

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

Gregório Goudel Azevedo

**Implementação e avaliação de algoritmo para o
imageamento de objetos enterrados em ambientes
submersos multi-camadas**

Florianópolis

2016

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

Gregório Goudel Azevedo

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALGORITMO PARA O
IMAGEAMENTO DE OBJETOS ENTERRADOS EM AMBIENTES
SUBMERSOS MULTI-CAMADAS**

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 A. Cordioli

Co-orientador:

Prof. Ph. D. Samuel Pinson

Florianópolis

2016

Azevedo, Gregório Goudel

Implementação e avaliação de algoritmo para o imageamento de objetos enterrados em ambientes submersos multi-camadas / Gregório Goudel Azevedo; orientador, Julio Apolinário Cordioli ; co-orientador, Samuel Pinson. - Florianópolis, SC, 2016. 197 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Acústica submarina. 3. Sonar ativo. 4. Processamento de sinais. I. Cordioli, Julio Apolinário. II. Pinson, Samuel IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

Gregório Goudel Azevedo

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALGORITMO PARA O
IMAGEAMENTO DE OBJETOS ENTERRADOS EM AMBIENTES
SUBMERSOS MULTI-CAMADAS**

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, 23 de setembro de 2016.

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Samuel Pinson, Ph. D
Coorientador

Banca Examinadora:

Julio A. Cordioli, Dr. Eng.
Orientador

Andrey Ricardo da Silva, Ph. D.

Guillaume Barrault, Dr. Eng.

William D'Andrea Fonseca, Dr. Eng.

*Aos meus pais, Antônio e Artiva, que sempre me
incentivam a dar o melhor de mim.*

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo amor e compreensão, mesmo em meus momentos irracionais. Por serem exemplos de pessoas corretas, de bem e determinadas.

Ao meu orientador Prof. Julio Cordioli, agradeço por me acolher no LVA, por me incentivar e orientar desde o período da graduação. Agradeço sua amizade e compreensão ao longo desses mais de 5 anos de convívio.

Ao meu coorientador Samuel Pinson, pela grande ajuda no aprendizado de processamento de sinais em acústica submarina, assim como na implementação do algoritmo de fonte imagem.

Aos meus colegas do LVA, pelos almoços no RU, pelos bolinhos de quarta-feira e pelas conversas no corredor. Em especial, à Marina e ao João Paulo, meus antigos companheiros de sala mas para sempre amigos na vida, agradeço pelas palavras de incentivo, pelas discussões técnicas e pelas ótimas histórias regadas a boas risadas.

Aos meus grandes amigos Caio, Degons, Eric, Filipão, Matheus (Jegue), Jonera, João Vitinho, Pedroca, Léo, Mat, Rafa e Yuri. Meu agradecimento pela parceria e por poder contar com vocês sempre que preciso.

Por fim, agradeço ao PRH-ANP pelo suporte e apoio financeiro.

“Words are pale shadows of forgotten names. As names have power, words have power. Words can light fires in the minds of men. Words can wring tears from the hardest hearts.”

Patrick Rothfuss

Resumo

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, a sociedade vem desenvolvendo cada vez mais atividades em áreas submersas, seja na extração de recursos naturais ou na realização de obras de engenharia. Dessa forma, tornou-se importante a caracterização desses ambientes submersos não somente com relação a sua topografia como também à configuração de seu substrato. Neste trabalho será implementado um procedimento de imageamento baseado na migração de Kirchhoff e no método da fonte imagem, que tem como objetivo gerar imagens que auxiliem na interpretação de dados de investigações acústicas em ambientes submersos multicamadas. Sinais medidos por arranjos de hidrofones passam por uma série de processamentos, descritos em detalhes no trabalho, com o objetivo de gerar uma imagem que auxilie a localização de objetos enterrados no substrato de ambientes submersos. Para gerar os dados utilizados como entrada dos algoritmos implementados, ambientes submersos foram modelados com o Método das Diferenças Finitas, sendo as diversas camadas de sedimento modeladas como fluidos equivalentes. O algoritmo implementado foi então testado para diferentes dados de entrada, obtidos com a variação de diversos parâmetros construtivos do arranjo de hidrofones.

Palavras-chave: acústica submarina, método da fonte imagem, localização de espalhadores, migração de Kirchhoff.

Abstract

With the technological advances of the last decades, society have been developing several activities in underwater environments, from the extraction of natural resources to the construction of engineering projects. Therefore, it has become important to characterize underwater environments, not only on what concerns it's bathymetry but also the configuration of it's substrate. In the following work, an imaging process based on the image source method and the Kirchhoff migration will be implemented. This process aims to facilitate the interpretation of seismic data. Signals measured by an array of hydrophones go through a processing procedure, described in detail in the document, in order to generate a pressure map that helps locating objects buried in the substrate of underwater environments. To test the implemented algorithm, simulated data was generated using the freely distributed Finite Difference software SimSonic©. The substrate was modeled as equivalent fluid. The implemented algorithm was then tested by a parametric analysis, where several measurement's and array's parameters were simulated.

Keywords: underwater acoustics, image source method, scatterer detection, Kirchhoff migration.

Sumário

1	Introdução	39
1.1	Objetivos	42
1.1.1	Objetivos específicos	42
1.2	Organização do trabalho.....	43
2	Revisão Bibliográfica	45
2.1	Ambiente submerso	45
2.1.1	A coluna d'água.....	46
2.1.2	A superfície do mar	47
2.1.3	A superfície de fundo	47
2.1.4	A subsuperfície de fundo.....	48
2.2	Sonar na detecção de objetos enterrados	50
2.3	Métodos numéricos.....	51
2.3.1	Raios acústicos	52
2.3.2	Equações parabólicas.....	52
2.3.3	Integração de número de onda	53
2.3.4	Modos normais	54
2.3.5	Método de Elementos Finitos	54
2.3.6	Método das Diferenças Finitas.....	55
2.4	Implementação numérica.....	56
2.4.1	Problema direto de propagação	56
2.4.2	Equação da onda.....	57
2.4.3	A forma integral da Equação da onda	59
2.5	Implementação do Método das diferenças finitas	61

2.6	Implementação do software SimSonic2D	62
3	Simulações numéricas	67
3.1	Problema direto de propagação	67
3.1.1	Equação da onda.....	68
3.1.2	A forma integral da Equação da Onda	70
3.2	Método das diferenças finitas	72
3.3	Implementação do software SimSonic2D	73
4	Processamento sísmico clássico	77
4.1	Investigações sísmicas	78
4.1.1	Dados de uma investigação de sísmica	78
4.2	Migração	81
4.2.1	Migração de Kirchhoff	82
4.3	O arranjo linear.....	86
4.3.1	<i>Aliasing</i>	86
4.3.2	Espalhamento e vazamento	89
4.3.3	Relação sinal-ruído e resolução espacial	92
4.3.3.1	Relação sinal-ruído	92
4.3.3.2	Resolução espacial	92
5	Algoritmo de detecção de objetos enterrados	97
5.1	<i>Matched Filtering</i>	99
5.2	Filtragem do sinal direto	103
5.3	Imageamento de Fonte Imagem	107
5.3.1	Método da fonte imagem	107
5.4	Localização da Fonte Imagem.....	112
5.4.1	Fator de coerência	113
5.4.2	Filtro Gaussiano.....	116
5.5	Filtragem das camadas geológicas e imageamento de espalhadores.....	120
5.6	Aplicação do método	124
5.6.1	Modelamento do ambiente de interesse.....	124
5.6.2	Geometria e propriedades dos modelos	125

5.6.3	Sinal de entrada	128
5.6.4	Aplicação do algoritmo implementado	129
5.6.5	Série de simulações	133
5.7	Desafios relacionados à aplicação do método	136
6	Análises paramétricas	141
6.1	Distância entre elementos do arranjo (d)	142
6.2	Abertura do arranjo	151
6.3	Número de hidrofones	153
6.4	Largura de banda do <i>chirp</i>	157
6.5	Distância da fonte ao centro do arranjo	160
6.6	Frequência central do <i>chirp</i> de entrada	163
6.7	Estudos complementares	171
7	Conclusões	179
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	181
	Referências Bibliográficas	183
	Apêndices	201
A	Resultados de imageamento para as diversas configurações avaliadas na análise paramétrica	203

Lista de Figuras

2.1	Subdivisões do ambiente submerso	46
2.2	Esquemática do princípio de Huygens	60
2.3	Diagrama utilizado na derivação da Equação de Helmholtz-Kirchhoff.....	60
2.4	Malha intercalada de Virieux.....	64
3.1	Esquemática do princípio de Huygens	70
3.2	Diagrama utilizado na derivação da Equação de Helmholtz-Kirchhoff.....	71
3.3	Malha intercalada de Virieux.....	75
4.1	Esquema de uma investigação em ambiente marinho	79
4.2	Exemplo de traços obtidos de um experimento de sísmica	80
4.3	Exemplo de agrupamento de traços (CMP).	81
4.4	Construção da imagem pela migração de Kirchhoff.	85
4.5	Exemplo de amostragem no espaço	87
4.6	Influência de <i>aliasing</i> espacial na localização de fontes.....	88
4.7	Efeitos de espalhamento e vazamento devido ao filtro espacial.....	90
4.8	Efeitos de espalhamento e vazamento devido ao filtro espacial no imageamento.....	91
4.9	Esquema para compreensão do conceito de resolução radial.....	93

4.10	Abertura aparente do arranjo.	95
5.1	Fluxograma do algoritmo de detecção.	98
5.2	Resultado da aplicação do <i>matched filter</i>	103
5.3	Sinal medido e sua envoltória obtida a partir do sinal analítico	105
5.4	Envoltória do sinal simulado, apresentada em dB ...	106
5.5	Sinal com pulso direto removido	106
5.6	Esquema de representação do método de fonte imagem	108
5.7	Mapa de pressões gerado pelo imageamento das fontes imagem	112
5.8	Imageamento de fonte imagem.	115
5.9	Resultado da aplicação do fator de coerência.	116
5.10	Mapa de fontes imagem restrito pelo fator de coerência.	117
5.11	Resultado da aplicação do filtro gaussiano para diferentes valores de σ	119
5.12	Detalhe da aplicação da máscara de busca após o filtro gaussiano	120
5.13	Imageamento para um meio com uma interface e um espalhador na posição especular	122
5.14	Detalhe do imageamento do sinal filtrado.	123
5.15	Esquema do experimento numérico.	126
5.16	Exemplo de sinal de entrada.	129
5.17	Sinal medido por um hidrofone.	130
5.18	<i>Matched filter</i> do sinal medido por um hidrofone.	131
5.19	Sismograma configuração 4#	131
5.20	Imageamento configuração 4#	132
5.21	Imageamento de espalhadores da configuração 4# ..	133
5.22	Imageamento da combinação de medições.	135
5.23	Fonte sonora LL-1424HP da Lubell Labs	136
5.24	Cofecção de um arranjo de hidrofones.	137
5.25	Espalhamento devido à rugosidade da interface.	139

5.26	Múltiplas reflexões especulares devido ao relevo	139
6.1	Imageamento de espalhadores da configuração 4# ..	144
6.2	Imageamento de espalhadores da configuração 5# ..	145
6.3	Imageamento de espalhadores da configuração 6# ..	146
6.4	Imageamento configuração 25#	148
6.5	Imageamento de espalhadores das configurações 22# e 23#.....	149
6.6	Imageamento de espalhadores das configurações 24# e 25#	150
6.7	Imageamento de espalhadores das configurações 15#, 16# e 17#	152
6.8	Imageamento de espalhadores das configurações 51#, 52# e 53#.....	155
6.9	Imageamento de espalhadores das configurações 51#, 52#, e 53# com ruído.....	156
6.10	Imageamento de espalhadores das configurações 63#, 64#, 65# e 66#	159
6.11	Imageamento de espalhadores das configurações 78#, 79# e 80# com ruído.....	162
6.12	Imageamento para as frequências centrais f_c de 1000 Hz.....	164
6.13	Imageamento para as frequências centrais f_c de 2500 Hz.....	165
6.14	Imageamento para quatro frequências centrais f_c de 5000 Hz.	166
6.15	Imageamento para quatro frequências centrais f_c de 7500 Hz.	167
6.16	Desalinhamento do <i>matched filtering</i>	169
6.17	Imageamento para a configuração 46# para uma maior discretização	170
6.18	Primeira configuração complementar	172
6.19	Segunda configuração complementar	174
6.20	Terceira configuração complementar	176

A.1	Imageamento de espalhadores da configuração 1#...	203
A.2	Imageamento de espalhadores da configuração 2#...	204
A.3	Imageamento de espalhadores da configuração 4#...	204
A.4	Imageamento de espalhadores da configuração 5#...	204
A.5	Imageamento de espalhadores da configuração 6#...	205
A.6	Imageamento de espalhadores da configuração 8#...	205
A.7	Imageamento de espalhadores da configuração 9#...	205
A.8	Imageamento de espalhadores da configuração 10#.	206
A.9	Imageamento de espalhadores da configuração 11#.	206
A.10	Imageamento de espalhadores da configuração 13#.	206
A.11	Imageamento de espalhadores da configuração 14#.	207
A.12	Imageamento de espalhadores da configuração 15#.	207
A.13	Imageamento de espalhadores da configuração 16#.	207
A.14	Imageamento de espalhadores da configuração 18#.	208
A.15	Imageamento de espalhadores da configuração 19#.	208
A.16	Imageamento de espalhadores da configuração 20#.	208
A.17	Imageamento de espalhadores da configuração 21#.	209
A.18	Imageamento de espalhadores da configuração 22#.	210
A.19	Imageamento de espalhadores da configuração 23#.	210
A.20	Imageamento de espalhadores da configuração 24#.	210
A.21	Imageamento de espalhadores da configuração 25#.	211
A.22	Imageamento de espalhadores da configuração 26#.	211
A.23	Imageamento de espalhadores da configuração 27#.	211
A.24	Imageamento de espalhadores da configuração 28#.	212
A.25	Imageamento de espalhadores da configuração 29#.	212
A.26	Imageamento de espalhadores da configuração 30#.	212
A.27	Imageamento de espalhadores da configuração 31#.	213
A.28	Imageamento de espalhadores da configuração 32#.	213
A.29	Imageamento de espalhadores da configuração 33#.	213
A.30	Imageamento de espalhadores da configuração 34#.	214
A.31	Imageamento de espalhadores da configuração 35#.	214
A.32	Imageamento de espalhadores da configuração 36#.	214
A.33	Imageamento de espalhadores da configuração 37#.	215
A.34	Imageamento de espalhadores da configuração 38#.	215

A.35	Imageamento de espalhadores da configuração 39#.	215
A.36	Imageamento de espalhadores da configuração 40#.	216
A.37	Imageamento de espalhadores da configuração 41#.	216
A.38	Imageamento de espalhadores da configuração 42#.	216
A.39	Imageamento de espalhadores da configuração 43#.	217
A.40	Imageamento de espalhadores da configuração 44#.	217
A.41	Imageamento de espalhadores da configuração 45#.	217
A.42	Imageamento de espalhadores da configuração 46#.	218
A.43	Imageamento de espalhadores da configuração 47#.	218
A.44	Imageamento de espalhadores da configuração 48#.	218
A.45	Imageamento de espalhadores da configuração 49#.	219
A.46	Imageamento de espalhadores da configuração 50#.	219
A.47	Imageamento de espalhadores da configuração 51#.	219
A.48	Imageamento de espalhadores da configuração 52#.	220
A.49	Imageamento de espalhadores da configuração 53#.	220
A.50	Imageamento de espalhadores da configuração 54#.	220
A.51	Imageamento de espalhadores da configuração 55#.	221
A.52	Imageamento de espalhadores da configuração 56#.	221
A.53	Imageamento de espalhadores da configuração 57#.	221
A.54	Imageamento de espalhadores da configuração 58#.	222
A.55	Imageamento de espalhadores da configuração 59#.	222
A.56	Imageamento de espalhadores da configuração 60#.	222
A.57	Imageamento de espalhadores da configuração 61#.	223
A.58	Imageamento de espalhadores da configuração 62#.	223
A.59	Imageamento de espalhadores da configuração 63#.	223
A.60	Imageamento de espalhadores da configuração 64#.	224
A.61	Imageamento de espalhadores da configuração 65#.	224
A.62	Imageamento de espalhadores da configuração 66#.	224
A.63	Imageamento de espalhadores da configuração 67#.	225
A.64	Imageamento de espalhadores da configuração 68#.	225
A.65	Imageamento de espalhadores da configuração 69#.	225
A.66	Imageamento de espalhadores da configuração 70#.	226
A.67	Imageamento de espalhadores da configuração 71#.	226
A.68	Imageamento de espalhadores da configuração 72#.	226

