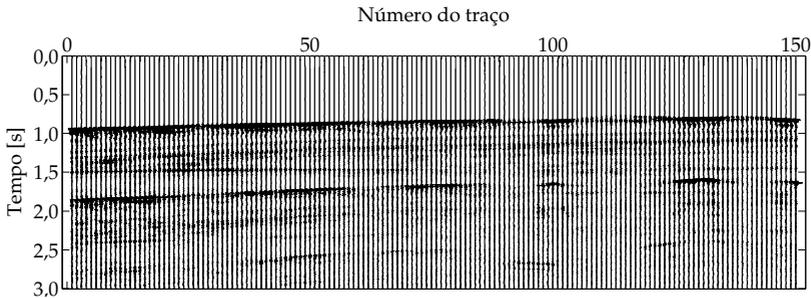


Figura 5.19.: Deconvolução com único pulso estimado - 3 funções.

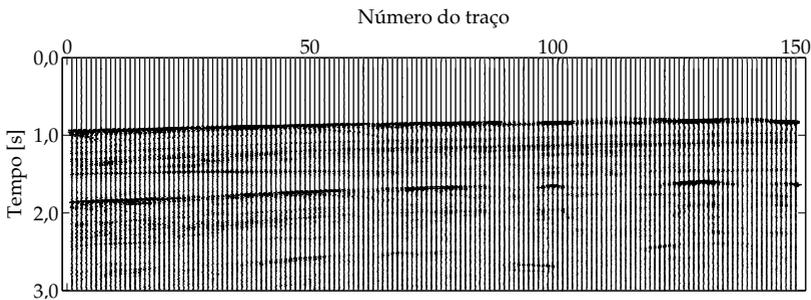


Figura 5.20.: Deconvolução com pulsos estimados ao longo dos traços- 3 funções.

É perceptível que as três deconvoluções trazem melhoras na percepção das reflexões. Algumas feições que não eram visíveis através dos dados não deconvolvidos passam a ser realçadas e ruído é descartado.

Contudo, nota-se que a deconvolução utilizando três funções simples teve um desempenho não tão bom quando a que utilizou duas funções. Ruído, principalmente abaixo das reflexões principais, começa a aparecer. Esse comportamento pode se dever ao fato de que a utilização de três coeficientes, ao invés de dois, passou a reconstruir característica do ruído e não apenas do pulso.

Na Figura 5.21 esse padrão pode ser observado com mais clareza. Um destaque foi dado a uma região ao final dos conjuntos de traços brutos, de traços deconvolvidos utilizando duas funções simples e de traços deconvolvidos utilizando três funções simples.

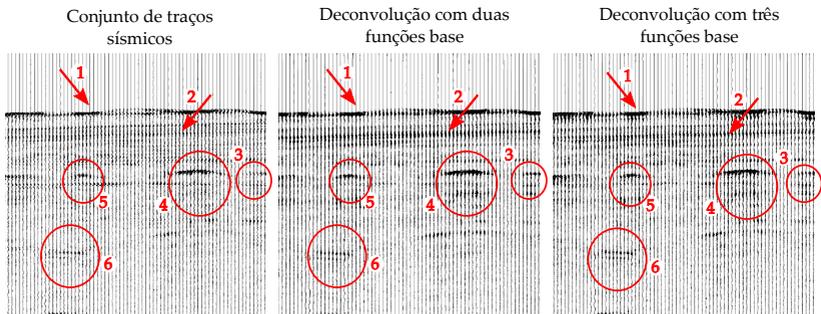


Figura 5.21.: Destaque esquemático aos finais dos conjuntos de traços brutos, deconvolvidos com uso de duas funções e com três funções.

Percebe-se que as deconvoluções trazem um realce das reflexões em destaque. Com tudo, principalmente observando a feição 1, a utilização de três funções simples acrescentou ruído abaixo das reflexões, causando um efeito borrado. Algumas reflexões, como a inferior dentro do 6º destaque, as inferiores

do 3º destaque e a apontada pelo 2º destaque, só aparecem após a aplicação da deconvolução. Além disso, no 4º destaque, principalmente com a utilização de duas funções, pode-se observar a presença de eventos abaixo da reflexão principal, antes imperceptíveis. Apesar de pouca diferença, é perceptível que a deconvolução traz melhoras à imagem sísmica.

Como análise final, pode-se observar na Figura 5.22, o resultado para a deconvolução com amortecimento dos traços utilizando a onda direta e na Figura 5.23 o resultado para a deconvolução dos traços utilizando a técnica probabilística, a deconvolução em impulsos.

De forma a facilitar a comparação, a Figura 5.24 repete a já exibida deconvolução com o pulso estimado através da combinação de duas funções simples.

É possível perceber, que quando aplicada a dados reais, a deconvolução com amortecimento fazendo uso do pulso estimado através do algoritmo proposto se mostra muito mais eficiente que a deconvolução com amortecimento utilizando a onda direta e que a deconvolução probabilística. Enquanto a utilização da onda direta aumenta o efeito borrado e acrescenta ruído dificultando a identificações de feições e a deconvolução em impulsos adiciona ambiguidades e ruído, a deconvolução utilizando o pulso estimado revela feições não visíveis no dado bruto e realça feições já visíveis, melhorando a imagem sísmica. Desta forma, na ausência da informação do pulso enviado pela fonte, a aplicação da estimativa de pulso retorna melhores resultados.

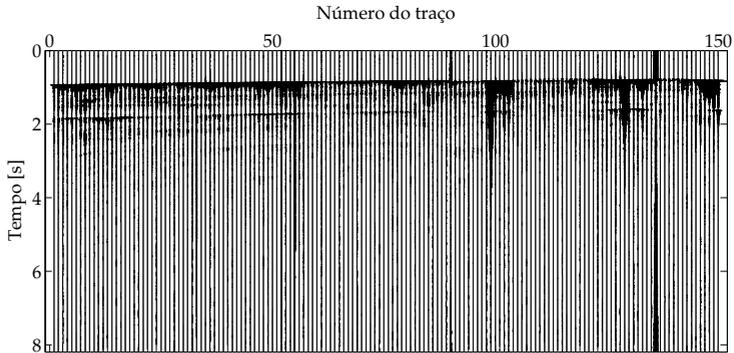


Figura 5.22.: Deconv. com regularização com a onda direta.

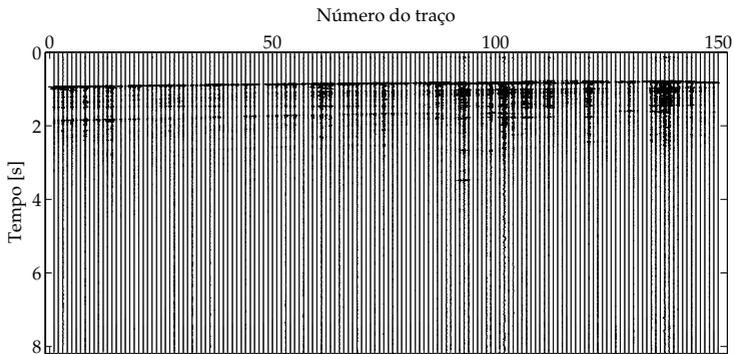


Figura 5.23.: Deconv. em impulsos.

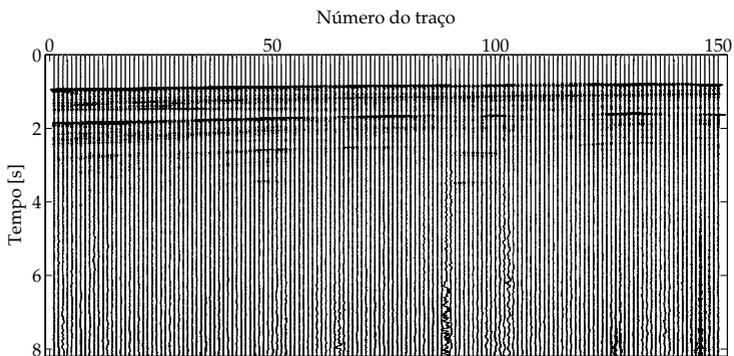


Figura 5.24.: Deconv. com regularização com pulso estimado.

5.3 Conclusões preliminares

Neste capítulo as técnicas e metodologias apresentadas e discutidas no trabalho foram aplicadas a dados reais oriundos da indústria do petróleo. O algoritmo de estimativa de pulso exposto na Capítulo 4 foi aplicado, com duas ou três funções simples, às ondas diretas extraídas dos dados para que o pulso enviado pela fonte fosse recuperado. Com pulsos estimados é possível deconvolver os traços sísmicos a fim de obter uma imagem sísmica mais clara.

Foi possível notar que o algoritmo de estimativa do pulso é robusto inclusive quando aplicado a dados reais e é capaz de recuperar o pulso de forma eficiente. O pulso estimado com a utilização de duas ou três funções simples são bem semelhantes. Contudo, o espectro do pulso estimado utilizando as três funções simples é mais fiel à onda direta por ter sido adicionada uma frequência após a observação das características da onda direta. Deve-se tomar cuidado com número de coeficientes a adaptar para que um número grande não seja capaz de reproduzir, além do pulso enviado, componentes de ruído e dificultar a convergência dos coeficientes. Pois como percebido, além de exigir o cálculo de gradientes mais complicados, a utilização de mais funções simples exigiu mais iterações para que houvesse a convergência.

Ao realizar a deconvolução de apenas um pulso, pouca diferença foi notada comparando os casos que utilizaram duas ou três coeficientes adaptativos. Porém, ao avaliar o conjunto de traços deconvolvidos, se nota que a deconvolução traz um realce das reflexões já visíveis através do conjunto de traços e traz a tonalidades não visíveis anteriormente. Contudo, a utilização das três funções base faz com que haja a inserção de um ruído, formando um efeito borrado, abaixo das reflexões principais. Isso pode ser devido ao fato de que a função adicionada para que o espectro da onda direta fosse reconstruído, contribuiu para a reconstrução do ruído e não do pulso original enviado pela fonte.

Ao aplicar o algoritmo ao longo dos traços, como em uma aplicação de tempo real, o algoritmo apresentou um tempo de amortecimento para que houvesse convergência. Desta forma, a deconvolução apenas mostrou melhora em relação ao conjunto de traços sísmicos para os traços após a convergência, que correspondeu a 60 traços no caso estudado. Contudo, se ressalta que a estimativa do pulso não desestabilizou ou comprometeu os traços deconvolvidos antes da convergência.

Quando comparou-se os resultados obtido com a aplicação do algoritmo de estimativa de pulso para a deconvolução com o utilização da onda direta e com a deconvolução em impulsos foi possível notar uma melhora expressiva na imagem sísmica obtida. Menos ambiguidades são geradas e mais feições são realçadas.

Deve-se ressaltar que resultados melhores podem ser obtidos quando as técnicas forem aplicadas a dados empilhados e pré-processados de forma minuciosa. No conjunto de dados em questão a relação sinal-ruído é baixa e pode comprometer a obtenção de bons resultados.

Tendo isso em vista, se conclui que o algoritmo é robusto e recomendado para a aplicação a dados reais, incluindo a aplicação em tempo real. Principalmente, quando somado ao fato de que a utilização de funções base facilita o cálculo do filtro inverso analiticamente.

6 Considerações finais

Nesse capítulo são expostas as conclusões sobre as etapas do trabalho, pesquisas e discussões realizadas. Além disso, é realizado um apanhado das considerações e as recomendações sobre a utilização e escolha dos métodos apresentados. Cada capítulo que expõe e discute resultados possui uma sessão em que apresenta conclusões específicas sobre os temas abordados. As conclusões servem de embasamento para as recomendações e sugestão de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões sumarizadas e recomendações

Inicialmente, uma revisão sobre o funcionamento e classificação dos métodos sísmicos é apresentada no trabalho. O processamento dos dados provenientes de investigações sísmicas foi exposto. As etapas do processamento de dados sísmicos são diversas e apresentam fontes de erros, principalmente quando estão baseadas em premissas que são facilmente violadas. Com isso, é possível obter informações ambíguas ou não verídicas a respeito do ambiente investigado. Deve-se, então, buscar formas de aprimorar as etapas e metodologias empregadas, para que melhores resultados possam ser atingidos.

A deconvolução é etapa importantíssima no processamento de dados sísmicos. Nessa etapa, a influência do pulso enviado pela fonte é removida para que apenas a informação a respeito do ambiente reste. Contudo, a deconvolução possui fontes conhecidas de erros como a recorrente ausência do

conhecimento do pulso enviado pela fonte, a presença de ruído e a deficiência de algoritmos de deconvolução escolhidos. Esta etapa do processamento possui, em geral, duas abordagens de aplicação: a determinística, na qual o pulso enviado pela fonte é conhecido ou estimado e a estatística, na qual não há conhecimento sobre o pulso.

Tendo isto em vista, no presente trabalho foram expostas e aplicadas três técnicas determinísticas e uma técnica probabilística para que dados sísmicos fossem deconvolvidos. É sabido que a aplicação de técnicas determinísticas é mais robusta e confiável. Desta forma, o objetivo principal do trabalho foi a aplicação de um algoritmo iterativo baseado em funções de erro capaz de estimar o pulso enviado pela fonte, quando este é desconhecido. Com a estimativa do pulso em mãos, torna-se possível a aplicação de técnicas determinísticas de deconvolução.

Na ausência da informação do pulso, além das metodologias probabilísticas, existem na bibliografia técnicas para que o pulso seja estimado. Contudo, a maioria é dispendiosa e não retorna bons resultados quando premissas não são seguidas. O algoritmo proposto é baseado em mecanismos simples de estimativa e permite, analiticamente, o cálculo de um filtro inverso com entradas simples, o que facilita a sua aplicação de forma intuitiva, fácil e em tempo real.