- A.69 Imageamento de espalhadores da configuração 73#. 227
- A.70 Imageamento de espalhadores da configuração 74#. 227
- A.71 Imageamento de espalhadores da configuração 75#. 227
- A.72 Imageamento de espalhadores da configuração 76#. 228
- A.73 Imageamento de espalhadores da configuração 77#. 228
- A.74 Imageamento de espalhadores da configuração 78#. 228
- A.75 Imageamento de espalhadores da configuração 79#. 229
- A.76 Imageamento de espalhadores da configuração 80#. 229
- A.77 Imageamento de espalhadores da configuração 81#. 229
- A.78 Imageamento de espalhadores da configuração 82#. 230
- A.79 Imageamento de espalhadores da configuração 83#. 230
- A.80 Imageamento de espalhadores da configuração 84#. 230
- A.81 Imageamento de espalhadores da configuração 85#. 231
- A.82 Imageamento de espalhadores da configuração 86#. 231

Lista de Tabelas

5.1	Configuração das camadas geológicas do sistema simulado.	128
5.2	Propriedades dos espalhadores.	128
6.1	Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância (d) entre elementos no resultado de imageamento, para um número fixo de elementos. ...	143
6.2	Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância entre elementos (d) no resultado de imageamento, para um tamanho fixo da abertura do arranjo.	147
6.3	Parâmetros das simulações para estudo da influência do tamanho da abertura do arranjo no resultado de imageamento, para uma distância fixa entre elementos do arranjo.	151
6.4	Parâmetros das simulações para estudo da influência do número de elementos no resultado de imageamento.	154
6.5	Parâmetros das simulações para estudo da influência da largura de banda do <i>chirp</i> de entrada no resultado de imageamento.	157
6.6	Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância da fonte ao centro do arranjo (L_{gc}) no resultado de imageamento.	160

Nomenclatura

Símbolos Gerais

c	Velocidade do som no meio [m/s], Eq. (2.0), pág. 57.
c	Velocidade do som no meio [m/s], Eq. (3.0), pág. 68.
c_0	Velocidade do som na coluna d'água, pág. 125.
c_i	Velocidade do som na camada i , pág. 125.
c_{ij}	Componentes do tensor de rigidez, Eq. (2.17), pág. 63.
c_{ij}	Componentes do tensor de rigidez, Eq. (3.17), pág. 74.
c_i	Velocidade do som na camada i [m/s], pág. 127.
d	Espaçamento entre pontos amostrais/entre elementos de um arranjo [m], pág. 87.
f	Uma função qualquer em uma dimensão, Eq. (2.11), pág. 61.
f	Uma função qualquer em uma dimensão, Eq. (3.11), pág. 72.
G	Transformada de Fourier do sinal medido [Pa], Eq. (4.10), pág. 94.

g	Sinal medido , Eq. (4.10), pág. 94.
$g(x, t)$	Sinal contínuo em x , pág. 87.
$g_s(nd, t)$	Sinal amostrado em x , pág. 87.
g_n	Sinal registrado pelo hidrofone n , Eq. (5.10), pág. 104.
$g_n^{\text{dir}}(t)$	Sinal do hidrofone n com o caminho direto removido, Eq. (5.12), pág. 105.
g_n^H	Sinal analítico registrado pelo hidrofone n , Eq. (5.10), pág. 104.
g_{matched}	Sinal filtrado por <i>matched filtering</i> , Eq. (4.10), pág. 94.
G_{g_s}	Espectro do sinal amostrado g_s no domínio de número de onda, Eq. (4.5), pág. 88.
G_g	Espectro do sinal contínuo g no domínio de número de onda, Eq. (4.6), pág. 88.
g_w	Sinal janelado no espaço, Eq. (4.7), pág. 89.
G_w	Espectro no domínio de número de onda do sinal janelado g_w , Eq. (4.7), pág. 89.
\hat{G}	Amplitude instantânea do sinal analítico [Pa], Eq. (5.11), pág. 104.
\mathcal{G}	Função de Green, Eq. (2.10), pág. 59.
\mathcal{G}	Função de Green, Eq. (3.10), pág. 71.
h	Distância do sistema de medição à interface água-sedimento [m], pág. 125.

h	Distância entre nós no espaço discretizado, Eq. (2.11), pág. 61.
h	Distância entre nós no espaço discretizado, Eq. (3.11), pág. 72.
i	Símbolo genérico para índices, Eq. (2.13), pág. 62.
i	Símbolo genérico para índices, Eq. (3.13), pág. 73.
I_{cf}	Fator de coerência da imagem, Eq. (5.21), pág. 114.
I_{im}	Matriz do imageamento de fontes imagem, Eq. (5.20), pág. 111.
j	Símbolo genérico para índices, Eq. (2.13), pág. 62.
j	Símbolo genérico para índices, Eq. (3.13), pág. 73.
k	Índice discreto da variável temporal t , Eq. (2.13), pág. 62.
k	Índice discreto da variável temporal t , Eq. (3.13), pág. 73.
k	Número de onda [$1/m$], Eq. (4.5), pág. 88.
k_{cf}	Constante que limita a máscara de restrição do espaço de busca por fontes imagem, Eq. (5.25), pág. 116.
κ	Variável de integração, Eq. (4.7), pág. 89.
L_x	Comprimento, na direção x , do domínio simulado, pág. 125.
L_y	Comprimento, na direção y , do domínio simulado, pág. 125.

L	Comprimento do arranjo de hidrofones [m], pág. 125.
L_{gc}	Distância entre a fonte e o centro do arranjo [m], pág. 160.
l_i	Espessura da camada i [m], pág. 125.
$M_{ideal}(t)$	Função de transferência do <i>Matched filter</i> projetado, Eq. (5.2), pág. 100.
$m_{ideal}(t)$	<i>Matched filter</i> ideal projetado, Eq. (5.1), pág. 99.
N	Número de hidrofones que compõe o arranjo, pág. 78.
n	Índice de posição da amostra espacial, pág. 87.
\mathbf{n}	Vetor unitário normal à superfície S_0 , Eq. (2.10), pág. 59.
\mathbf{n}	Vetor unitário normal à superfície S_0 , Eq. (3.10), pág. 71.
$n(t)$	Ruído genérico, Eq. (5.1), pág. 99.
P	Pressão no gás [Pa], Eq. (2.3), pág. 58.
P	Pressão no gás [Pa], Eq. (3.3), pág. 69.
p	Pressão sonora [Pa], Eq. (2.0), pág. 57.
p	Pressão sonora [Pa], Eq. (3.0), pág. 68.
$P_{ruído}$	Potencia do ruído, Eq. (4.8), pág. 92.
P_{sinal}	Potencia do sinal sem ruído, Eq. (4.8), pág. 92.
p	Número inteiro representando a periodicidade de G_{ks} , Eq. (4.6), pág. 88.
R	Distância do ponto de interesse à superfície conhecida S_0 , pág. 59.

R	Distância do ponto de interesse à superfície conhecida S_0 , pág. 71.
R_d	Resolução espacial na direção de propagação, Eq. (4.9), pág. 93.
R_0	Distância do ponto de interesse à fonte, pág. 59.
R_0	Distância do ponto de interesse à fonte, pág. 71.
R_{\perp}	Resolução espacial na direção transversal, Eq. (4.13), pág. 95.
\mathbf{r}_0	Vetor das posições $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$ pertencentes à superfície S_0 , Eq. (2.10), pág. 59.
\mathbf{r}_0	Vetor das posições $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$ pertencentes à superfície S_0 , Eq. (3.10), pág. 71.
\mathbf{r}	Vetor posição $\mathbf{r}(x, y, z)$, Eq. (2.10), pág. 59.
\mathbf{r}	Vetor posição $\mathbf{r}(x, y, z)$, Eq. (3.10), pág. 71.
R_i	Distância do ponto de interesse r ao hidrofone i , Eq. (4.4), pág. 84.
s	Sinal conhecido, Eq. (5.1), pág. 99.
S_0	Superfície sobre a qual se conhecem os valores de p , pág. 59.
S_0	Superfície sobre a qual se conhecem os valores de p , pág. 71.
s_{in}	Sinal de entrada, Eq. (4.10), pág. 94.
S_{in}	Transformada de Fourier do sinal de entrada s_{in} [Pa], Eq. (4.10), pág. 94.

- T Componente do campo de tensões cisalhantes, Eq. (2.19), pág. 63.
- T Componente do campo de tensões cisalhantes, Eq. (3.19), pág. 74.
- t Tempo [s], Eq. (2.0), pág. 57.
- t Tempo [s], Eq. (3.0), pág. 68.
- T_p Tamanho do pulso gerado em [s], Eq. (4.9), pág. 93.
- t_1 Deslocamento temporal qualquer, Eq. (5.1), pág. 99.
- t_n Tempo de atraso para o hidrofone n , Eq. (5.20), pág. 111.
- t_0 Variável de integração no tempo, Eq. (2.10), pág. 59.
- t_0 Variável de integração no tempo, Eq. (3.10), pág. 71.
- ‰ Salinidade [‰], Eq. (5.33), pág. 127.
- °C Temperatura [°C], Eq. (5.33), pág. 127.
- D Profundidade [m], Eq. (5.33), pág. 127.
- U Componente na direção x do campo de velocidade, Eq. (2.15), pág. 63.
- U Componente na direção x do campo de velocidade, Eq. (3.15), pág. 74.
- u Velocidade de partícula [m/s], Eq. (2.0), pág. 57.
- u Velocidade de partícula [m/s], Eq. (3.0), pág. 68.
- V Componente na direção y do campo de velocidade, Eq. (2.16), pág. 63.

- V Componente na direção y do campo de velocidade, Eq. (3.16), pág. 74.
- V Volume [m^3], Eq. (2.3), pág. 58.
- V Volume [m^3], Eq. (3.3), pág. 69.
- v_y Velocidade de partícula na direção y [m/s], pág. 63.
- v_y Velocidade de partícula na direção y [m/s], pág. 74.
- W Espectro no domínio de número de onda da janela espacial w , Eq. (4.7), pág. 89.
- w Janela espacial, Eq. (4.7), pág. 89.
- W_{cf} A máscara de restrição do espaço de busca por fontes imagem, Eq. (5.25), pág. 116.
- X Componente na direção x do campo de tensões, Eq. (2.17), pág. 63.
- X Componente na direção x do campo de tensões, Eq. (3.17), pág. 74.
- Y Componente na direção y do campo de tensões, Eq. (2.18), pág. 63.
- Y Componente na direção y do campo de tensões, Eq. (3.18), pág. 74.
- $Y(f)$ Transformada de Fourier do sinal genérico $y(t)$, Eq. (5.2), pág. 100.
- $y(t)$ Sinal genérico, Eq. (5.1), pág. 99.
- F Termo fonte da equação da onda heterogênea [Pa/s^2], Eq. (2.9), pág. 58.

F Termo fonte da equação da onda heterogênea [Pa/s^2], Eq. (3.9), pág. 70.

Símbolos Gregos

- α Constante de ponderação, Eq. (5.1), pág. 99.
- β Diâmetro dos espalhadores [m], pág. 128.
- Δ_t Atraso entre sinal medido e sinal de entrada para o cálculo da correlação cruzada, Eq. (4.10), pág. 94.
- ϵ Um pequeno valor responsável por evitar a divisão por zero. , Eq. (5.23), pág. 114.
- γ Razão de calor específico, Eq. (2.3), pág. 58.
- γ Razão de calor específico, Eq. (3.3), pág. 69.
- λ_{\max} Maior comprimento de onda das frequências analisadas, Eq. (4.13), pág. 95.
- λ_{\min} Menor comprimento de onda das frequências analisadas, Eq. (4.14), pág. 95.
- ϕ Fase instantânea instantânea do sinal analítico [rad], Eq. (5.11), pág. 104.
- Π Janela retangular da largura do pulso, Eq. (5.12), pág. 105.
- ρ Densidade [kg/m^3], Eq. (2.0), pág. 57.
- ρ Densidade [kg/m^3], Eq. (3.0), pág. 68.
- τ_p Duração do pulso comprimido [s], Eq. (5.13), pág. 106.

τ_{ij}	Componentes de tensão segundo notação de Voigt, pág. 63.
$\bar{\tau}_{ij}$	Componentes de tensão segundo notação de Voigt, pág. 74.
θ_i	Ângulo de incidência, pág. 108.

Operadores Matemáticos e Convenções ---

δ	Função delta de Dirac, Eq. (4.2), pág. 83.
$\partial(\cdot)$	Operador diferencial parcial, Eq. (2.0), pág. 57.
$\bar{\partial}(\cdot)$	Operador diferencial parcial, Eq. (3.0), pág. 68.
$\vec{\nabla}()$	Operador gradiente, pág. 69.
$\vec{\nabla} \cdot ()$	Operador divergente, pág. 69.
$\nabla(\cdot)$	Operador gradiente, Eq. (2.0), pág. 57.
$\bar{\nabla}(\cdot)$	Operador gradiente, Eq. (3.0), pág. 68.
$\nabla \cdot (\cdot)$	Operador divergente, Eq. (2.1), pág. 57.
$\bar{\nabla} \cdot (\cdot)$	Operador divergente, Eq. (3.1), pág. 68.
$\nabla^2 \cdot ()$	Operador Laplaciano, pág. 58.
$\bar{\nabla}^2 \cdot ()$	Operador Laplaciano, pág. 69.
$(\cdot)'$	Operador de derivada primeira, Eq. (2.11), pág. 61.
$(\cdot)'$	Operador de derivada primeira, Eq. (3.11), pág. 72.
$(\cdot)''$	Operador de derivada segunda, Eq. (2.11), pág. 61.
$(\cdot)''$	Operador de derivada segunda, Eq. (3.11), pág. 72.

$E[\cdot]$	Operador de valor esperado, Eq. (4.10), pág. 94.
$\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$	Transformada inversa de Fourier, Eq. (4.10), pág. 94.
\mathcal{H}	Operador da transformada de Hilbert, Eq. (5.10), pág. 104.
i	Unidade imaginária
$o(\cdot)$	Notação o-pequeno do erro de aproximação da expressão às diferenças, Eq. (2.11), pág. 61.
$o(\cdot)$	Notação o-pequeno do erro de aproximação da expressão às diferenças, Eq. (3.11), pág. 72.

Acrônimos e Abreviaturas

BW	Acrônimo para largura de banda, derivada do termo em inglês <i>bandwidth</i> , pág. 94.
2D	Abreviatura para o termo duas dimensões, pág. 43.
CMP	Acrônimo proveniente do inglês para o termo <i>Common Midpoint</i> , em português ponto médio comum, pág. 80.
FD	Acrônimo do termo em inglês <i>Finite Difference</i> , pág. 56.
FD	Acrônimo do termo em inglês <i>Finite Difference</i> , pág. 67.
FDTD	Acrônimo do termo em inglês <i>Finite Difference Time Domain</i> , pág. 62.
FDTD	Do inglês <i>Finite Difference Time-Domain</i> , ou método de diferenças finitas no domínio do tempo, em português, pág. 43.
FEM	Acrônimo do nome em inglês <i>Finite Element Method.</i> , pág. 55.

- NMO Acrônimo proveniente do inglês para o termo *normal moveout*, em português sobretempo normal, pág. 79.
- SNR Relação sinal-ruído, Eq. (4.8), pág. 92.
- SOFAR Do inglês *sound fixing and ranging channel*, pág. 47.
- sonar Acrônimo proveniente do inglês para o termo *Sound Navigation and Ranging*, navegação e determinação de distância pelo som, em português, pág. 41.

1 Introdução

A sociedade moderna vem desenvolvendo cada vez mais atividades em áreas submersas como rios, reservatórios, lagos, áreas costeiras e da plataforma continental como um todo, seja com atividades voltadas para a extração de recursos naturais – petróleo, minerais, recursos pesqueiros – como na realização de obras de engenharia – instalação de dutos e cabos, construção de pontes, construção de portos, etc. Dessa forma, torna-se importante a caracterização desses ambientes submersos não somente com relação a sua batimetria (topologia do fundo) como também à composição e configuração do substrato, seja para encontrar novas jazidas de minérios ou poços de petróleo, ou para determinar as dimensões e materiais necessários para garantir a segurança de obras civis.