Com isso, o trabalho serve como base para pesquisadores que buscam entender melhor o procedimento da deconvolução, bem como, buscam alternativas para que seus dados tragam melhores resultados sobre o meio investigado, mediante o aprimoramento da forma de estimar o pulso sísmico.

As três técnicas determinísticas são aplicadas a traços emulados com a utilização de pulsos de fase mínima, fase zero e mista: duas no domínio do tempo e uma no domínio da frequência. As três deconvoluções mostraram bons resultados para o pulso de fase mínima, que é estável devido à característica de seus polos e zeros da Transformada Z. Para os outros dois pulsos,

bons resultados são obtidos em algumas situações pontuais, com regularização e/ou formas de estabilização.

Considerou-se a deconvolução com amortecimento no domínio da frequência, rápida, de fácil aplicação e intuitiva. Permitiu que uma regularização proporcional a uma característica do pulso fosse definida, o que torna a solução do problema mais objetiva e apresentou resultados satisfatórios para os pulsos de fase zero e mista. Já a deconvolução simultânea no domínio do tempo, por envolver a inversão de grandes matrizes, possui um alto custo computacional. Todavia, após a inserção de mais traços não há adição de tempo computacional, já que a técnica realiza a inversão apenas uma vez. Bons resultados foram obtidos por meio de regularizações pontuais, selecionadas mediante utilização das características da refletividade estimada como parâmetro. A deconvolução iterativa no domínio do tempo não faz uso de fator de amortecimento e permite a definição de uma função para dar forma à refletividade. Busca as regiões de maior correlação entre traço e pulso e constrói a refletividade iterativamente. Apesar de identificar bem as posições e amplitudes das reflexões, na presença de um ruído maior ou de pulsos não bem conhecidos, pode mascarar os eventos e se tornar inaplicável.

Além das técnicas determinísticas, foi aplicada a técnica da deconvolução em impulsos, classificada como estatística. Essa técnica parte do princípio de que o pulso enviado pela fonte não é conhecido mas suas características podem ser estimadas a partir da autocorrelação do traço sísmico. A reflexão é bem recuperada para o caso em que se trabalha com pulso de fase mínima. Contudo, para os outros dois casos os resultados são ruins. Isso porque esta metodologia assume uma série de premissas a que o sistema está exposto, em que, na verdade, os dados não foram aquisitados.

Como em casos reais, geralmente, não há conhecimento sobre o pulso enviado pela fonte e como os resultados para deconvolução determinística são melhores e permitem uma série

de adequações, a onda direta é utilizada ou se busca estimar a forma do pulso para que um sinal seja deconvolvido. Existem diversas técnicas para buscar esta estimativa, muitas vezes dispendiosas e não eficientes. Apresenta-se, então uma técnica que envolve um algoritmo adaptativo que utiliza o Método dos Mínimos Quadrados e do Método do Gradiente de Descida para estimar, através da combinação de funções simples, o pulso sonoro enviado pela fonte. O método foi exposto, validado e aplicado a traços sísmicos.

Para comparar o desempenho do algoritmo apresentado, o algoritmo foi aplicado a traços sísmicos e o pulso foi estimado. Com isso, os traços sísmicos foram deconvolvidos de forma determinística (com as três técnicas expostas) utilizando o pulso estimado através do algoritmo adaptativo e utilizando a onda direta. O erro de estimativa da refletividade foi sempre menor para os casos em que o procedimento com o pulso estimado foi aplicado do que para os que utilizaram a onda direta. O mesmo ocorreu com o fator de coerência de amplitude. Ou seja, as deconvoluções que utilizaram o pulso estimado trouxeram uma informação mais correta, incluindo a recuperação da amplitude.

Finalmente, o algoritmo de estimativa de pulso apresentado foi aplicado a dados reais oriundos da indústria do Petróleo. Um conjunto de 150 traços sísmicos resultantes da emissão de uma fonte do tipo *airgun* foram utilizados. Em uma primeira abordagem apenas duas funções simples foram utilizadas para estimar um único pulso. Com o pulso bem estimado em mãos, a deconvolução clássica de divisão espectral foi aplicada a um único traço. A estimativa do pulso trouxe melhoras à deconvolução e um realce das feições e o aparecimento de outras, antes não visíveis. O mesmo ocorreu ao aplicar a deconvolução utilizando este mesmo pulso para todos os traços. Uma segunda abordagem foi realizada utilizando uma função simples a mais. Com a adição de mais um coeficiente para adaptar, o espectro do pulso sonoro estimado se aproximou mais do espectro da onda direta. Contudo, apesar de muito semelhante ao resultado que

utilizou duas funções, notou-se a presença de ruído abaixo de grandes feições. Isso pode ser devido ao fato de que a adição de uma função simples reproduziu o ruído intrínseco à onda direta e não uma característica do pulso enviado pela fonte.

Por fim, aplicou-se o método para estimativa dos pulsos ao longo dos traços, utilizando todas as ondas diretas como referência. Neste caso, aplicou-se a deconvolução a cada um dos traços com seu respectivo pulso estimado. Como o algoritmo possui um tempo de amortecimento até que passe a convergir para bons valores, a deconvolução passou a melhorar a imagem sísmica apenas após essa convergência.

Desta forma, é possível concluir que o algoritmo adaptativo proposto para que pulsos sonoros sejam estimados, é robusto. Além de estimar de forma eficiente, fácil e intuitiva o pulso, ele permite que haja uma melhora na aplicação das técnicas de deconvolução, fazendo com que ruído, ambiguidades e inconsistências sejam minimizadas no processamento.

6.2 Trabalhos futuros

A técnica da deconvolução é antiga, amplamente utilizada e extremamente importante para o processamento de dados sísmicos. Tendo isto em vista, muitos algoritmos já foram desenvolvidos a fim de eliminar problemas que aparecem durante a aplicação. Devido à abrangência do tema, poucos algoritmos, métodos e conceitos puderam ser explorados. Desta forma, é sugerido que a revisão de outras técnicas de deconvolução sejam levadas em conta.

Além disso, tendo em vista que os resultados de deconvolução são melhores quando aplicados com a utilização de pulsos de mínima fase, se torna interessante fazer com que qualquer pulso tenha seu espectro de magnitude mantido e seu espectro de fase convertido em um espectro de mínima fase. Essas técnicas não foram aplicadas neste trabalho e um estudo que abrangesse a aplicação de deconvoluções com a utilização de

pulsos convertidos traria grande avanço à área.

Levando em conta os estudos sobre as formas de regularização, foi possível perceber que em frequências distintas a regularização ajudou de forma distinta. Desta forma, pode ser sugerido um estudo sobre a aplicação de uma regularização em forma de função e não como um fator escalar sobre todo o espectro.

O algoritmo iterativo de estimativa do pulso sísmico foi aplicado a um pulso de fase mínima devido à sua estabilidade. Contudo, seria interessante, se uma outra pesquisa adaptasse o algoritmo para que o pulso estimado através deste já fosse uma versão de fase mínima. Desta forma, o pulso estimado através do método já sairia pronto para que as deconvoluções pudessem ser realizadas de forma estável.

Levando em conta a revisão feita acerca do assunto, conclui-se que existem muitas lacunas no conhecimento e problemas na aplicação de métodos de deconvolução e estimativa de pulsos. Desta forma, a área oferece uma gama muito grande de temas a serem abordados e pesquisados.

Referências Bibliográficas

- [1] Robert Urick. *Principles of Underwater Sound*. Peninsula Pub, 3rd edition, 1996.
(Citado nas páginas 17, 36, 37, 48, 49, 50, 59, 60, 66 e 68)
- [2] Tom Garrison. *Essentials of Oceanography*. Cengage Learning, 6th edition, 2011.
(Citado na página 35)
- [3] Philip Kearey, Michael Brooks, e Ian Hill. *An introduction to geophysical exploration*. Wiley. com, 2009.
(Citado nas páginas 36 e 62)
- [4] Arthur Ayres. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18(3):16, 2001.
(Citado na página 36)
- [5] Peter Wille. *Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring*. Springer, Alemanha, 2005.
(Citado nas páginas 37 e 50)
- [6] Paul Etter. *Underwater Acoustic Modelling and Simulation, Third Edition*. CRC Press, 3rd edition, 2003.
(Citado na página 37)
- [7] Boris Katsnelson, Valery Petnikov, e James Lynch. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics (The Underwater Acoustics Series)*. Springer, 2012 edition, 2012.
(Citado nas páginas 38, 52 e 53)

- [8] Mike Bacon, Rob Simm, e Terry Redshaw. *3-D seismic interpretation*. Cambridge University Press, 2003.
(Citado nas páginas 38, 62, 74, 76 e 88)
- [9] Ozdogan Yilmaz. *Seismic data processing*. SEG Investigations in Geophysics, 1987.
(Citado nas páginas 39, 40, 63, 76, 79, 80, 81, 84, 85, 87, 88, 89, 93, 141 e 144)
- [10] Claudia Wienberg e Alexander Bartholomä. Acoustic classification in a coastal environment (outer weser estuary, german bight) - a new approach to monitor dredging and dredge spoil disposal. *Continental Shelf Research*, 25:1143–1156, 2005.
(Citado na página 41)
- [11] Luke John e William Pinson. *Derivation of acoustic and physical properties from high-resolution seismic reflection data*. PhD thesis, University of Southampton, 2009.
(Citado na página 41)
- [12] Luke John William Pinson, Timothy Henstock, Justin Dix, e Jonathan Bull. Estimating quality factor and mean grain size of sediments from high-resolution marine seismic data. *Geophysics*, 73(4):G19–G28, 2008.
(Citado na página 41)
- [13] Maurice Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 2: Higher-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2):179–191, março 1956.
(Citado na página 41)
- [14] Maurice Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. 1. low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2):168–178, Março 1956.
(Citado nas páginas)
- [15] Robert Stoll. Acoustic waves in ocean sediments. *Geophysics*, 42(4):715–725, Junho 1977.

(Citado na página 41)

- [16] Mark Vardy, Justin Dix, Timothy Henstock, Jonathan Bull, e Martin Gutowski. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: A case study in small-object detection. *Geophysics*, 73(2):B33–B40, 2008.
(Citado na página 42)
- [17] Steven Schock, Arnaud Tellier, Jim Wulf, e Jason Sara. Buried object scanning sonar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(4):677–689, outubro 2001.
(Citado nas páginas)
- [18] Martin Gutowski, Jonathan Bull, Justin Dix, Timothy Henstock, Peter Hogarth, Tom Hiller, Timothy Leighton, e Paul White. 3D high-resolution acoustic imaging of the seabed. *Applied Acoustics*, 69(3):262–271, mar 2008.
(Citado na página 42)
- [19] Ruth Plets e Mieke Karen. *The acoustic imaging, reconstruction and characterization of buried archaeological material*. PhD thesis, University of Southampton, 2007.
(Citado na página 42)
- [20] UNESCO, 2011. URL <http://www.unesco.org/new/en/culture/themes/underwater-cultural-heritage/2001-convention/>. Acessado em 16 de setembro de 2015.
(Citado na página 42)
- [21] Ruth Plets, Justin Dix, Jon Adams, Jonathan Bull, Timothy Henstock, Martins Gutowski, e Angus Best. The use of a high-resolution 3D chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (1439), River Hamble, UK. *Journal of Archaeological Science*, 36:408–418, 2009.
(Citado na página 43)
- [22] P M Soupios, P Gerorgakopoulos, N Papadopoulos, V Saltas, A Andreadakis, F Vallianatos, e A Sarris ans

- J P Makris. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of geophysics and engineering*, 4:94–103, 2007.
(Citado na página 43)
- [23] Luiz Antonio Pereira Souza. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2006.
(Citado na página 43)
- [24] Darrell Jackson e Michael Richardson. *High-Frequency Seafloor Acoustics (The Underwater Acoustics Series)*. Springer, 2007 edition, 12 2006.
(Citado nas páginas 44, 47, 48, 54 e 56)
- [25] Robert Sheriff. What is deconvolution? Adaptado da coluna publicada em abril de 2004 na AAPG Explorer.
(Citado na página 47)
- [26] David Blackstock. *Fundamentals of Physical Acoustics*. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 2000.
(Citado na página 48)
- [27] Finn Jensen, William Kuperman, Michael Porter, e Henrik Schmidt. *Computational Ocean Acoustics (Modern Acoustics and Signal Processing)*. Springer, 2011.
(Citado na página 49)
- [28] Richard Hodges. *Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar*. Wiley, 2010.
(Citado nas páginas 49 e 59)
- [29] João Paulo Ristow. Estudo e desenvolvimento de algoritmos de sonar ativo para o mapeamento de áreas submersas. Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
(Citado nas páginas 51 e 60)
- [30] Roy Edgar Hansen. Introduction to sonar. Material de curso, Universidade de Oslo, Setembro 2011.
(Citado nas páginas 52 e 57)