A investigação de áreas submersas, pode ser realizada de duas formas distintas, a forma direta e a indireta [1]. A forma direta, com respeito à caracterização da superfície de fundo e das suas camadas, engloba desde sondagens, amostragens, à filmagens e fotografias. A forma indireta engloba todas as técnicas que permitam a caracterização à distância da superfície de fundo e suas camadas, sendo a maioria dessas técnicas enquadradas como técnicas geofísicas, que se utilizam de fenômenos físicos observados na Terra e em sua atmosfera para extrair informações do ambiente.

Dentre os métodos geofísicos pode-se citar os mais importantes: (1) o método gravimétrico, que se utiliza de medições de variação do campo gravitacional local; (2) o método magnético¹, que mede

¹ Também chamado de magnetometria.

o campo magnético local registrando anomalias causadas por diferentes fontes, tais quais falhas geológicas, intrusões ígneas, plácidos minerais; (3) os métodos elétricos, que possuem um larga gama de técnicas, trantando da medição de diferentes grandezas, como potenciais elétricos, correntes e campos eletro-magnéticos, com anomalias sendo detectadas devido a grande variação da condutividade elétrica para diferentes tipos de substratos e, por fim, (4) os métodos sísmicos, que constituem as técnicas de investigação geofísica de maior importância em termos de gastos e de profissionais envolvidos. Os métodos sísmicos utilizam-se de medições das ondas elásticas para investigar o ambiente de interesse [2]. A grande vantagem dos métodos de investigação geofísica está na possibilidade de realizar um processo remoto de caracterização desses ambientes, sem (ou pouco) alterá-los. Uma característica em comum destes métodos, mesmo utilizando de diferentes variáveis físicas para tirar conclusões acerca do meio investigado, é a capacidade de detectar descontinuidades presentes no ambiente de interesse através da medição de variáveis físicas [3].

Devido às propriedades físicas da água, a utilização de algumas técnicas geofísicas torna-se limitada, principalmente no que se refere às técnicas eletromagnéticas, pois a atenuação das ondas dessa natureza é alta quando utilizadas frequências necessárias para atingir resoluções desejadas no ambiente aquático. O mesmo não é observado para as ondas mecânicas, de forma que a acústica – muitas vezes chamada de sísmica quando aplicada à penetração em sedimentos – configura a forma mais eficiente de se realizar sensoriamento remoto [4].

A acústica como ferramenta para a investigação de ambientes submersos já é estudada a mais de um século. Com a naufrágio do Titanic em 1912, as primeiras patentes de sistemas de medição de alcance relativo foram desenvolvidas [5], mas o grande propulsor para o desenvolvimento de técnicas acústicas para localização em ambiente submerso foram a Primeira e a Segunda Guerra Mundiais, com esforços em pesquisa voltados para detecção de submarinos e minas submersas. Essa tecnologia desenvolvida foi

chamada sonar², termo inicialmente emprestado de seu análogo eletromagnético, o radar, por ambos serem tecnologias similares que tem como princípio enviar e receber pulsos, extraindo informações de acordo com os ecos percebidos. Subseqüentes avanços tecnológicos, principalmente no que diz respeito a aquisição e tratamento de sinais digitais, os sonares transcenderam seu uso militar e passaram a ser utilizados para investigar e mapear remotamente ambientes submersos.

A utilização de investigações acústicas na localização de objetos, enterrados no substrato ou dispostos sobre a subsuperfície, é de especial interesse pois, segundo determinações especificadas por normas [7], projetos de instalação de dutos no ambiente marinho devem levar em consideração os perigos aos quais esses dutos estão exposto, sendo necessário em muitos casos o enterramento destes para sua proteção e estabilização. Existe uma recomendação seguida pela Petrobrás³ que exige que todos os dutos que chegam à praia devem ser enterrados desde a areia até o limite definido por projeto, que no mínimo compreende toda a zona de arrebentação. Essa recomendação é seguida de forma a reduzir a exposição do duto, não só ao desgaste devido a alta atividade hidrodinâmica nessa área, como também como forma de evitar o possível choque de embarcações. Desta forma, é importante realizar o controle periódico da condição desses dutos.

Atualmente – além da investigação manual/visual por mergulhadores – a magnetometria e o método geo-elétrico são as principais técnicas utilizadas para realizar a localização de dutos enterrados. O grande problema da aplicação desses métodos, além do alto custo para sua realização, é o fato de requisitarem um processo de inversão de um modelo físico a partir dos dados medidos [1]. Esse processo normalmente envolve um problema de otimização

² Um acrônimo proveniente do inglês para o termo *Sound Navigation and Ranging*, que pode ser traduzido por "navegação e determinação de distância pelo som"[6].

³ Empresa brasileira que atua no segmento de energia, prioritariamente nas áreas de exploração, produção, refino, comercialização e transporte de petróleo, gás natural e seus derivados.

computacionalmente custoso, o que impossibilita a avaliação em tempo real dos dados medidos.

Os trabalhos desenvolvidos por Pinson [8–10] utilizam investigações acústicas, aplicando um algoritmo baseado no método da fonte imagem como uma ferramenta para a realização do imageamento da superfície de fundo de ambientes submersos. O método, conforme aplicado nos trabalhos citados, permite a obtenção da espessura das diferentes camadas geológicas assim como as velocidades de propagação da onda acústica nestas camadas. Esta caracterização envolve um baixo custo computacional, tornando esta técnica uma potencial ferramenta para auxiliar na interpretação em tempo real de medições acústicas da subsuperfície.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a implementação de um método para a localização de heterogeneidades volumétricas no substrato abaixo da superfície de fundo de áreas submersas. Um estudo inicial indica o Método da fonte imagem como uma ferramenta com grande potencial para a realização dessa caracterização. Serão desenvolvidas, então, atividades no sentido de implementar e aprimorar essa ferramenta.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Desenvolvimento de modelo em diferenças finitas utilizando o software SimSonic2D© para a obtenção de dados de entrada para o algoritmo de caracterização da superfície de fundo;
- Implementação do algoritmo de imageamento e localização de fontes imagem;
- Implementação do algoritmo de filtragem das interfaces geológicas;

- Implementação do algoritmo de imageamento de espalhadores;
- Validação numérica do algoritmo de localização de dutos enterrados no substrato de áreas submersas;
- Estudo da influência da configuração do arranjo de medição na localização de objetos enterrados;
- Estudo da influência das características da fonte sonora na localização de objetos enterrados.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos. Os primeiros quatro capítulos fornecem uma fundamentação teórica para melhor entendimento do trabalho desenvolvido e os três capítulos seguintes desenvolvem o método proposto, apresentando os resultados e conclusões obtidos. Dessa forma, os capítulos são organizados:

Capítulo 1: Introduz os métodos acústicos como ferramentas para a investigação de ambientes submersos. Apresenta as motivações e objetivos da pesquisa;

Capítulo 2: Breve capítulo de revisão sobre a investigação de ambientes submersos através de métodos acústicos, assim como uma revisão dos métodos numéricos utilizados para modelar esses ambientes. Definem-se conceitos importantes de acústica, seguido da breve descrição do Método de diferenças finitas no domínio do tempo⁴, principalmente em relação às particularidades do software, o SimSonic2D©;

Capítulo 3: Descreve uma investigação sísmica e os dados que ela produz, introduzindo formas de processar estes dados, com ênfase no imageamento por meio da migração de Kirchhoff;

⁴Do inglês *Finite Difference Time-Domain* (FDTD).

Capítulo 4: Descreve a implementação do algoritmo proposto para a localização de espalhadores dispostos na subsuperfície;

Capítulo 5: Testa o algoritmo propostos para diversas configurações de medição, obtendo um conhecimento empírico do impacto dos parâmetros construtivos do sistema de medição com sua eficiência na localização de espalhadores enterrados;

Capítulo 6: Apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

A utilização das técnicas sísmicas (ou acústicas¹) na investigação de ambientes submersos, como destacado no Capítulo 1, já é amplamente difundida e estudada. O primeiro sistema ativo desenvolvido para realizar as medições acústicas - primeiro sonar ativo - data de 1918, construído por Boyle [11]. Atualmente, o desenvolvimento nas áreas de modelagem de arranjos, técnicas de processamento de sinais e materiais, permite que os sistemas de sonares sejam altamente eficientes e com alta resolução.

Esses avanços tecnológicos, por sua vez, permitem o aumento do nível de detalhamento obtido com os estudos em ambientes submersos. As próximas seções buscam ilustrar a importância dos métodos acústicos para investigação de ambientes submersos, em sua totalidade, por meio de uma revisão dos principais trabalhos publicados na literatura, assim como uma revisão dos principais métodos numéricos utilizados para descrever ambientes submersos.

2.1 Ambiente submerso

Áreas submersas, principalmente se tratando do ambiente oceânico, constituem ambientes complexos, pois apresentam propriedades acústicas que podem variar amplamente não só em função da profundidade como também em função da distância e do tempo [12]. Dessa forma, a propagação acústica em ambientes

¹ O termo acústica está associado a uma onda mecânica propagando em um meio flúido, enquanto que sísmica é usualmente associada à propagação de uma onda mecânica por um meio composto por sedimentos e rochas.

submersos está sujeita a ação de diversos fenômenos físicos que tornam sua compreensão e interpretação não triviais. Na literatura, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de melhor compreender esses fenômenos. As Seções a seguir subdividem o ambiente submerso em 4 regiões: (1) a superfície (interface ar-água), (2) a coluna d'água, (3) a superfície de fundo (interface água-substrato) e (4) a subsuperfície (substrato), destacando alguns dos trabalhos desenvolvidos em cada uma dessas regiões.

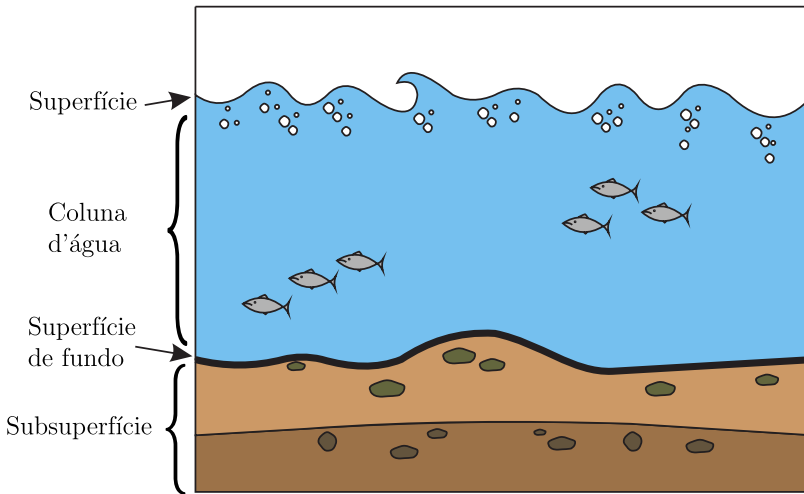


Figura 2.1.: Subdivisão das regiões do ambiente submerso.

2.1.1 A coluna d'água

A coluna d'água é uma região intrinsecamente complexa quando avaliada em relação à propagação acústica, isso é observado principalmente devido a suas características. Parâmetros como a pressão, a temperatura e a salinidade variam naturalmente com a profundidade na coluna d'água e influenciam diretamente a velocidade de propagação das ondas sonoras [13]. O perfil de velocidades resultante da variação desses parâmetros faz com que as ondas acústicas propagem por diversos caminhos, e com que

sejam observados fenômenos tais quais a existência de uma guia de onda natural, como o canal SOFAR², por exemplo. Os efeitos desses caminhos devem ser conhecidos e corrigidos ou podem trazer problemas às medições, como na ecobatmetria em grandes profundidades, por exemplo [14]. Além da existência natural de perfis de velocidade, a coluna d'água está sujeita à ocorrência de fenômenos temporais, como a variação de temperatura ao longo do dia e a ação de correntes marítimas. Alguns trabalhos baseiam-se nos efeitos que a presença de bolhas na coluna d'água têm sobre a propagação acústica [15–19], efeitos como a alteração de fase, a atenuação e o retroespalhamento das ondas sonoras. Outros trabalhos [20–22] destacam que o espalhamento da energia acústica por animais, micro ou macroscópicos, pode ser significativo, devendo por consequência ser estudado e compreendido.

2.1.2 A superfície do mar

Outro fator que adiciona complexidade às medições acústicas no ambiente submerso é a existência da superfície do mar, uma interface na qual a diferença de impedância entre a água e o ar é tão grande que a pressão sonora tende a zero na água [23], conferindo uma condição de reflexão das ondas incidentes. Por si só, essa reflexão na superfície introduz novos caminhos de propagação, efeito chamado de Múltiplas de superfície, que adiciona pulsos indesejados ao sinal medido em alguns sistemas sísmicos, podendo introduzir erros e dificultando a interpretação dos dados [24]. Outro efeito também muito estudado [25–28] é o espalhamento do campo acústico pela superfície, devido a sua rugosidade e da presença de bolhas.

2.1.3 A superfície de fundo

Outra região que compõe o ambiente submerso consiste da interface da água com o substrato, a chamada superfície de

²Região da coluna d'água na qual, devido a forma típica do perfil de velocidade do som, raios acústicos ficam presos, como em um guia de ondas.

fundo. Os efeitos dessa interface tornam-se mais relevantes quando são realizados estudos em águas rasas. Jackson e Richardson [29] definem que as águas rasas caracterizam-se por ser um dos ambientes mais energéticos devido à maior ação dos fenômenos hidrodinâmicos, que podem alterar as características da interface por meio da formação de ondulações, valas e montes. Essas mudanças alteram significativamente as propriedades acústicas do fundo, acarretando em grande variabilidade dos resultados medidos [23]. Desta forma, diversos estudos [30–33] buscam compreender e modelar os principais mecanismos de espalhamento nessa superfície de fundo: (1) a rugosidade da interface e (2) a presença de heterogeneidades volumétricas³.

2.1.4 A subsuperfície de fundo

Uma última região de interesse do ambiente submerso é o substrato, também chamado de subsuperfície de fundo. A aplicação de técnicas como o sonar de varredura lateral⁴ e o sonar de múltiplos feixes⁵ resultam em medições da morfologia do fundo marinho, permitindo inclusive seu imageamento, auxiliando na identificação de objetos sobre o fundo marinho ou até mesmo de objetos parcialmente enterrados [34]. Porém, de Souza [35] explica que os sistemas de medições empregados para esse imageamento utilizam-se de fontes com frequências entre 100 kHz e 500 kHz de forma a obterem boa resolução. Nessa faixa de frequência a atenuação das ondas acústicas no sedimento é grande [36], não só reduzindo sua capacidade de penetração como dificultando sua identificação devido à baixa relação sinal/ruído.

Para a avaliação da subsuperfície de fundo destaca-se então a utilização de sistemas chamados Perfiladores Sísmicos⁶ que usualmente utilizam frequências de trabalho entre 2 kHz e 20

³ Regiões no volume que apresentam diferentes propriedades acústicas, provocando modificações no campo acústico resultante.

⁴ Tradução do termo em inglês *sidescan*.

⁵ Tradução do termo em inglês *multibeam*.

⁶ O termo usual utilizado em inglês é *Sub-Bottom Profilers*.

kHz e são capazes de penetrar de dezenas a centenas de metros no substrato marinho [37]. Diversos equipamentos e sistemas de medição, com os mais diversos objetivos – detecção de camadas finas, de objetos, de artefatos arqueológicos – foram desenvolvidos [37–40].

Mesmo obtendo a penetração necessária para avaliar a subsuperfície tem-se que o substrato por si só é um meio complexo, multicamadas, composto por sedimentos de diferentes propriedades geoacústicas e apresentando heterogeneidade volumétrica. De forma a interpretar esses dados, muito já se estudou sobre a propagação acústica em meios multi-camadas. Dentre eles, destaca-se o livro referência no assunto escrito por Brekhovskikh [41] em 1960 e aprofundado em 1980 [42], livros que descrevem o modelamento matemático de meios multi-camadas. Esses modelos permitem que sejam tomadas diferentes abordagens quando aplicados. Sabendo-se as propriedades do sistema de interesse (propriedade dos materiais, condições de contorno e mecanismos das fontes), pode-se utilizar os modelos matemáticos de forma direta, obtendo-se a resposta esperada deste sistema. Outra abordagem ataca o chamado problema inverso, no qual os valores de resposta são conhecidos por meio da medição de uma grandeza física e deseja-se encontrar mais informações sobre o sistema que retornou essa resposta. Chapman *et al* [43] compilam um documento apresentando desenvolvimentos recentes no problema de inversão em ambientes submersos, em que se destaca o alto custo computacional dos processos de inversão [44, 45]. Este processo de inversão é computacionalmente custoso, pois usualmente envolve um problema de otimização que busca minimizar a diferença entre os resultados de um modelo e os resultados medidos. Mesmo assim, o aumento da capacidade computacional nos últimos anos, favoreceu a pesquisa de métodos de estimação de parâmetros geoacústicos [46].