- [31] IAGC (International association of oil e gas producers). *Fundamentals of underwater sound*. Technical report, International Association of Geophysical Contractors, 2008.
(Citado nas páginas 52 e 57)
- [32] Leonid Brekhovskikh e Yuri Lysanov. *Fundamentals of Ocean Acoustics (Modern Acoustics and Signal Processing)*. Springer, 3rd edition, 2003.
(Citado na página 52)
- [33] Edwin Hamilton. Geoacoustic modeling of the seafloor. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5):1313–1340, Novembro 1980.
(Citado na página 54)
- [34] Marina Bousfield. Comparação da resposta acústica obtida a partir de diferentes modelos de propagação de ondas em substratos marinhos. Trabalho de conclusão de curso, novembro 2014.
(Citado na página 56)
- [35] Chris Chapman. *Fundamentals of Seismic Wave Propagation*. Cambridge University Press, 2004.
(Citado nas páginas 57 e 58)
- [36] Hossein Peyvandi, Mehdi Farrokhrooz, Hossein Roufarshbaf, e Sung-Joon Park. SONAR systems and underwater signal processing: Classic and modern approaches. In *Sonar Systems*. InTech, sep 2011.
(Citado na página 59)
- [37] Michael Ainslie. *Principles of Sonar Performance Modelling (Springer Praxis Books)*. Springer, 2010. ISBN 3540876618.
(Citado na página 59)
- [38] J. I. Ewing. *The Sea, Volume 3: The Earth Beneath the Sea History (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas)*, chapter Geophysical exploration, páginas 3–17. Harvard University Press, 1962.
(Citado nas páginas 61 e 64)

- [39] IAGC (International association of oil e gas producers). An overview of marine seismic operations. Technical Report 448, International Association of Geophysical Contractors, Abril 2011.
(Citado nas páginas 61, 62, 72, 74, 75 e 76)
- [40] J. B Hersey. *The Sea, Volume 3: The Earth Beneath the Sea History (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas)*, chapter Continuous reflection profile, páginas 47–71. Harvard University Press, 1962.
(Citado nas páginas 63 e 66)
- [41] John Scales. *Theory of Seismic Imaging (Lecture Notes in Earth Sciences)*. Springer, 1995.
(Citado na página 63)
- [42] Mark Vardy. *Real-Time Imaging of Decimetre-Resolution 3D Seismic Volumes*. PhD thesis, University of Southampton, 2009.
(Citado na página 64)
- [43] Maritn Landrø e Lasse Amundsen. Marine seismic source part i. *GEOExpro*, 7(1):32–34, 2010.
(Citado nas páginas 65 e 66)
- [44] Peter Simpkin e Angela Davis. For seismic profiling in very shallow water, a novel receiver. *Sea Technology;(United States)*, 34(9), 1993.
(Citado na página 66)
- [45] Edwin Hamilton. Geoacoustic models of the sea floor. In *Physics of sound in marine sediments*, Marine Science, páginas 181–221. Springer, 1980.
(Citado na página 66)
- [46] Gregg Parkes e Les Hatton. *The Marine Seismic Source*. Springer Nature, 1986.
(Citado nas páginas 66, 68 e 69)

- [47] Jim Leinbach. Wiener spiking deconvolution and minimum-phase wavelets: A tutorial. *The Leading Edge*, 14 (3):189–192, mar 1995.
(Citado nas páginas 69, 89 e 149)
- [48] Rob Hardy. *Basic seismic processing for interpreters*, Março 2015. URL <http://www.xsgeo.com/course/contents.htm>.
(Citado nas páginas 69, 70, 71 e 91)
- [49] Alan V. Oppenheim e Ronald W. Schaffer. *Discrete-time Signal Processing: International Version*. Pearson, 2010.
(Citado nas páginas 70 e 149)
- [50] SEG Wiki, acessado em dezembro 2016. URL http://wiki.seg.org/wiki/main_page.
(Citado na página 71)
- [51] Charles H. Sherman e John L. Butler. *Transducers and Arrays for Underwater Sound (The Underwater Acoustics Series)*. Springer, 2007.
(Citado na página 72)
- [52] Onda Corporation. Hydrophone handbook, acessado em outubro 2015. URL <http://ondacorp.com/handbook>.
(Citado na página 72)
- [53] Biondo Biondi. *3D seismic imaging*. Number 14. Society of Exploration Geophysicists, 2006.
(Citado nas páginas 74 e 75)
- [54] Norm Cooper. The value of 3d seismic in today's exploration environment - in canada and around the world, acessado em setembro 2015. URL http://mustagh.com/abstract/OPI_3D.html.
(Citado na página 74)
- [55] Wail Mousa e Abdullatif Al-Shuhail. *Processing of Seismic Reflection Data Using MATLAB*. Morgan & Claypool Publishers, 2011.
(Citado nas páginas 76, 79, 80, 81, 85, 87, 91, 140, 143 e 144)

- [56] Thomas Mejer Hansen. *SegyMAT : Read and Write SEG-Y files using Matlab and Octave*, 1.5 edition, 2001.
(Citado na página 80)
- [57] Kihong Shin e Prof Joseph Hammond. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. Wiley, 2008.
(Citado nas páginas 82 e 90)
- [58] Mostafa Naghizadeh. Seismic data interpolation and denoising in the frequency-wavenumber domain. *Geophysics*, 77(2):V71–V80, 2012.
(Citado na página 84)
- [59] David Boreham, John Kingston, Phil Shaw, e Jack van Zeelst. 3D marine seismic data processing. *Oilfield review*, 1:41–55, 1991.
(Citado na página 86)
- [60] Enwenode Onajite. *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. Elsevier, 2013.
(Citado na página 88)
- [61] Vijak Arya. Deconvolution os seismic data - an overview. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, GE-16:95–98, 1978.
(Citado nas páginas 89, 90 e 140)
- [62] G. P. Wadsworth, E. A. Robinson, J. G. Bryan, e P. M. Hurley. Detection of reflection on seismic records by linear operators. *Geophysics*, 18(3):539–586, jul 1953.
(Citado nas páginas 89 e 139)
- [63] Oxford dictionary. URL <http://www.oxforddictionaries.com/>. Acessado em 22 de agosto de 2016.
(Citado na página 92)
- [64] Enders Robinson. Signal processing in geophysics. In Leif Bjørnø, editor, *Underwater Acoustics and Singal*

Processing, volume 66 of *Mathematical and Physical Sciences*, páginas 669–682. Nato advanced study institute, D. Reidel Publishing Company, 1981.

(Citado na página 93)

- [65] Harold Gurrola, Eli Baker, e Bernard Minster. Simultaneous tim-domain deconvolution with application to the computation of receiver functions. *Geophysical Journal International*, 120:537–543, 1995.

(Citado nas páginas 93, 100, 109, 111, 112, 113, 116, 121, 124, 125 e 126)

- [66] Stuart Sipkin e Arthur Lerner-Lam. Pulse-shape distortion introduced by broadband deconvolution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82:238–258, 1992.

(Citado na página 93)

- [67] Mike Warner. Signal processing and inverse theory. 2009.

(Citado nas páginas 93, 100, 140, 145 e 152)

- [68] Gordon Wenz. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *The journal of the acoustical society of America*, 34(12), 1962.

(Citado nas páginas 96 e 97)

- [69] M. G. Bostock. Mantle stratigraphy and evolution of the Slave province. *J. Geophys. Res.*, 103(B9):21183–21200, sep 1998.

(Citado na página 109)

- [70] Katryn A. Pesce. Comparison of receiver function deconvolution techniques. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, Setembro 2010.

(Citado na página 109)

- [71] Masayuki Kikuchi e Hiroo Kanamori. Inversion of complex body waves. *Bulletin of seismological society of America*, 72(2): 491–506, abril 1982.

(Citado na página 126)

- [72] Juan Pablo Ligorria e Charles Ammon. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bulletin of the seismological society of america*, 89(5):1395–1400, Outubro 1999.
(Citado nas páginas 126, 129 e 131)
- [73] Enders A. Robinson. Predictive decomposition of seismic traces. *Geophysics*, 22(4):767–778, oct 1957.
(Citado nas páginas 139 e 152)
- [74] Norbert Wiener. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series: With Engineering Applications* (MIT Press). The MIT Press, 3 1964.
(Citado na página 139)
- [75] K. L. Peacock e Sven Treitel. Predictive deconvolution: Theory and practice. *Geophysics*, 34(2):155–169, apr 1969.
(Citado nas páginas 140 e 152)
- [76] André Luiz Romanelli Rosa. *Análise do sinal sísmico*. Sociedade Brasileira de Geofísica, 2010.
(Citado na página 149)
- [77] Roy O. Lindseth. *Digital Processing of Geophysical Data - A Review*. Society Of Exploration Geophysicists, 1982.
(Citado na página 149)
- [78] Allan Segovia Spadini. Avaliação do método de deconvolução sobre dados de sísmica rasa. Mestrado, Instituto de astronomia, geofísica e ciências atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2012.
(Citado na página 151)
- [79] R. E. White e P. N. S. O'Brien. Estimation of the primary seismic pulse. *Geophysical Prospecting*, 22(4):627–651, dec 1974.
(Citado nas páginas 151 e 152)
- [80] Lang Tong e S. Perreau. Multichannel blind identification: from subspace to maximum likelihood methods. *Proceedings of the IEEE*, 86(10):1951–1968, 1998.

(Citado na página 152)

- [81] A. J. Berkhout e D. J. Verschuur. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part i: Theoretical considerations. *GEOPHYSICS*, 62(5):1586–1595, sep 1997.
(Citado na página 152)
- [82] J. Mendel. White-noise estimators for seismic data processing in oil exploration. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(5):694–706, oct 1977.
(Citado na página 152)
- [83] Alastair McAulay. Predictive deconvolution of seismic array data for inversion. In *ICASSP '85. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 1985.
(Citado na página 152)
- [84] Luc Ikelle, Graham Roberts, e Arthur Weglein. Source signature estimation based on the removal of first-order multiples. *Geophysics*, 62(6):1904–1920, 1997.
(Citado na página 152)
- [85] Stéphane Rondenay. Upper mantle imaging with array recordings of converted and scattered teleseismic waves. *Surveys in Geophysics*, 30:377–405, 2009.
(Citado na página 152)
- [86] Ayon Kumar Dey. An analysis of seismic wavelet estimation. Mestrado, University of Calgary, nov 1999.
(Citado na página 152)
- [87] Bo Y. Yi, Gwang H. Lee, Han-Joon Kim, Hyeong-Tae Jou, Dong G. Yoo, Byong J. Ryu, e Keumsuk Lee. Comparison of wavelet estimation methods. *Geosciences Journal*, 17(1): 55–63, feb 2013.
(Citado na página 152)

- [88] Jonathan A. Edgar e Mirko Van der Baan. How reliable is statistical wavelet estimation? *Geophysics*, 76(4):59–68, jul 2011.
(Citado na página 152)
- [89] Jing Zheng, Su ping Peng, Ming chu Liu, e Zhe Liang. A novel seismic wavelet estimation method. *Journal of Applied Geophysics*, 90:92–95, 2013.
(Citado na página 153)
- [90] Marina Martins Bousfield, João Paulo Ristow, Julio Apolinário Cordioli, Izabelle Aller, Marcus Barão, Antonio Henrique da Fontoura Klein, e Guillaume François Gilbert Barrault. Using base function decomposition in adaptive filter for seismic pulse retrieving. In *Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics*, 2016.
(Citado na página 153)
- [91] Michael Lamoureux e Gary Margrave. An analytic approach to minimum phase signals. Technical report, Consortium for research in elastic wave exploration seismology, 2007.
(Citado na página 153)
- [92] M. Baruch, D. Warburton, S. Bredin, A. Cote, D. Gerdt, e C. Adkins. Pulse decomposition analysis of the digital arterial pulse during hemorrhage simulation. *Nonlinear Biomedical Physics*, 5(1), 2011.
(Citado na página 154)
- [93] Z. Jia, H. Chen, X. Cai, e X. Chen. A novel pulse design based on sinusoid gaussian function for UWB communication. In *2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology*. (IEEE), oct 2010.
(Citado na página 154)
- [94] Mark Mikaelsen. Seismic survey Greenland 2013: Underwater sound propagation for South East Greenland

offshore seismic survey. Technical report, Niras Greeland A/S, 2013.

(Citado nas páginas 155 e 168)

- [95] W. Lu, Y. Zhang, S. Zhang, e H. Xiao. Blind wavelet estimation using a zero-lag of the fourth-order statistics. *Journal of geophysics and engineering*, 4:24–30, 2007.

(Citado na página 159)

- [96] B. Yue, Z. Peng, e Q. Zhang. Seismic wavelet estimation using covariation approach. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 52(12):7495–7503, 2014.

(Citado na página 162)

- [97] K. Hollman, K. Rigby, e M. O'Donnell. Coherence factor of speckle from a multi-row probe. In IEEE, editor, *Ultrasonics Symposium, 1999*, volume 2, páginas 1257–1260. IEEE, 1999.

(Citado na página 225)

- [98] Norman Neidell e Turhan Taner. Semblance and other coherency measures for multichannel data. *Geophysics*, 36(3):482–497, 1971.

(Citado na página 225)

Apêndice

A Informações do *Header*

Desenvolvido em 1973 pela Sociedade dos Geofísicos de Exploração (SEG), o formato SEG-Y para gravação de dados sísmicos é o mais comum. Os dados vem acompanhados de suas informações de aquisição agrupadas em cabeçalhos, ou *headers*.