Pinson [8–10] propõe em um conjunto de artigos, uma nova forma de estimação de parâmetros geoacústicos, baseada na aplicação do método da fonte imagem. O diferencial desse método

está em dispensar um processo típico de inversão, estimando as propriedades por meio de relações simples de acústica geométrica.

2.2 Sonar na detecção de objetos enterrados

Ainda dentro da região da subsuperfície, além do interesse das propriedades geoacústicas do meio, diversos trabalhos têm como ponto de interesse a detecção e localização de objetos (cabos, dutos, artefatos arqueológicos, naufrágios etc) nessa subsuperfície.

Conforme mencionado no Capítulo 1, grande parte dos estudos em acústica submarina foram desenvolvidos devido a uma necessidade militar. A detecção de objetos enterrados e semi-enterrados foi uma dessas necessidades, pois no decorrer da Primeira e Segunda Guerra Mundial, uma quantidade considerável de armamento como torpedos, bombas de avião e minas navais foram deixadas em regiões costeiras da Europa e Ásia [47].

Segundo Lim [48], o espalhamento de ondas acústicas por objetos submersos fornecem informações que permitem tanto sua identificação como sua detecção. No entanto, quando o objeto de interesse está enterrado no sedimento, a identificação e detecção se torna complicada. A presença de diversos fenômenos físicos já citados nas seções anteriores, tais quais as interações da onda com a interface água-sedimento, as múltiplas reflexões e os mecanismos de propagação no sedimento, são efeitos que devem ser levados em consideração, pois seu sinal é, muitas vezes, maior que o sinal refletido pelo objeto de interesse [49].

Os trabalhos [50–55], destacam uma outra fonte de complexidade ao problema da detecção de objetos enterrados — especificamente quando se trata de águas rasas e muito rasas — que é a pequena área de cobertura quando se trabalha com ângulos de penetração maiores que o ângulo crítico⁷, o que diminui a performance do processo de medição.

No trabalho de Pinto [56], uma fonte paramétrica aplicando uma frequência baixa, na faixa de 2 kHz a 16 kHz foi utilizada

⁷ Ângulo mínimo para que haja penetração no substrato.

juntamente com processamento de arranjo para obter imagens da subsuperfície de fundo, permitindo a localização de uma casca esférica enterrada. Williams e Gritto [57, 58] estudam separadamente a detecção de cascas esféricas e cilíndricas dispostas sobre o substrato a partir de seu espalhamento acústico. Já outros trabalhos [59–61] abordam o problema de detecção de objetos como um problema de reconhecimento de padrões⁸.

De modo a melhorar a qualidade de imagens geradas à partir de investigações acústicas no sentido de facilitar a localização de espalhadores volumétricos, Borcea [62] desenvolveu um operador de filtro aniquilador de camadas. Esse operador tem o objetivo de retirar os sinais referentes às camadas geológicas, melhorando a relação sinal-ruído dos sinais espalhados por objetos de interesse. Uma abordagem similar é tomada por Pinson [63], que aplica o mesmo conceito de filtragem de camadas juntamente com o método da fonte imagem para auxiliar a localização de objetos enterrados no substrato de ambientes submersos. Esse procedimento é a base do algoritmo de filtragem de camadas geológicas que será implementado nesta dissertação, sendo sua implementação aprofundada no Capítulo 5.

2.3 Métodos numéricos

Grande parte dos trabalhos supracitados tem uma característica em comum: utilizam-se de métodos numéricos como uma ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de seus estudos.

Em acústica submarina os principais métodos numéricos utilizados são: (1) raios acústicos, (2) equações parabólicas, (3) integração do número de onda (modelos de campo rápido⁹), (4) modos normais, (5) elementos finitos e (6) diferenças finitas. Os primeiros quatro métodos possuem um custo computacional consideravelmente menor que os dois últimos, porém o preço que se paga por essa eficiência é a restrição da aplicação desses modelos,

⁸ Tradução do termo em inglês *patter recognition*.

⁹ Traduzido do termo comumente utilizado em inglês *Fast Field Programs*.

pois para sua implementação devem ser assumidas simplificações. Já os dois últimos métodos discretizam o tempo e o espaço e resolvem a equação da onda nesses espaços discretizados, levando em consideração os principais fenômenos físicos envolvidos e fornecendo dados que podem ser utilizados como dados de entrada para sistemas sísmicos.

2.3.1 Raios acústicos

O método de raios acústicos representa as ondas sonoras na forma de raios normais à direção de propagação da sua frente de onda [12]. Primeiramente é determinado o caminho de propagação dos raios, e o resultado do campo para um ponto de interesse é determinado pela soma das pressões atribuída a cada um dos raios que passam por esse ponto. Matematicamente, o método dos raios acústicos parte da equação de Helmholtz, representando a solução na forma de uma série de potências (série de raios) [64] e assumindo que a frequência dessa onda é alta – seu comprimento de onda é muito menor que as dimensões do problema –, o que simplifica a solução do campo acústico a uma equação Eikonal [12] e uma equação de transporte, que podem ser solucionadas por uma variedade de métodos. As simplificações trazem uma série de limitações [65] para a aplicação dos raios acústicos, dentre elas destaca-se a simplificação de alta frequência, que exige que as propriedades do meio variem gradualmente e que quaisquer heterogeneidades devem ter comprimento característico consideravelmente maiores que o comprimento de onda propagante.

2.3.2 Equações parabólicas

O método das equações parabólicas foi introduzido por Tappert [66] e é uma das técnicas mais empregadas na resolução de problemas de propagação que apresentam propriedades variando em função da distância¹⁰. O método aplica um operador de modo

¹⁰ Em inglês utiliza-se o termo *range-dependent*.

a obter uma formulação para a equação da onda divergente que possa ser resolvida de maneira eficiente. Para derivar a equação parabólica, parte-se da equação de Helmholtz em coordenadas cilíndricas e se assume uma solução na forma de um termo de amplitude dependente da posição no espaço e uma função de Hankel dependente apenas da coordenada radial. Assume-se então uma aproximação paraxial – pequenas variações das propriedades com a distância, o que implica em uma pequena variação dos ângulos de propagação – que permite simplificar a equação da onda a uma equação diferencial parcial parabólica, que pode ser manipulada e resolvida por uma série de técnicas [14] (algoritmo *split-step* Fourier [67], diferenças finitas implícitas [68], equações diferenciais ordinárias [69] e elementos finitos [70]). As principais limitações do método das equações parabólicas, além da restrição quanto aos ângulos de propagação, é relacionada à negligência do campo retroespalhado e à frequência de análise, pois o custo computacional inviabiliza sua aplicação para frequências maiores que 500 Hz.

2.3.3 Integração de número de onda

A técnica de integração de número de onda, também chamada modelo de campo rápido, é aplicável para meios horizontalmente estratificados – com variação de propriedades apenas na profundidade – e se baseia no fato de que, para cada camada desse meio, é possível obter a representação integral exata para o campo acústico [12]. Para a derivação da integração de número de onda, parte-se da equação da onda para coordenadas cilíndricas, a qual é simplificada a uma equação diferencial ordinária em função da profundidade, cuja solução para cada camada nada mais é do que a soma de uma onda divergente e outra convergente, restando apenas definir as condições de contorno do problema. As principais limitações da integração do número de onda padrão é a impossibilidade de variar as propriedades do meio com a distância – não permitindo simular espalhadores – juntamente com problemas na estabilidade numérica das soluções. Diversas implementações foram estudadas

com o intuito de reduzir essas limitações [14], porém o custo computacional pode passar a ser um problema, inviabilizando essas técnicas.

2.3.4 Modos normais

A técnica dos modos normais foi introduzida por Pekeris [71], ela busca resolver a equação da onda em função da profundidade de forma similar àquela aplicada na integração de número de onda. A partir da equação da onda homogênea em coordenadas cilíndricas, aplica-se uma separação de variáveis, chegando a duas equações homogêneas, uma função da profundidade, chamada de equação dos modos normais, que descreve as ondas estacionárias – similares aos modos de vibração que podem ser observados em uma corda –, e outra, função da distância radial, que descreve a porção da propagação das ondas. A solução do campo acústico é então construída por meio da soma da contribuição de cada um desses modos. Esse procedimento usualmente é utilizado para problemas independentes da distância¹¹, mas pode ser estendido para problemas dependentes com um aumento da carga computacional. Por envolver um problema de autovalor-autovetor, a determinação dos modos é um problema de localização de raízes, podendo falhar em encontrar algum dos modos [72]. Outra limitação do método está na frequência máxima de análise, pois com o aumento da frequência o número de modos necessário para gerar a resposta do campo acústico aumenta proporcionalmente [14].

2.3.5 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos¹² (FEM) tem como base a discretização do domínio de interesse e do tempo em pequenos pedaços discretos (elementos) nos quais a equação da onda pode ser resolvida, em termos de um número finito de graus de liberdade,

¹¹ Em inglês utiliza-se o termo *range-independent*.

¹² Tradução do termo em inglês *Finite Element Method*

de forma analítica [12]. O FEM, devido à forma como discretiza o problema, é extremamente versátil, permitindo o tratamento das mais complexas geometrias (multi-camada de diferentes geometrias, espalhadores, variação com a distância etc.) e condições de contorno. O método permite a solução exata da equação da onda [73], levando em conta os principais fenômenos físicos (propagação, refração, transmissão, difração e retroespalhamento). Porém a quantidade de elementos para que se uma solução satisfatória é um limitante do método, restringindo seu uso para problemas de espalhamento em distâncias relativamente curtas ou para frequências mais baixas.

2.3.6 Método das Diferenças Finitas

O Método das Diferenças Finitas¹³ (FD) [74] para a solução da equação da onda se baseia em sua discretização direta, representando os operadores diferenciais como equações de diferenças, computadas em uma malha finita de pontos. Assim como o FEM, o método das diferenças finitas é computacionalmente custoso o que torna limitado o seu uso para problemas de propagação em grandes distâncias. Mas o método, assim como o FEM, permite tratar geometrias e contornos mais complexos do que os métodos anteriormente citados, sendo extensivamente aplicado à problemas de investigação sísmica. O FEM é mais flexível, permitindo que a espaço seja facilmente discretizado de forma a melhor representar descontinuidades complexas, porém para problemas que podem ser descritos por uma malha uniforme – como boa parte dos problemas em sísmica – o método de diferenças finitas fornece resultados tão bons quanto o FEM, mas com menor custo computacional.

Para o trabalho que será desenvolvido ao longo deste documento, deseja-se investigar a propagação acústica em um meio multi-camadas com heterogeneidades volumétricas que variam ao longo da distância, sendo que existe o interesse em especial aos efeitos

¹³ Tradução do termo em inglês *Finite Difference Method*.

de reflexão, transmissão e espalhamento das ondas acústicas em espalhadores volumétricos. Desta forma, os métodos numéricos mais apropriados para fornecer esses dados são o FEM e o FD. Como os problemas de interesse podem ser descritos por malhas uniformes, optou-se pela utilização do método FD.

2.4 Implementação numérica

Conforme comentado acima, os métodos numéricos são utilizados para se obter informação sobre sistemas e ambientes de interesse. Uma das aplicações para esses modelos, consiste em usar seus resultados como dados de entrada na pesquisa e desenvolvimento de algoritmos de processamento de sinais [75]. A grande razão para se utilizar dados modelados ao invés de dados reais durante o desenvolvimento de algoritmos, se deve à capacidade em modelar uma situação completamente controlada, em contrapartida a dados reais, que trazem juntamente com a informação desejada, uma série de efeitos desconhecidos e ruído.

O Método de Diferenças Finitas (FD) leva em consideração os fenômenos descritos pela equação da onda, fornecendo dados realistas de investigação sísmica, conforme menciona Gray [76]. Assim sendo, o FD será o método escolhido para gerar os dados auxiliares no desenvolvimento dos algoritmos de detecção de dutos enterrados descritos no Capítulo 5.

As próximas seções descrevem o modelamento matemático da propagação de ondas mecânicas, mais especificamente ondas acústicas assim como sua resolução a partir do método das diferenças finitas, explicando seu funcionamento e destacando as particularidades da implementação do código SimSonic2D©.

2.4.1 Problema direto de propagação

Uma onda acústica é formada em um meio elástico quando uma perturbação gerada por forças externas é propagada pelas partículas do material, se manifestando como alterações de pressão ou deslocamento destas partículas. O termo partícula(s)

em acústica não remete aos átomos e moléculas, mas sim a um elemento de volume com uma quantidade de moléculas ou átomos suficientes para que ele possa ser considerado um meio contínuo, mas que seja pequeno o bastante para que todas as variáveis acústicas sejam uniformes em sua totalidade.

Este trabalho, como será explicado nos capítulos que seguem, aplica algumas simplificações à física da propagação acústica, dentre essas simplificações é importante destacar a representação de meios sólidos ou poro-elásticos como fluidos equivalentes. De forma que esta seção tratará da propagação das ondas acústicas, especificamente em meios fluidos.

2.4.2 Equação da onda

A propagação de uma onda acústica, consiste da perturbação por forças externas de um ou mais elementos de volume que geram movimentos não coordenados entre elementos vizinhos, criando zonas de compressão e rarefação. Como consequência, verifica-se uma variação instantânea da densidade e pressão nesse elemento de volume, que por sua vez transfere essa variação aos seus elementos vizinhos e assim por diante. Esta variação de pressão, chamada pressão sonora, é a variável física de maior importância para a acústica devido à facilidade em realizar sua medição.

Para descrever matematicamente a propagação sonora, é necessário definir as equações de conservação de quantidade de movimento e da continuidade [77]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2.1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla p = 0, \quad (2.2)$$

sendo p a pressão sonora, \mathbf{u} o vetor de velocidade de partícula, t o tempo, ρ a densidade, c a velocidade de propagação do som, $\nabla(\cdot)$ o operador gradiente e $\nabla \cdot (\cdot)$ o operador divergente. Após um processo de linearização, as Equações (3.1) e (3.2) são então combinadas com a equação de estado para um processo adiabático

[78]

$$PV^\gamma = \text{cte.}, \quad (2.3)$$

com P representando a pressão no gás ideal, V o volume e γ a razão de calor específico. Reescrevendo, as Equações (3.1) e (3.2), na forma de duas equações diferenciais de primeira ordem que descrevem a propagação acústica:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2.4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0, \quad (2.5)$$

nas quais c_0 e ρ_0 são, respectivamente, a velocidade média do som no meio e a densidade média do meio. Esta etapa intermediária do desenvolvimento da equação da onda é importante de ser destacada, pois o método FD apresentado mais adiante transforma as Equações (3.4) e (3.5) em equações de diferenças finitas para resolver o problema de propagação. Porém, é comum combinar as Equações (3.4) e (3.5), de modo a eliminar p ou \mathbf{u} , logo,

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.6)$$

$$\nabla^2 \mathbf{v} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = 0, \quad (2.7)$$

sendo ∇^2 o operador Laplaciano definido como

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad . \quad (2.8)$$

Ambas as Equações (3.6) e (3.7) recebem o nome de Equação da Onda e descrevem completamente a propagação de ondas mecânicas, sejam estas ondas longitudinais ou transversais. Quando termos fonte F estão presentes, a equação a se resolver passa a ser a equação da onda não homogênea:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = F. \quad (2.9)$$

2.4.3 A forma integral da Equação da onda

Dentre os fenômenos previstos e descritos pela Equação da Onda definida acima, é de interesse destacar aqueles que envolvem a interação da onda com estruturas presentes no meio de propagação, ou seja, os fenômenos de reflexão e difração. Difração é o fenômeno que permite que as ondas acústicas circundem objetos presentes em sua trajetória, qualitativamente é possível explicar a difração com base no princípio de Huygens [77]. Esse princípio afirma que cada ponto de um meio, quando atingido por uma frente de onda, dá origem a uma nova frente de onda esférica, conforme apresentado na Figura 3.1. Essa forma de propagação permite que a onda contorne objetos presentes em seu trajeto.