A Tabela A.1 sumariza algumas dessas informações com sua respectiva abreviatura em ordem de exposição em um cabeçalho de dados sísmico, seguindo padrão adotado pela SEG.

trac1	Número de sequência do traço dentro da linha
tracr	Número de sequência do traço dentro do arquivo
fldr	Número original de gravação de campo
tracf	Número do traço dentro do arquivo original de gravação
ep	Número da fonte pontual de energia
cdp	Número CDP
cdpt	Número do traço dentro do conjunto CDP
trid	Código de identificação do código. 1 = dado sísmico
nva	Número de traços somados verticalmente para formas este traço
nhs	Número de traços empilhados horizontalmente para formas este traço
duse	Uso do dado. 1 = produção; 2 = teste
offset	Distância da fonte ao receptor
gelev	Elevação do receptor. Acima do nível do mar - positivo.
selev	Elevação da superfície na fonte
sdepth	Profundidade da fonte (positivo)
gdel	Elevação de Datum no receptor
sdel	Elevação de Datum na fonte
swdep	Profundidade da água na fonte $\times 10$
gwdep	Profundidade da água no receptor $\times 10$
scale1	Número escalar a ser aplicado em todas as elevações e profundidades
scalco	Número escalar a ser aplicado em todas as coordenadas
scale1	Número escalar a ser aplicado em todas as elevações e profundidades
scalco	Número escalar a ser aplicado em todas as coordenadas

sx	Coordenadas da fonte em x
sy	Coordenadas da fonte em y
gx	Coordenada do receptor em x
gy	Coordenada do receptor em y
counit	Unidade das coordenadas
wevel	Velocidade de desagregação
swevel	Velocidade de subdesagregação
sut	Tempo <i>uphole</i> na fonte
gut	Tempo <i>uphole</i> no receptor
sstat	Correção estática na fonte
gstat	Correção estática no receptor
tstat	Correção estática total aplicada
laga	<i>Lag</i> A
lagb	<i>Lag</i> B
delrt	Atraso no tempo de gravação. Tempo em ms entre o início da energia da fonte e o início da gravação dos dados
muts	Tempo silêncio - início
mute	Tempo silêncio - fim
ns	Número de amostras neste traço
dt	Intervalo de amostragem, em ms, para este traço
gain	Tipo de ganho dos instrumentos de campo. 1 = fixo; 2 = binário; 3 = ponto flutuante
igc	Instrumento de ganho constante
igi	Ganho inicial, em dB
corr	Correlacionado? 1 = não; 2 = sim
sfs	Frequência de varredura no início
sfe	Frequência de varredura no final
slen	Largura da varredura de frequência, em ms
styp	Tipo de varredura: 1 = linear; 2 = parabólica; 3 = exponencial; 4 = outro
stas	Afunilamento da varredura do traço no início, em ms
stae	Afunilamento da varredura do traço no fim, em ms
tatyp	Tipo de afunilamento: 1 = linear; 2 = cosseno; 3 = outro
afilf	Frequência do filtro Aliasing
afils	Inclinação do filtro Aliasing
nofilf	Frequência do filtro Notch
nofils	Inclinação do filtro Notch
stas	Afunilamento da varredura do traço no início, em ms
stae	Afunilamento da varredura do traço no fim, em ms
stas	Afunilamento da varredura do traço no início, em ms
stae	Afunilamento da varredura do traço no fim, em ms
tatyp	Tipo de afunilamento: 1 = linear; 2 = cosseno; 3 = outro
afilf	Frequência do filtro Aliasing
afils	Inclinação do filtro Aliasing
nofilf	Frequência do filtro Notch

Tabela A.1.: Informações de um cabeçalho de dado sísmico

nofils	Inclinação do filtro Notch
lcf	Frequência de corte baixa
hcf	Frequência de corte baixa
lcs	Inclinação de corte alta
hcs	Inclinação de corte alta
year	Ano
day	Dia
hour	Hora
minute	Minuto
sec	Segundo
timbas	Código de tempo: 1 = local; 2 = GM; 3 = outro
trwf	Fator de ponderação de traços
grnors	Número de hidrofone na posição 1 do rolo
grnofr	Número de hidrofone do traço número 1 da gravação original de campo
grnlof	Número do hidrofone do último traço da gravação original de campo
gaps	Tamanho da abertura (número total de hidrofones retirados)
otrav	Ultrapassagem associada com o afunilamento no início ou final: 1 = abaixo; 2 = acima
d1	Intervalo amostral pra dado não-sísmico
f1	Primeira localização amostral pra dado não-sísmico
d2	Intervalo amostral entre traços
f2	Primeira localização amostral para traço
ungpow	Negativo da potência usado para compressão da faixa dinâmica
unscale	Recíproco ao fator de escala para normalização
mark	Marca dos traços selecionados
ntr	Número de traços
unass	Informação opcional

B Fator de coerência entre amplitudes

Como o erro entre refletividades não traz bons resultados quanto a eficiência na detecção das amplitudes das reflexões, buscou-se a aplicação de um fator de coerência que fosse capaz de retornar essa informação.

O fator de coerência (FC) foi introduzido por Hollman et al. [97]. É definido como a razão entre a soma coerente e a soma incoerente dos elementos a serem avaliados. A coerente é a soma direta dos elementos avaliados, podendo se tornar destrutiva ou construtiva, dependendo se as amplitudes possuem sinais opostos ou não. Já a soma incoerente é realizada após os elementos serem levados ao quadrado, ou seja, apenas com amplitudes positivas. Uma aplicação amplamente utilizada do fator de coerência na análise sísmica é o *semblance*, como feito em [98].

Usado, normalmente, para a correção de distorções nos elementos analisados, para este trabalho uma adaptação é realizada no fator de coerência para que seja utilizado como parâmetro de comparação. Desta forma, como a refletividade original, com a qual está se comparando a refletividade obtida através das deconvoluções, é conhecida, é possível aplicar o fator de coerência. Por ser simulada, é conhecido o número de reflexões da refletividade (NR). Com isso, o fator de coerência é ponderado para que traga resultados proporcionais. Uma unidade é subtraída para que o valor obtido traga informações sobre a oposição de sinais da amplitude obtida. Desta forma, tem-se definido o fator de coerência de amplitudes

$$\zeta = \sum^T \left[\frac{(h_{\text{est}}(t) + h(t))^2}{h_{\text{est}}(t)^2 + h(t)^2} - 1 \right] \frac{1}{NR'} \quad (\text{B.1})$$

na qual $h(t)$ é a refletividade original e $h_{\text{est}}(t)$ é a refletividade obtida, com a qual $h(t)$ é comparada. O fator de coerência de amplitudes varia entre -1 e 1. Sendo que valores próximos a 1 trazem resultados muito semelhantes à refletividade original, valores próximos a zero trazem resultados muito discrepantes e valores próximos a -1 trazem resultados muito semelhantes, porém com oposição de sinal.

Visando avaliar o comportamento deste coeficiente na comparação entre as refletividades, uma refletividade foi simulada. Todas as cinco reflexões possuem amplitude unitária, sendo que a quarta delas, possui amplitude negativa, como exposto na Figura B.1.