A representação matemática desse princípio é encontrada diretamente quando utilizada a forma integral da equação da onda [79]:

$$p(\mathbf{r}, t) = \int dt_0 \int_{S_0} \left[\mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} p(\mathbf{r}_0, t_0) - p(\mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) \right] dS + \int_V \mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) F(\mathbf{r}_0, t_0) dV. \quad (2.10)$$

A Figura 3.2 apresenta o esquema utilizado na derivação, sendo \mathcal{G} a função de Green de uma fonte pontual (um monopolo) localizada em \mathbf{r}_0 , $p(\mathbf{r}_0, t_0)$ a pressão observada na posição \mathbf{r}_0 na superfície S_0 , V o volume englobado por S , $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} = \nabla \cdot \mathbf{n}$ e F os termos fonte.

A Equação 3.10 é usualmente chamada Equação de Helmholtz-Kirchhoff, e sua dedução completa pode ser encontrada nos trabalhos de Bai [81], Shuster [82], e Morse e Feshbach [79]. Analisando essa equação, tem-se que a pressão em qualquer posição r é dada pela contribuição de monopólos – representados pela função de Green \mathcal{G} – ponderados pela função $F(\mathbf{r}_0)$ distribuídos no volume V , somada à contribuição de monopólos G e dipolos $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \mathbf{n}}$ distribuídos na superfície S_0 , ou seja, a propagação de um frente de onda se deve à combinação de fontes secundárias distribuídas de forma contínua, afirmação que corrobora o princípio de Huygens.

2.5 Implementação do Método das diferenças finitas

O Método das diferenças finitas é um procedimento geralmente aplicado à resolução de problemas de valores de contorno [84] normalmente descritos matematicamente por equações diferenciais parciais. Foi um dos primeiros métodos a ser utilizado para a resolução da equação transiente da onda e continua sendo popular até hoje devido à simplicidade de sua implementação e ao fato de que problemas de propagação de ondas são adequados para malhas uniformes [85].

O princípio básico do método das diferenças finitas consiste em aproximar a solução do problema de valor de contorno por uma função definida em um número finito de pontos de uma malha, que representa o domínio do problema e seu contorno. Nesses pontos, chamados nós da malha, as derivadas parciais são aproximadas por diferenças finitas usualmente encontradas com expansões em Série de Taylor [86]. Para uma função f em uma dimensão, os operadores de diferenças finitas de segunda ordem ficam:

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{h} + o(h^2), \quad (2.11)$$

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + o(h^2), \quad (2.12)$$

sendo h a distância entre os nós e $o(h^2)$ um erro de aproximação proporcional à h^2 . A Equação (3.11) é chamada equação às diferenças centrais¹⁴, de forma que as derivadas em qualquer ponto da malha são aproximadas por diferenças finitas que dependem dos valores da função nos nós vizinhos.

O problema de interesse deste trabalho envolve a solução da equação da onda (Equação (3.6)), mais especificamente, envolve a solução da equação da onda em duas dimensões:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.13)$$

discretizando as diferenciais parciais e assumindo um espaçamento

¹⁴Tradução do termo em inglês *central difference equation*

entre nós igual para ambas as direções, $\Delta x = \Delta y = h$, assim, tem-se

$$\frac{p_{i+1,j}^k - 2p_{i,j}^k + p_{i-1,j}^k}{h^2} + \frac{p_{i,j+1}^k - 2p_{i,j}^k + p_{i,j-1}^k}{h^2} - \frac{1}{c^2} \frac{p_{i,j}^{k+1} - 2p_{i,j}^k + p_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2} = 0, \quad (2.14)$$

com i representado o índice do nó na direção x , j o índice do nó na direção y e k o índice discreto da variável temporal t . Simplificando e isolando o termo de interesse – a pressão no nó para o instante de tempo seguinte – chega-se à expressão em diferenças centrais de segunda ordem [87]:

$$p_{i,j}^{k+1} = 2(1 - 2\alpha^2) p_{i,j}^k + \alpha^2 (p_{i+1,j}^k + p_{i-1,j}^k + p_{i,j+1}^k + p_{i,j-1}^k) - p_{i,j}^{k-1}, \quad (2.15)$$

sendo $\alpha = \frac{c\Delta t}{h}$ ¹⁵. Tem-se que o valor da pressão no instante seguinte ($k+1$) depende da pressão observada nos nós vizinhos no instante atual k e da pressão no instante anterior ($k-1$) no próprio nó.

2.6 Implementação do software SimSonic2D

O SimSonic© é um pacote de programas desenvolvido em 2003 pelo pesquisador Emmanuel Bossy durante a realização de seu trabalho de pós-doutorado [89] no *Laboratoire d'Imagerie Paramétrique* em Paris, França. Em resumo, o SimSonic© modela a propagação acústica linear em meios fluidos ou sólidos através da implementação de uma solução em diferenças finitas no domínio do tempo¹⁶.

O SimSonic2D é um dos programas do pacote, e implementa uma solução em FD para domínios com duas dimensões. Sua

¹⁵ Valor que pode ser interpretado como o comprimento viajado pela onda durante um espaço Δt comparado ao espaço entre nós h [88].

¹⁶ Tradução do termo em inglês *Finite Difference Time Domain (FDTD)*.

implementação é baseada nos trabalhos desenvolvidos por Virieux [90, 91], que propõe a discretização do domínio espacial na forma de malhas intercaladas¹⁷ tradicionais, um esquema adequado para a propagação de ondas elásticas em materiais ortotrópicos [92], sendo a propagação de ondas acústicas apenas um caso particular da propagação elástica. Esse esquema permite, sem qualquer problema de instabilidade numérica, o acoplamento de um meio elástico com um meio fluido.

O esquema de Virieux – ao contrário da grande maioria das formulações numéricas, que partem das equações diferenciais de segunda ordem – parte das equações de movimento e de elasticidade, que em duas dimensões e na ausência de termos fonte podem se escritas:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial x'}, \quad (2.16)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y'}, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = c_{11} \frac{\partial U}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial V}{\partial y'}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = c_{22} \frac{\partial V}{\partial y} + c_{12} \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = c_{66} \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right). \quad (2.20)$$

Nas equações acima estão omitidos os argumentos (x, y, t) para o campo de velocidades U (direção x) e V (direção y), para o campo de tensões $(\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}) = (X, T, Y)$, para a densidade ρ e para componentes do tensor de rigidez do meio c_{ij} . Para discretizar essas equações Virieux propõe malhas intercaladas, tanto no espaço como tempo. No apêndice da referência [92] o autor fornece um diagrama que facilita a compreensão dessas malhas, um diagrama similar é apresentado na Figura 3.3.

¹⁷ Tradução do termo e inglês *staggered grid*

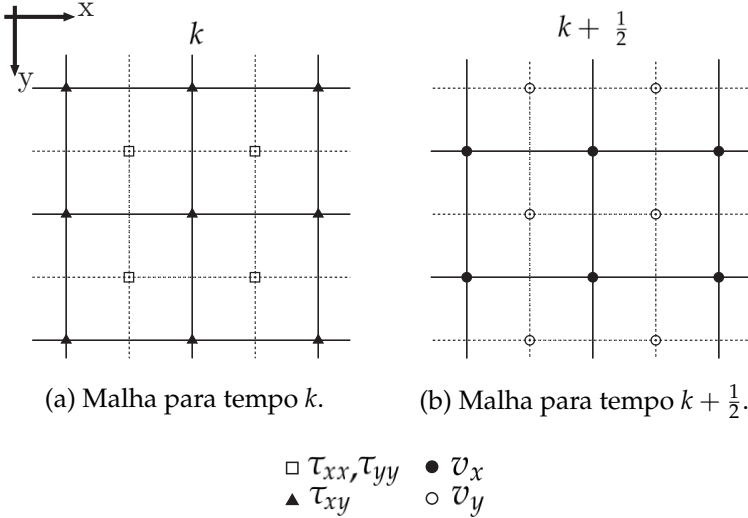


Figura 2.4.: Malhas intercaladas utilizadas na discretização segundo o esquema de Virieux.

Aplicando um operador de diferenças finitas similar a Equação (3.11) e considerando as malhas intercaladas, obtém-se à seguinte aproximação em diferenças finitas:

$$U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = U_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho_{i,j}} \frac{\Delta t}{h} \left(X_{i+\frac{1}{2},j}^k - X_{i,j+\frac{1}{2}}^k + T_{i+\frac{1}{2},j}^k - T_{i,j+\frac{1}{2}}^k \right), \quad (2.21)$$

$$V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho_{i,j}} \frac{\Delta t}{h} \left(T_{i+1,j+\frac{1}{2}}^k - T_{i,j+\frac{1}{2}}^k + Y_{i+\frac{1}{2},j+1}^k - Y_{i+\frac{1}{2},j}^k \right), \quad (2.22)$$

$$X_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} = X_{i+\frac{1}{2},j}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{11} \left(U_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{12} \left(V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (2.23)$$

$$Y_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} = Y_{i+\frac{1}{2},j}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{22} \left(V_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{12} \left(U_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (2.24)$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1} = T_{i,j+\frac{1}{2}}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{66} \left(V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{66} \left(U_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (2.25)$$

com c_{11} e c_{22} avaliados na posição $(ih + \frac{h}{2}, jh)$, e c_{12} avaliado na posição $(ih, jh + \frac{h}{2})$. Percebe-se que os campos de tensão e de velocidade são calculados em instantes diferentes de tempo, basicamente as tensões em um tempo k são utilizadas para se obter o campo de velocidades em um tempo $k + \frac{1}{2}$ enquanto que o campo de velocidades em um tempo $k + \frac{1}{2}$ é utilizado para o cálculo das tensões em $k + 1$, esse processo é chamado *leapfrog* devido a esses saltos no tempo.

Além do esquema de diferenciação utilizado pelo software, é importante destacar as condições de contorno implementadas. O SimSonic2D permite a utilização de quatro tipos de condição de contorno: (1) condição livre (condição de Dirichlet [84]), (2) condição rígida (condição de Neumann [84]), (3) condição de simetria e (4) camadas perfeitamente casadas¹⁸ (PML). A primeira condição assume que nos contornos a pressão sonora no meio tende a zero, sendo esta uma condição que representa o contorno enxergado por uma onda incidindo de um meio líquido para um

¹⁸ Tradução do termo em inglês largamente utilizado *Perfectly Matched Layers* (PML).

meio gasoso, por exemplo. Já a segunda condição, estabelece que no contorno a velocidade de partícula tende a zero, sendo uma condição adequada para representar o contorno enxergado por uma onda incidindo em um meio cuja impedância seja (relativamente) muito grande. A terceira condição representa o contorno como um espelho de simetria. A quarta e mais importante condição para este trabalho, a PML, é utilizada para representar uma condição de domínio infinito. Esse efeito é obtido ao se adicionar camadas ao domínio de interesse, que tem por característica não refletir a onda em sua interface e propagar a onda com decaimento exponencial.

No Capítulo 6 serão definidos as geometrias e os parâmetros dos modelos que serão resolvidos com o SimSonic2D para gerar os dados que serão utilizados como entrada para os algoritmos de filtragem de camadas geológicas e imageamento de espalhadores descritos no Capítulo 5.

3 Simulações numéricas

Conforme comentado no Capítulo 2, os métodos numéricos são utilizados para se obter informação sobre sistemas e ambientes de interesse. Uma das aplicações para estes modelos, consiste em usar seus resultados como dados de entrada na pesquisa e desenvolvimento de algoritmos de processamento de sinais. A grande razão para se utilizar dados modelados ao invés de dados reais durante o desenvolvimento de algoritmos, se deve à capacidade em modelar uma situação completamente controlada, em contrapartida a dados reais, que trazem juntamente com a informação desejada, uma série de efeitos desconhecidos e ruído.

Conforme descrito no Capítulo 2, um dos métodos numéricos que leva em consideração os fenômenos descritos pela equação da onda e que fornece dados realistas de investigação sísmica é o Método de Diferenças Finitas (FD), conforme menciona Gray [76]. Assim sendo, o FD será o método escolhido para gerar os dados auxiliares no desenvolvimento dos algoritmos de detecção de dutos enterrados descritos no Capítulo 5.

As próximas seções descrevem o modelamento matemático da propagação de ondas mecânicas, mais especificamente ondas acústicas assim como sua resolução a partir do método das diferenças finitas, explicando seu funcionamento e destacando as particularidades da implementação do código SimSonic2D©.

3.1 Problema direto de propagação

Uma onda acústica é formada em um meio elástico quando uma perturbação gerada por forças externas é propagada pelas

partículas do material, se manifestando como alterações de pressão ou deslocamento destas partículas. O termo partícula(s) em acústica não remete aos átomos e moléculas, mas sim a um elemento de volume com uma quantidade de moléculas ou átomos suficientes para que ele possa ser considerado um meio contínuo, mas que seja pequeno o bastante para que todas as variáveis acústicas sejam uniformes em sua totalidade.

Este trabalho, como será explicado nos capítulos que seguem, aplica algumas simplificações à física da propagação acústica, dentre essas simplificações é importante destacar a representação de meios sólidos ou poro-elásticos como fluidos equivalentes. De forma que esta seção tratará da propagação das ondas acústicas, especificamente em meios fluidos.

3.1.1 Equação da onda

A propagação de uma onda acústica, consiste da perturbação por forças externas de um ou mais elementos de volume que geram movimentos não coordenados entre elementos vizinhos, criando zonas de compressão e rarefação. Como consequência, verifica-se uma variação instantânea da densidade e pressão neste elemento de volume, que por sua vez transfere esta variação aos seus elementos vizinhos e assim por diante. Esta variação de pressão, chamada pressão sonora, é a variável física de maior importância para a acústica devido à facilidade em realizar sua medição.

Para descrever matematicamente a propagação sonora, é necessário definir as equações de conservação de quantidade de movimento e da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (3.1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla p = 0, \quad (3.2)$$

sendo p a pressão sonora, \mathbf{u} o vetor de velocidade de partícula, t o tempo, ρ a densidade, c a velocidade de propagação do som, $\vec{\nabla}(\cdot)$ o operador gradiente e $\vec{\nabla} \cdot (\cdot)$ o operador divergente. Após

um processo de leniarização, as Equações (3.1) e (3.2) são então combinadas com a equação de estado para um processo adiabático

$$PV^\gamma = \text{cte.}, \quad (3.3)$$

com P representando a pressão no gás ideal, V o volume e γ a razão de calor específico. Reescrevendo, as Equações (3.1) e (3.2), na forma de duas equações diferenciais de primeira ordem que descrevem a propagação acústica:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3.4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0, \quad (3.5)$$

na qual c_0 e ρ_0 são, respectivamente, a velocidade média do som no meio e a densidade média do meio. Esta etapa intermediária do desenvolvimento da equação da onda é importante de ser destacada, pois o método FD apresentado mais adiante transforma as Equações (3.4) e (3.5) em equações de diferenças finitas para resolver o problema de propagação. Porém, é comum combinar as Equações (3.4) e (3.5), de modo a eliminar p ou \mathbf{u} :

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (3.6)$$

$$\nabla^2 \mathbf{v} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = 0, \quad (3.7)$$

sendo ∇^2 o operador Laplaciano definido como

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3.8)$$

Ambas as Equações (3.6) e (3.7) recebem o nome de Equação da Onda e descrevem completamente a propagação de ondas mecânicas, sejam estas ondas longitudinais ou transversais. Quando termos fonte F estão presentes, a equação a se resolver passa a ser a equação da onda não homogênea:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = F. \quad (3.9)$$

3.1.2 A forma integral da Equação da Onda

Dentre os fenômenos previstos e descritos pela Equação da Onda definida acima, é de interesse destacar aqueles que envolvem a interação da onda com estruturas presentes no meio de propagação, ou seja, os fenômenos de reflexão e difração. Difração é o fenômeno que permite que as ondas acústicas circundem objetos presentes em sua trajetória, qualitativamente é possível explicar a difração com base no princípio de Huygens [77]. Este princípio afirma que cada ponto de um meio, quando atingido por uma frente de onda, dá origem a uma nova frente de onda esférica, conforme apresentado na Figura 3.1. Esta forma de propagação permite que a onda contorne objetos presentes em seu trajeto.

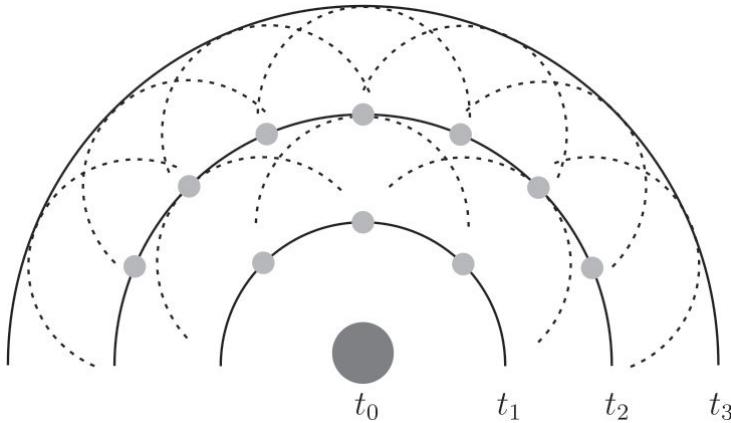


Figura 3.1.: Esquema ilustrando a emissão de uma onda esférica por uma fonte primária (círculo escuro) e a propagação de sua frente de onda como a combinação das frentes de onda das fontes secundárias (círculos claros), conforme o princípio de Huygens.

A representação matemática deste princípio é encontrada direta-

mente quando utilizada a forma integral da equação da onda [79]:

$$p(\mathbf{r}, t) = \int dt_0 \int_{S_0} \left[\mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} p(\mathbf{r}_0, t_0) - p(\mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) \right] dS + \int_V \mathcal{G}(\mathbf{r}, t | \mathbf{r}_0, t_0) F(\mathbf{r}_0, t_0) dV, \quad (3.10)$$

sendo \mathcal{G} a função de Green de uma fonte pontual (um monopolo) localizada em \mathbf{r}_0 , $p(\mathbf{r}_0, t_0)$ a pressão observada na posição \mathbf{r}_0 na superfície S_0 , V o volume englobado por S , $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} = \nabla \cdot \mathbf{n}$ e F os termos fonte.

A Equação 3.10 acima é usualmente chamada Equação de Helmholtz-Kirchhoff, e sua dedução completa pode ser encontrada nos trabalhos de Bai [81], Shuster [82], e Morse e Feshbach [79].

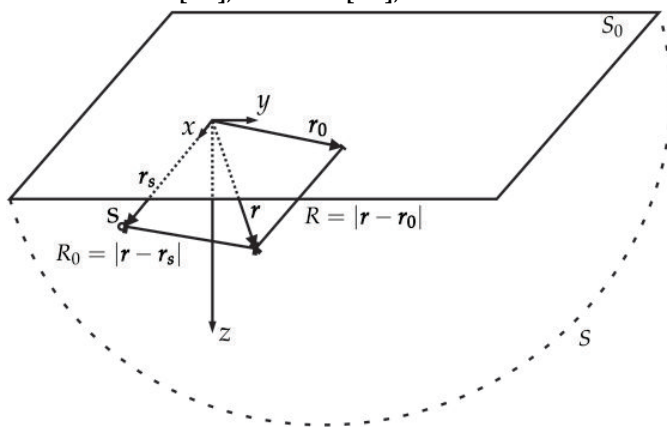


Figura 3.2.: Diagrama utilizado na derivação da Equação de Helmholtz-Kirchhoff, adaptado de Schneider [83].

Analisando a Equação (3.10), tem-se que a pressão em qualquer posição r é dada pela contribuição de monopólos – representados pela função de Green \mathcal{G} – ponderados pela função $F(\mathbf{r}_0)$ distribuídos no volume V , somada à contribuição de monopólos G e dipolos $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}}$ distribuídos na superfície S_0 , ou seja, a propagação de um frente de onda se deve a combinação de fontes secundárias distribuídas de forma contínua, afirmação que corrobora o princípio de Huygens.

3.2 Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas é um procedimento geralmente aplicado à resolução de problemas de valores de contorno [84] normalmente descritos matematicamente por equações diferenciais parciais. Foi um dos primeiros métodos a ser utilizado para a resolução da equação transiente da onda e continua sendo popular até hoje devido à simplicidade de sua implementação e ao fato de que problemas de propagação de ondas são adequados para malhas uniformes [85].

O princípio básico do método das diferenças finitas consiste em aproximar a solução do problema de valor de contorno por uma função definida em um número finito de pontos de uma malha, que representa o domínio do problema e seu contorno. Nesses pontos, chamados nós da malha, as derivadas parciais são aproximadas por diferenças finitas usualmente encontradas com expansões em série de Taylor. Para uma função f em uma dimensão, os operadores de diferenças finitas de segunda ordem ficam:

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{h} + o(h^2), \quad (3.11)$$

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + o(h^2), \quad (3.12)$$

sendo h a distância entre os nós e $o(h^2)$ um erro de aproximação proporcional à h^2 . A Equação (3.11) é chamada equação às diferenças centrais¹, de forma que as derivadas em qualquer ponto da malha são aproximadas por diferenças finitas que dependem dos valores da função nos nós vizinhos.

O problema de interesse deste trabalho envolve a solução da equação da onda (Equação (3.6)), mais especificamente, envolve a solução da equação da onda em duas dimensões:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (3.13)$$

discretizando as diferenciais parciais e assumindo um espaçamento

¹ Tradução do termo em inglês *central difference equation*

entre nós igual para ambas as direções, $\Delta x = \Delta y = h$, tem-se

$$\frac{p_{i+1,j}^k - 2p_{i,j}^k + p_{i-1,j}^k}{h^2} + \frac{p_{i,j+1}^k - 2p_{i,j}^k + p_{i,j-1}^k}{h^2} - \frac{1}{c^2} \frac{p_{i,j}^{k+1} - 2p_{i,j}^k + p_{i,j}^{k-1}}{\Delta t^2} = 0, \quad (3.14)$$

com i representado o índice do nó na direção x , j o índice do nó na direção y e k o índice discreto da variável temporal t . Simplificando e isolando o termo de interesse – a pressão no nó para o instante de tempo seguinte – chega-se à expressão em diferenças centrais de segunda ordem[87]:

$$p_{i,j}^{k+1} = 2(1 - 2\alpha^2) p_{i,j}^k + \alpha^2 (p_{i+1,j}^k + p_{i-1,j}^k + p_{i,j+1}^k + p_{i,j-1}^k) - p_{i,j}^{k-1}, \quad (3.15)$$

sendo $\alpha = \frac{c\Delta t}{h}$. Tem-se que o valor da pressão no instante seguinte ($k + 1$) depende da pressão observada nos nós vizinhos no instante atual k e da pressão no instante anterior ($k - 1$) no próprio nó.

3.3 Implementação do software SimSonic2D

O SimSonic© é um pacote de programas desenvolvido em 2003 pelo pesquisador Emmanuel Bossy durante a realização de seu trabalho de pós-doutorado [89] no *Laboratoire d'Imagerie Paramétrique* em Paris, França. Em resumo, o SimSonic© modela a propagação acústica linear em meios fluidos ou sólidos através da implementação de uma solução em diferenças finitas no domínio do tempo².

O SimSonic2D é um dos programas do pacote, e implementa uma solução em FD para domínios com duas dimensões. Sua implementação é baseada nos trabalhos desenvolvidos por Virieux [90, 91], que propõe a discretização do domínio espacial na forma de malhas intercaladas³ tradicionais, um esquema adequado para

² Finite Difference Time Domain (FDTD)

³ Tradução do termo e inglês *staggered grid*

a propagação de ondas elásticas com anisotropia ortotrópica[92], sendo a propagação de ondas acústicas apenas um caso particular da propagação elástica. Esse esquema permite, sem qualquer problema de instabilidade numérica, o acoplamento de um meio elástico com um meio fluido.

O esquema de Virieux – ao contrário da grande maioria das formulações numéricas, que partem das equações diferenciais de segunda ordem – parte das equações de movimento e de elasticidade, que em duas dimensões e na ausência de termos fonte podem se escritas:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3.16)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y}, \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = c_{11} \frac{\partial U}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial V}{\partial y}, \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = c_{22} \frac{\partial V}{\partial y} + c_{12} \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = c_{66} \left(\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right), \quad (3.20)$$

nas equações acima estão omitidos os argumentos (x, y, t) para o campo de velocidades U (direção x) e V (direção y), para o campo de tensões $(\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}) = (X, T, Y)$, para a densidade ρ e para componentes do tensor de rigidez do meio c_{ij} . Para discretizar essas equações Virieux propõe malhas intercaladas, tanto no espaço como tempo. No apêndice da referência [92] o autor fornece um diagrama que facilita a compreensão destas malhas, um diagrama similar é apresentado na Figura 3.3.

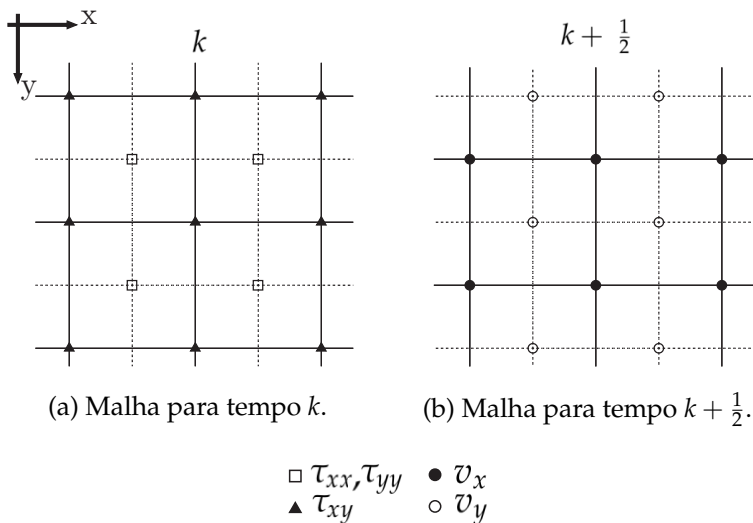


Figura 3.3.: Malhas intercaladas utilizadas na discretização segundo o esquema de Virieux.

Aplicando um operador de diferenças finitas similar a Equação (3.11) e considerando as malhas intercaladas, chega-se à seguinte aproximação em diferenças finitas:

$$U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} = U_{i,j}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho_{i,j}} \frac{\Delta t}{h} \left(X_{i+\frac{1}{2},j}^k - X_{i,j+\frac{1}{2}}^k + T_{i+\frac{1}{2},j}^k - T_{i,j+\frac{1}{2}}^k \right), \quad (3.21)$$

$$V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\rho_{i,j}} \frac{\Delta t}{h} \left(T_{i+1,j+\frac{1}{2}}^k - T_{i,j+\frac{1}{2}}^k + Y_{i+\frac{1}{2},j+1}^k - Y_{i+\frac{1}{2},j}^k \right), \quad (3.22)$$

$$X_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} = X_{i+\frac{1}{2},j}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{11} \left(U_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{12} \left(V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (3.23)$$

$$Y_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} = Y_{i+\frac{1}{2},j}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{22} \left(V_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{12} \left(U_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (3.24)$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1} = T_{i,j+\frac{1}{2}}^k + \frac{\Delta t}{h} \left[c_{66} \left(V_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - V_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right) + c_{66} \left(U_{i,j+1}^{k+\frac{1}{2}} - U_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \right], \quad (3.25)$$

com c_{11} e c_{22} avaliados na posição $(ih + \frac{h}{2}, jh)$, e c_{12} avaliado na posição $(ih, jh + \frac{h}{2})$. Percebe-se que os campos de tensão e de velocidade são calculados em instantes diferentes de tempo, basicamente as tensões em um tempo k são utilizadas para se obter o campo de velocidades em um tempo $k + \frac{1}{2}$ enquanto que o campo de velocidades em um tempo $k + \frac{1}{2}$ é utilizado para o cálculo das tensões em $k + 1$, este processo é chamado *leapfrog* devido a estes saltos no tempo.

No Capítulo 6 serão definidos as geometrias e os parâmetros dos modelos que serão resolvidos com o Simsonic2D para gerar os dados que serão utilizados como entrada para os algoritmos de filtragem de camadas geológicas e imageamento de espalhadores descritos no Capítulo 5.

4 Processamento sísmico clássico

O modelo de propagação acústica, definido na Seção 3, pode ser aplicado com duas abordagens distintas. Sabendo-se as propriedades do sistema de interesse (propriedade dos materiais, condições de contorno e mecanismos das fontes), pode-se utilizar os modelos matemáticos de forma *direta*, obtendo-se a resposta esperada desse sistema. Outra abordagem ataca o chamado problema *inverso*, em que os valores de resposta são conhecidos por meio da medição de uma grandeza física e deseja-se encontrar mais informações sobre o sistema que retornou essa resposta [93].

Dentro dos problemas *inversos* tratados em acústica submarina, é comum diferenciar duas técnicas chamadas *migração* e *inversão* [94]. Migração, de forma simplificada, consiste de um método que aplica regras simples de acústica geométrica para facilitar a interpretação de dados de medições de reflexão, auxiliando no correto imageamento de refletores. Nesse processo, os refletores são imageados, mas não há tentativa de se recuperar informações sobre os parâmetros do meio. A *inversão*, pelo contrário, tem como principal foco obter esses parâmetros do meio.

Neste trabalho, o interesse está em compreender os dados obtidos em investigações sísmicas, com o foco na migração de sinais. Este capítulo busca apresentar a configuração típica de uma investigação sísmica, assim como a formas de apresentar os dados obtidos, dando ênfase ao imageamento baseado na migração de Kirchhoff.

4.1 Investigações sísmicas

Um experimento de sísmica consiste em emitir um sinal na forma de pulso acústico, que por sua vez vai propagar pelo meio e interagir com estruturas presentes, de forma que a energia é difratada, transmitida (refratada) e refletida. O campo acústico resultante dessas interações, que carrega informação a respeito do meio analisado, é então medido por sensores [95].

A Figura 4.1 ilustra uma configuração típica para uma investigação no ambiente submerso. Neste esquema a subsuperfície foi representada como um meio composto por uma série de camadas de substrato, cada uma possuindo diferentes propriedades geoacústicas. A fonte sonora emite uma onda que nas interfaces entre camadas, devido à diferença de impedância acústica entre os meios, sofre os fenômenos de reflexão e transmissão [77]. A onda transmitida é refratada – tem seu ângulo de propagação alterado – devido às propriedades dos meios. O sinal resultante dessas interações é medido por um arranjo de N hidrofones, cada um medindo um sinal g_n .

O objetivo da investigação sísmica ou acústica é obter informações sobre o meio analisado com base nas características dos sinais medidos.

4.1.1 Dados de uma investigação de sísmica

Uma forma inicial de expor dados medidos por uma configuração similar à apresentada na Figura 4.1, consiste em apresentar cada um dos sinais no tempo – usualmente chamados de traços – de acordo com a distância entre seus respectivos receptores e a fonte¹. A Figura 4.2 (a) apresenta um resultado típico para uma configuração com sete hidrofones e uma fonte centrada no arranjo, para a presença de uma interface. Esse tipo de apresentação de resultado pode ser encontrado com alguns nomes diferentes na

¹ O chamado *offset* em inglês.

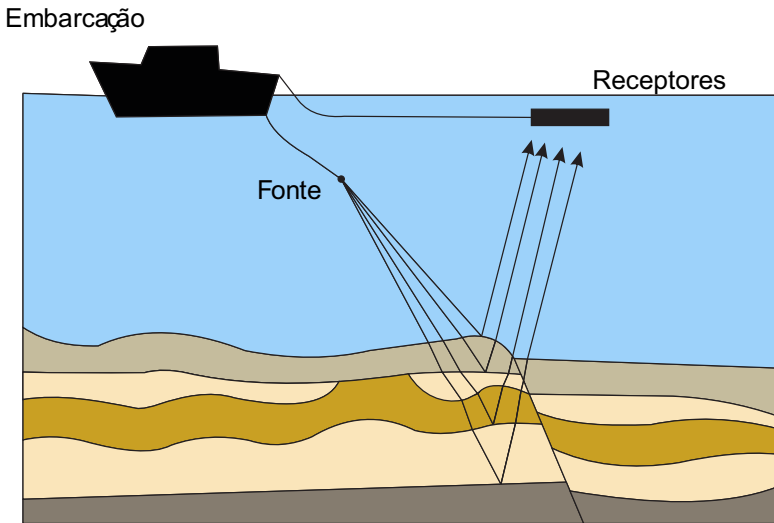


Figura 4.1.: Esquema de uma investigação acústica em ambiente marinho.

literatura, como sismogramas, perfis sísmicos², seções sísmicas³. Verifica-se que os pulsos refletidos pela interface geológica se apresentam com formato hiperbólico no plano distância – tempo, isso vale para qualquer onda esférica incidindo sobre um arranjo linear conforme descrito por Margrave [95]. Sabendo desse comportamento, uma das ferramentas amplamente utilizadas para melhorar a interpretação dos dados consiste em compensar esse efeito (Figura 4.2 (b)), de forma a apresentar os traços como se os mesmos fossem gerados por um par fonte-receptor em mesma posição⁴, esse procedimento é usualmente chamado de remoção do sobretempo normal⁵(NMO).