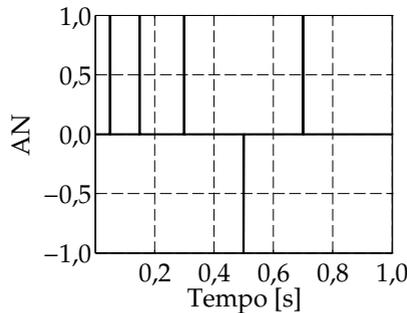


Figura B.1.: Refletividade simulada com amplitudes unitárias.

A refletividade exposta foi comparada, primeiramente, com uma refletividade igual, exposta na Figura B.2 (a). O fator de coerência de amplitudes obtido na comparação foi $\zeta = 1$, o máximo positivo. Já ao comparar com a refletividade oposta, exposta na Figura B.2 (b), o coeficiente obtido foi de $\zeta = -1$, o máximo negativo.

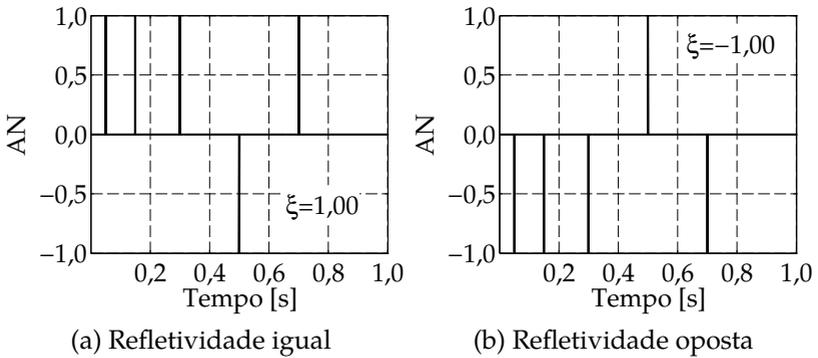


Figura B.2.: Refletividades simuladas para a comparação do fator de coerência de amplitudes.

Para uma análise do particionamento do fator de coerência de amplitudes e da evolução do fator com a alteração da amplitude, foram simuladas refletividades iguais à original (Figura B.1) porém com a amplitude da primeira reflexão variando de -500 a 500. A variação do fator ξ com as amplitudes alteradas é exposta na Figura B.3 (a).

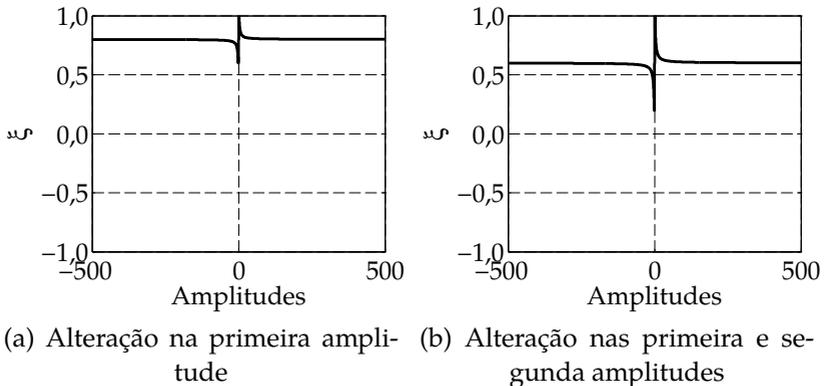


Figura B.3.: Variação do fator de coerência de amplitude com a alteração das reflexões de -500 a 500.

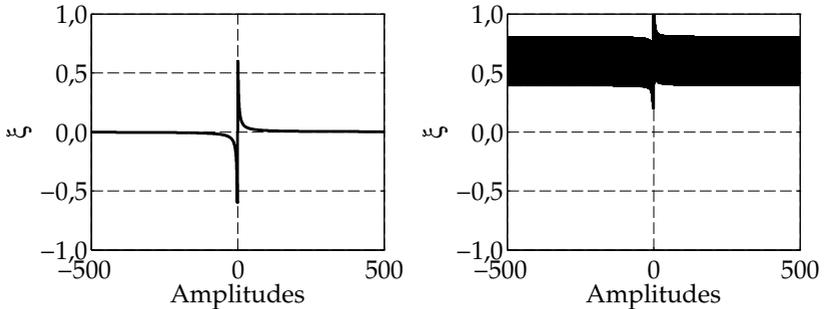
Como o fator de amplitudes pode variar entre -1 e 1 e são cinco reflexões presentes nas refletividades, tem-se que a alteração da amplitude de apenas uma reflexão pode influenciar em 20% do fator, ou seja, 0,4. Desta forma, com a alteração da primeira amplitude, os valores de ζ podem variar entre 0,6 (com total oposição da reflexão) e 1 (com total semelhança da reflexão), como perceptível na Figura B.3 (a). Nota-se, também, que os máximos do fator são obtidos nos valores igual e oposto ao referente à refletividade original e decaem com o afastamento dos valores.

Para analisar o comportamento da alteração de duas reflexões e visualizar o particionamento do fator entre as reflexões, além de variar a amplitude da primeira reflexão de -500 a 500, a segunda também foi alterada da mesma forma. Os resultados, exposto na Figura B.3 (b) são muito semelhantes ao anterior, porém a variação do fator ocorre de 0,2 a 1, devido ao fato de que 40% das reflexões são alterados.

Uma outra avaliação foi realizada para analisar a intreferência da oposição de sinais da amplitude. Desta vez, todas as amplitudes da reflexões, incluindo a negativa, foram variadas de -500 a 500. O gráfico da variação do ζ com as amplitudes é exposto na Figura B.4 (a), na qual percebe-se que o fator varia de -0,6 a 0,6. Isso se dá, porque apesar de todas as amplitudes estarem variando da mesma forma e todas atingirem a amplitude 1 ao mesmo tempo, a quarta reflexão é negativa e está oposta sempre que os valores corretos para as outras reflexões forem obtidos, diminuído a sua cota como totalidade do valor. O mesmo ocorre quando o valor -1 é obtido para todas as reflexões, quando este é o valor correto para a quarta reflexão.

Visando avaliar a composição do fator e o particionamento do fator ζ , a amplitude da primeira reflexão foi alterada de -500 a 500 e a amplitude da segunda reflexão foi alterada aleatoriamente. Como pode-se observar através do gráfico de variação do fator de coerência de amplitude com as amplitudes da primeira reflexão, o fator varia, da mesma forma que na

Figura B.3 (b), de 0,2 a 1, porém, ao invés de convergir para o valor 0,6, possui um leque de valores entre 0,4 a 0,8 que pode atingir, devido à aleatoriedade das amplitudes adicionadas e ao particionamento do fator ζ entre as amplitudes.



(a) Alteração de todas as amplitudes (b) Alteração da primeira e aleatoriedade da segunda

Figura B.4.: Variação do fator de coerência de amplitude com a alteração das reflexões de -500 a 500 ou aleatoriedade.

Com o exposto avalia-se que o fator de coerência entre amplitudes é um bom parâmetro de comparação e traz informações sobre a semelhança de cada uma das amplitudes das reflexões analisadas.