Outra técnica de pré-processamento importante a ser citada devido a sua ampla utilização em medições sísmicas é o agrupamento de traços⁶. Esse processamento consiste em empilhar sinais

² Do inglês, *seismic profile*

³ Do inglês, *seismic section*

⁴ Configuração chamada *zero-offset* em inglês.

⁵ Tradução do termo amplamente utilizado do inglês *normal moveout (NMO)*

⁶ Do inglês *gather*

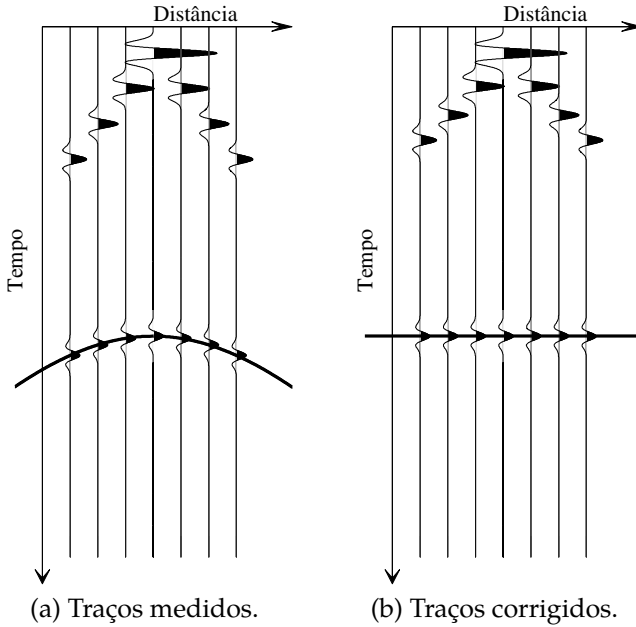


Figura 4.2.: Traços obtidos para uma configuração de medição com sete receptores e uma fonte coincidente com o receptor central.

recebidos pelos hidrofones – caso estes hidrofones cumpram uma série de requisitos, principalmente geométricos – em um único traço, de modo a melhorar a relação sinal ruído das medições.

Um exemplo da aplicação de um agrupamento de traços pode ser visto na Figura 4.3. Em cada uma das figuras, os traços medidos são apresentados na cor preta e o traço resultante da combinação de três (Figura 4.3 (a)), cinco (Figura 4.3 (b)) e sete (Figura 4.3 (c)) traços, são apresentados na cor azul. É perceptível que a combinação de um número maior de traços leva a uma redução da amplitude do ruído, e conseqüentemente a um melhoramento da relação sinal-ruído.

⁷ Do inglês *common midpoint gather (CMP)*

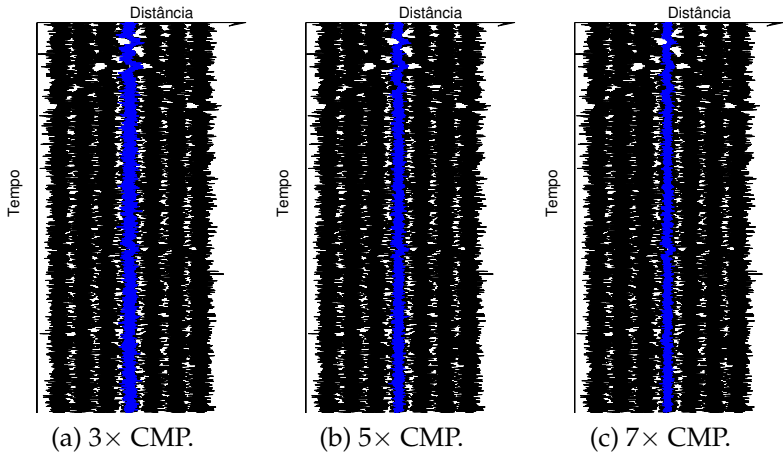


Figura 4.3.: Os sismogramas apresentam a aplicação de um tipo de técnica de agrupamento, chamada agrupamento do ponto médio comum⁷, sendo para cada uma utilizado um número diferente de traços na combinação do agrupamento.

4.2 Migração

Uma última técnica, que juntamente com o NMO e com o agrupamento de traços, forma os pilares do processamento de sísmica, é a migração [96]. Conforme definido por Gray [76], a migração é um método baseado na equação da onda que remove distorções das medições sísmicas ao transpor eventos para suas verdadeiras posições espaciais e ao realocar a energia difratada de volta aos espalhadores que a originou. Dessa forma, a migração permite delinear detalhadamente características da superfície e da subsuperfície de fundo do ambiente investigado.

Quando se fala em migração, é comum diferenciá-la como uma migração do tempo⁸ ou como uma migração da profundidade⁹. A grande diferença entre esses dois tipos de migração, diz respeito aos perfis de velocidade de propagação da onda utilizados durante a migração dos dados. Em uma migração do tempo, para cada ponto do ambiente a ser imageado é atribuído um valor de velocidade

⁸ Tradução literal do inglês *time migration*.

⁹ Tradução literal do inglês *depth migration*.

constante, o qual é utilizado no processo de migração, sendo que esses valores não necessariamente correspondem com o perfil real de velocidades. Já a migração de profundidade, dado um perfil real de velocidades, produziria uma imagem conforme o ambiente imageado, o problema desse método está no fato de que esses perfis de velocidade não estão prontamente acessíveis e envolvem um processo de estimativa, tornando o método complexo e custoso.

As técnicas de migração ainda podem ser divididas em três outros grandes grupos: (1) as técnicas baseadas na solução de equação da onda na forma integral; (2) as técnicas baseadas em diferenças finitas e (3) as técnicas baseadas na transformação de coordenadas para o domínio frequência-número de onda. Explicando brevemente, as técnicas baseadas em diferenças finitas partem do princípio de que um perfil sísmico medido por uma configuração em *zero-offset*¹⁰ pode ser gerado por um modelo onde fontes pontuais distribuídas ao longo da superfície refletora disparam ao mesmo tempo, de forma que a frente de onda para o tempo $t = 0$ s deve ter a mesma forma da superfície refletora, bastando então extrapolar o campo sonoro medido no arranjo de receptores para as demais profundidades e avaliar a distribuição de energias para o tempo $t = 0$ s. As técnicas baseadas na transformação de coordenadas tem como princípio transformar os traços medidos no domínio do tempo e espaço para o domínio da frequência e número de onda, permitindo fazer a continuação¹¹ e o imageamento em um único passo. A migração de Kirchhoff, por sua vez, será a técnica utilizada ao longo deste trabalho, cabendo uma descrição mais profunda do seu embasamento teórico.

4.2.1 Migração de Kirchhoff

A migração de Kirchhoff [83] está intimamente ligada ao princípio de Huygens citado na Seção 3.1.2, de forma que seu

¹⁰ Par fonte-receptor em mesma posição.

¹¹ Um termo muito utilizado quando a migração é explicada vem do inglês *downward continuation* e significa extrapolar/continuar o campo acústico conhecido em determinados pontos (nos receptores) para as maiores profundidades.

embasamento matemático parte da Equação (3.10). A configuração do experimento de sismica assume que no volume investigado não existem fontes, apenas refletores e espalhadores, e também assume que não existem valores iniciais anteriores ao pulso emitido pela(s) fonte(s), de forma que a integral sobre o volume presente na Equação (3.10) pode ser ignorada [83], restando apenas a integral de superfície

$$p(\mathbf{r}, t) = \int dt_0 \int_{S_0} \left[\mathcal{G} \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} p(\mathbf{r}_0, t_0) - p(\mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \mathcal{G} \right] dS, \quad (4.1)$$

com o valor $p(\mathbf{r}_0, t_0)$ representando os valores medidos nos receptores. Isso limita as possibilidades da função de Green \mathcal{G} , que deve ter valor zero em toda a superfície S_0 de modo a garantir que o gradiente de $p(\mathbf{r}_0, t_0)$ em S_0 , uma grandeza física de difícil obtenção, seja eliminado. Uma das possíveis funções que possui essas propriedades representa uma fonte pontual localizada em \mathbf{r}_0 somada a sua imagem negativa em relação ao plano $Z = 0$ m, aplicando essa função à Equação (4.1) e simplificando, obtém-se

$$p(\mathbf{r}, t) = \int dt_0 \int_{S_0} p(\mathbf{r}_0, t_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left[\frac{\delta(t_0 - t - \frac{R}{c})}{R} \right] dS, \quad (4.2)$$

com $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ e δ é a função Delta de Dirac [97]. Essa equação pode ser mais uma vez simplificada, considerando S_0 o plano $Z = 0$ m e realizando a integração em t_0 , logo:

$$p(\mathbf{r}, t) = - \frac{\partial}{\partial z} \int_{S_0} \frac{p(\mathbf{r}_0, t + \frac{R}{c})}{R} dS. \quad (4.3)$$

A Equação (4.3) ainda não representa diretamente a migração, pois ela não fornece um único valor para cada ponto no espaço, mas sim um valor $p(\mathbf{r}, t)$ função do tempo. Para realizar a migração e obter um valor único para cada ponto do espaço, a Equação (4.3) deve ser avaliada no tempo em que o pulso emitido pela fonte s chega ao ponto avaliado \mathbf{r} , ou seja, deve-se aplicar $t = R_0/c$ [98], em que $R_0 = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|$ é distância entre a fonte s e o ponto de interesse \mathbf{r} .

Para um problema prático, não se conhece os valores de $p(\mathbf{r}_0, t)$

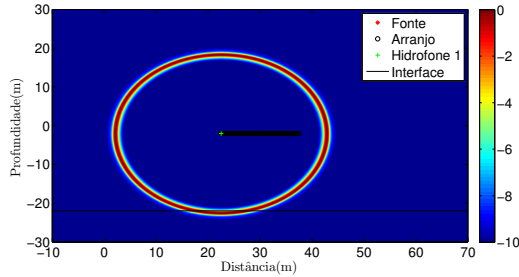
para toda a superfície, mas sim para pontos discretos nessa superfície onde estão localizados os transdutores. Desse modo, deve-se interpretar a Equação (4.3) para um número finito de pontos da superfície S_0 . Tem-se que a integral representa o somatório dos valores medidos para cada um dos hidrofones, sendo que cada região do espaço imageado é dada por seu devido tempo de viagem, tal que

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N p_i \left(\frac{R_0(\mathbf{r}) + R_i(\mathbf{r})}{c} \right). \quad (4.4)$$

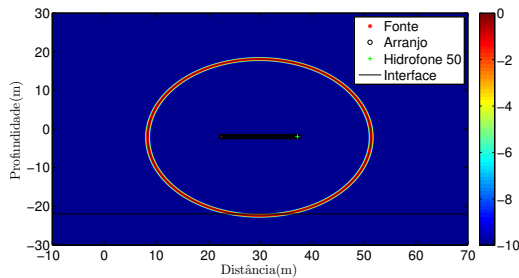
Esse resultado pode ser interpretado da seguinte maneira: o sinal medido em um determinado receptor para um determinado tempo t , pode conter informação de eventos de reflexão que ocorreram em qualquer ponto de uma elipse cuja soma dos tempos R/c e R_0/c seja igual a t , ou seja, cada ponto do espaço investigado agiria como uma fonte secundária de Huygens, emitindo uma cópia do pulso imediatamente após receber a incidência do sinal direto.

A Figura 4.4 mostra um exemplo do imageamento obtido para uma fonte e um arranjo dispostos na coluna d'água em um meio com apenas uma interface rígida. As Figuras 4.4 (a) e 4.4 (b) mostram as elipses resultantes do imageamento separado para apenas dois hidrofones, o primeiro colocado na mesma posição da fonte – e por essa razão apresentando um círculo ao invés de uma elipse – e o segundo deslocado 15 m na direção de x positivo. Pela definição do problema, sabe-se que existe apenas uma região no espaço na qual seriam observados valores, sendo essa a posição da reflexão especular em relação ao centro do arranjo, porém o sinal medido isoladamente pelos hidrofones não permite localizá-la. Para encontrar esse ponto – conforme descrito na Equação (4.4) – realiza-se somatório da resposta das elipses dos diversos pares fonte-receptor. O resultado dessa soma pode ser visto na Figura 4.4 (c), na qual se verifica que na proximidade dos pontos que realmente apresentam a superfície refletora, as amplitudes somam de forma coerente resultando em um resultado

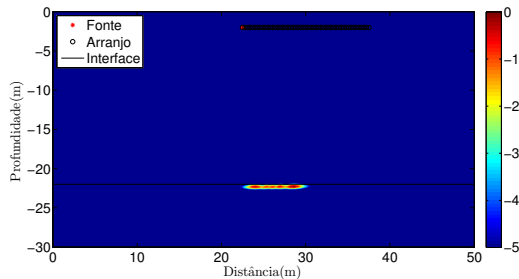
maior do que o observado nos pontos que não apresentam uma interface. Esse mapa pode ser interpretado como uma espécie de medição da probabilidade de a energia sísmica ser oriunda desses pontos [99].



(a) p_1 com hidrofone 1 posicionado na mesma posição da fonte.



(b) p_{50} com hidrofone 5 a 6 m da fonte.



(c) $p(\mathbf{r})$ somado para todos os hidrofones.

Figura 4.4.: Migração dos sinais de cada um dos hidrofones. As Figuras 4.4 (a) e 4.4 (b) mostram o imageamento separado para dois hidrofones e a Figura 4.4 (c) o imageamento completo.

4.3 O arranjo linear

Na Seção anterior, quando a Equação (4.4) foi escrita, deixou-se implícito um processo de amostragem do campo acústico no domínio do espaço e do tempo. No caso do domínio do espaço, os receptores realizam esta amostragem, sendo que sua geometria e suas propriedades influenciam em como o campo é medido: o comportamento observado pode ser direcional – maior sensibilidade para alguma direção de propagação – ou omnidirecional. Essa direcionalidade muitas vezes é desejável, pois pode melhorar a relação sinal-ruído da medição, a resolução dos resultados, assim como permitir uma melhor determinação da direção de chegada do sinal. Uma das formas de obter um sensor direcional é combinar um conjunto de receptores, chamado arranjo, e processar seus sinais individuais para formar um único sinal. Porém, uma série de fenômenos relacionados à amostragem e ao janelamento espacial devem ser levados em consideração quando da criação de um arranjo.

Ao amostrar o espaço em pontos discretos, com elementos periodicamente espaçados no caso de um arranjo uniforme linear, por exemplo, tem-se o comportamento de um filtro espacial e os dados medidos estarão sujeitos aos efeitos de *aliasing*, espalhamento¹² e o vazamento¹³ [100].

4.3.1 *Aliasing*

O efeito de *aliasing* ou "dobramento" acontece quando um espaço (ou sinal) contínuo é amostrado em porções discretas. O que pode acarretar na criação de cópias (ou *aliases* em inglês) que irão interferir na descrição do espaço (ou sinal) original contínuo.

Dada uma função $g(x, t)$ contínua em x , pode-se amostrá-la em um número finito de pontos através da sua multiplicação por um trem de impulsos [101] com espaçamento igual a d , de forma que

¹² Tradução do termo em inglês *smearing*.

¹³ Tradução do termo em inglês *leakage*.

a função amostrada $g_s(n, t)$ é uma combinação linear de deltas de Dirac modulados, conforme mostrado na Figura 4.6.

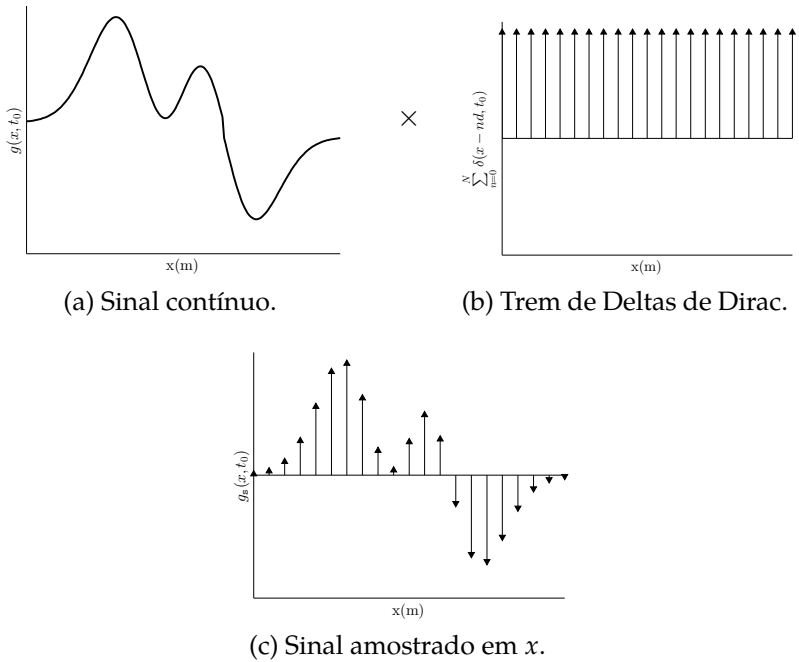


Figura 4.5.: Representação de um sinal contínuo e sua amostragem no domínio do espaço para um tempo qualquer t_0 .

Ao transformar o sinal amostrado para o domínio da *frequência espacial*, chamado domínio do número de onda, chega-se ao espectro amostrado

$$G_{ks}(k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[g(x, t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd, t) \right] e^{ikx} dx,$$

$$G_{ks}(k, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[g(x, t) e^{ikx} \cdot \delta(x - nd, t) \right] dx,$$

$$G_{ks}(k, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nd, t) e^{iknd}. \quad (4.5)$$

Analisando a Equação (4.5)¹⁴, percebe-se que G_{ks} é periódico com período em números de onda igual a $2\pi/d$. É possível mostrar que G_{ks} pode ser escrito como uma combinação linear de cópias deslocadas do espectro da função contínua, tal que

$$G_{ks}(kd, t) = \frac{1}{d} \sum_{p=-\infty}^{\infty} G_k \left(k - \frac{2\pi p}{d} \right), \quad (4.6)$$

essa equação implica que, caso o sinal contínuo $g(x, t)$ apresente componentes de frequência com número de onda $|k| > \pi/d$, a combinação das réplicas do espectro $G_k(k - 2\pi p/d)$ se sobrepõe (ocorre o *aliasing*), e G_{ks} é diferente de G_k em um período. A Figura 4.6, mostra o aparecimento de artefatos (lóbulos laterais) na localização de uma fonte pontual em campo livre devido ao *aliasing* espacial provocado pelo aumento da distância entre elementos d .

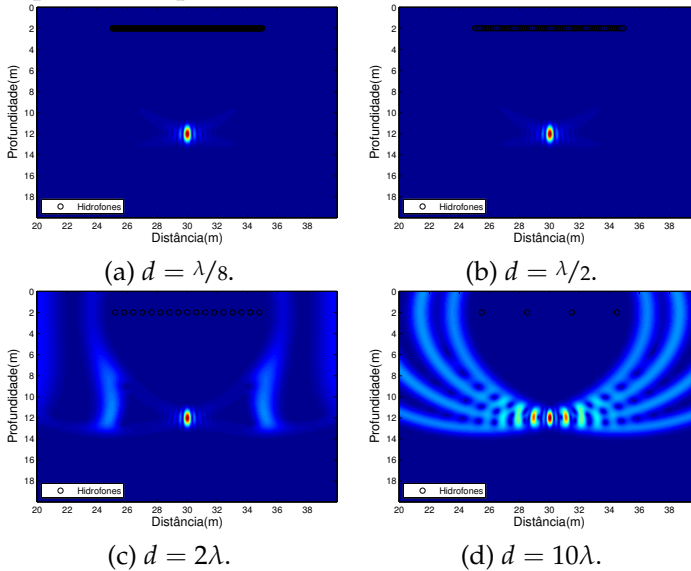


Figura 4.6.: Influência de *aliasing* espacial na localização de uma fonte pontual em campo livre emitindo um *chirp* de 3000 Hz a 7000 Hz por arranjos de 10 m para diferentes distâncias entre elementos (d).

¹⁴ Por uma questão de convenção foi utilizado o sinal positivo para a Transformada de Fourier e sinal negativo para a sua inversa.

4.3.2 Espalhamento e vazamento

Além de amostrar o espaço em pontos discretos, um arranjo de receptores estabelece limites ao espaço amostrado. Um arranjo com um número infinito de elementos por exemplo, quando tem seu comprimento limitado, funciona como uma janela espacial, tal que o sinal medido pode ser representado como

$$g_w(n, t) = g(x, t)w(x), \quad (4.7)$$

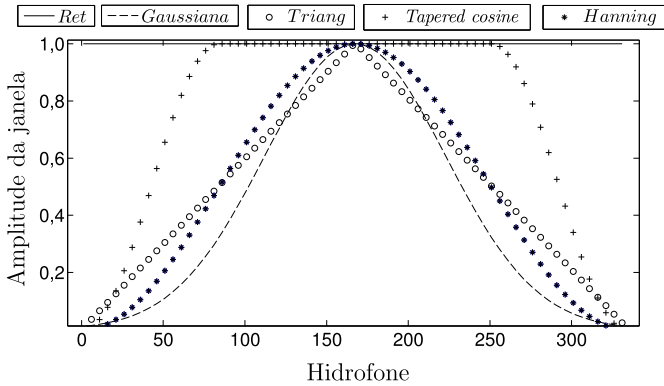
com os limites do arranjo prontamente considerado ao assumir valores zero para a janela w em regiões não cobertas pelo arranjo. Dessa forma, tem-se que o espectro no domínio de número de onda do sinal medido é a convolução do espectro do sinal com o espectro da janela

$$G_w(k, t) = \int_{-\pi/d}^{\pi/d} G(\kappa, t)W(k - \kappa) d\kappa.$$

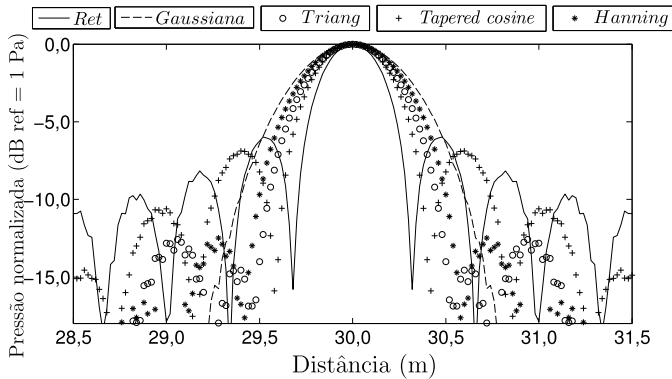
Para um caso de uma janela retangular, tem-se que o espectro G será convoluído com um seno amortecido, isso implica em um espalhamento do espectro em um lóbulo principal e seu vazamento em lóbulos laterais. Com o objetivo de alterar os efeitos de espalhamento e vazamento, é possível aplicar diferentes janelas w como peso durante o imageamento. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram diferentes janelas (Figura 4.7 (a)) e os seus efeitos na localização de uma fonte emitindo um sinal de onda contínua¹⁵ de 5000 Hz.

Na Figura 4.7 (b) é possível ver a resposta obtida na linha (plano) em que a fonte está presente. A Figura 4.8 mostra o mesmo estudo, mas para o imageamento em todas as linhas. A grande diferença entre as respostas para cada janela está no compromisso entre a largura do lóbulo principal e a amplitude e decaimento dos lóbulos laterais.

¹⁵ Um sinal de amplitude e frequência contínuos, do inglês *contiuos wave* (CM).



(a) Janelas.

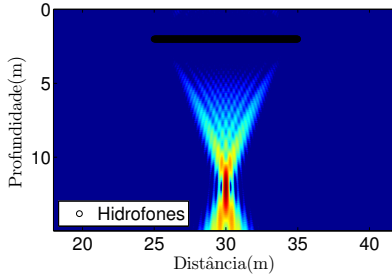


(b) Resposta.

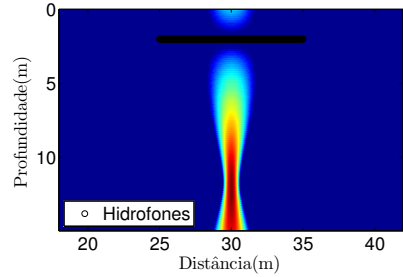
Figura 4.7.: Resultado de imageamento obtido apenas na mesma linha que fonte. O sinal de entrada é um seno de 5000 Hz, com um arranjo de 10 m e 333 hidrofones ($d = \lambda/10$) para diferentes pesos w .

Para a janela retangular, obtém-se a menor largura de pico, o que seria uma boa característica para um sistema em que se deseja encontrar fontes próximas, porém os lóbulos laterais tem uma amplitude grande quando comparado às outras janelas e inserem artefatos na imagem que podem ser confundidos com fontes. As demais janelas seguem uma mesma tendência: aumentando a largura do lóbulo principal em relação ao obtido com a janela retangular, reduzindo a amplitude e aumentando o decaimento dos lóbulos laterais. Janelas como a Gaussiana e a Hanning

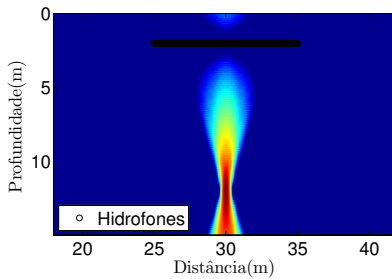
[101] apresentam grande redução dos lóbulos laterais, mas perdem resolução na direção transversal, pois o lóbulo principal é quase duas vezes maior do que aquele obtido com a janela retangular.



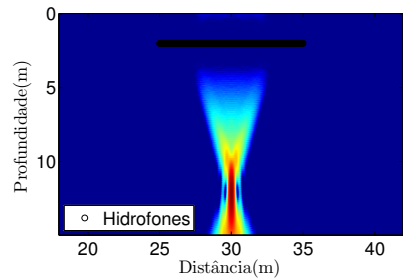
(a) Retangular.



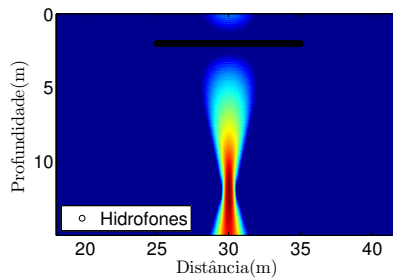
(b) Gaussiana.



(c) Triangular.



(d) Tukey.



(e) Hanning.

Figura 4.8.: Imageamento de uma fonte em regime permanente emitindo um seno de 5000 Hz, com um arranjo de 10 m e 333 hidrofones ($d = \lambda/10$) para diferentes pesos w .

4.3.3 Relação sinal-ruído e resolução espacial

Busca-se uma combinação de configuração de arranjo e de sinal de entrada da fonte cujo sinal medido, após imageado, represente da melhor maneira possível o ambiente de interesse. Para tal, é importante que a relação sinal-ruído e a resolução espacial obtidos sejam satisfatórios.

4.3.3.1 Relação sinal-ruído

A relação sinal-ruído é definida como a razão entre a potência do sinal de interesse P_{sinal} e a potência do ruído $P_{\text{ruído}}$,

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{sinal}}}{P_{\text{ruído}}} . \quad (4.8)$$

Durante uma medição não se tem controle sobre a potência do ruído, de forma que a opção direta para melhorar a relação sinal-ruído seria aumentar a potência inserida.

A primeira forma de aumentar a potência inserida consiste em aumentar a potência aplicada na fonte, porém existe um limite para essa potência, pois a partir de certo nível ocorre formação de bolhas na superfície do transdutor por meio do fenômeno de cavitação [102]. Essas bolhas resultam em perdas de potência sonora devido à absorção e o espalhamento que adicionam. A outra forma de aumentar a potência inserida consiste em manter a potência da fonte e aumentar o tempo em que ela fica ativa, esse método é eficiente mas requer uma avaliação da forma do sinal emitido, pois impacta diretamente na resolução espacial do sistema de medição. No Capítulo 5 será apresentado o *matched filtering*, uma técnica de processamento que permite o uso de sinais longos, mantendo boa resolução espacial.

4.3.3.2 Resolução espacial

A resolução espacial descreve a habilidade do sistema de medição em distinguir diferentes objetos localizados em diferentes posições no espaço, ou seja, ela descreve o nível de detalhamento

alcançável no processo de imageamento. Nesse sentido existem dois quesitos que devem ser levados em consideração na definição da resolução espacial, o primeiro envolve o tamanho do pulso sonoro enviado, e o segundo envolve a geometria do arranjo.

Como a identificação do ambiente é realizada por meio da leitura dos ecos do pulso enviado, o tamanho desse pulso define a menor dimensão possível para se diferenciar alvos na direção radial em relação ao centro do arranjo. A fórmula usualmente utilizada para caracterizar essa resolução radial é dada [40]

$$R_d = \frac{c_0}{2} T_p, \quad (4.9)$$

com uma resolução na direção de propagação R_d observada em função do tamanho do pulso T_p (Figura 4.10). Quanto menor R_d maior é o nível de detalhamento obtido pelo sistema de medição, seria então esperado que idealmente o pulso gerado deveria ser o menor praticável, de modo a se obter a melhor resolução possível. Porém, conforme citado anteriormente, a relação sinal-ruído também está relacionada de maneira direta com o tamanho de pulso, o que estabelece uma relação de compromisso entre a resolução espacial e a relação sinal-ruído.

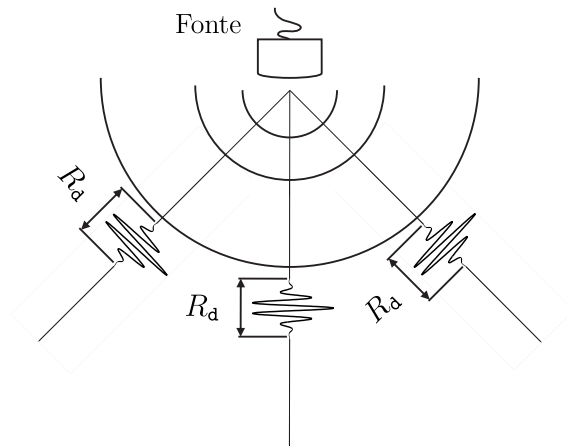


Figura 4.9.: Esquema para compreensão do conceito de resolução radial.

Uma forma de contornar esse problema envolve utilizar um sinal de frequência modulada, também chamado de *chirp* ou *sine sweep*, em conjunto com um processamento de *matched filter*¹⁶. O procedimento de *matched filtering* permite a localização de um sinal conhecido, mesmo quando somado a um ruído de fundo desconhecido [103], por meio da aplicação de uma operação de correlação cruzada entre o sinal medido $g(t)$ e o sinal de entrada conhecido $s_{in}(t)$:

$$g_{\text{matched}} = E [s_{in}(t)g(t + \Delta_t)], \quad (4.10)$$

$$g_{\text{matched}} = \mathcal{F}^{-1} \{S(f)G^*(f)\} \quad (4.11)$$

sendo \mathcal{F}^{-1} a Transformada inversa de Fourier, g_{matched} o sinal filtrado, δ_t o atraso, $S_{in}(f)$ e $G(f)$ as Transformadas de Fourier de $s_{in}(t)$ e $g(t)$, respectivamente, e $(\cdot)^*$ indica o conjugado complexo. O resultado desse procedimento é uma réplica da autocorrelação do sinal $s_{in}(t)$ para cada instante de tempo em $g(t)$ em que ele é observado. Quando aplicados para $s_{in}(t)$ do tipo *chirp* esse procedimento tem o efeito de comprimir o sinal em um pulso de tamanho proporcional à largura de banda (BW) do *chirp* [6]. Tornando a resolução função desta largura de banda:

$$R_d = \frac{c_0}{2BW} \cdot \quad (4.12)$$

Esse procedimento alcança boas resoluções espaciais para tamanhos maiores de pulso, o que possibilita uma maior relação sinal-ruído.

O segundo quesito que deve ser levado em conta quando da definição de resolução espacial é a geometria do arranjo. Para arranjos lineares sabe-se que o seu comprimento total, usualmente chamado de abertura do arranjo, e que o plano de imageamento, afetam diretamente nos resultados de obtidos. O conceito de resolução de Rayleigh, bastante difundido na literatura e profundamente discutida em [104, 105], estipula uma equação

¹⁶ Termo usualmente utilizado que poderia ser traduzido diretamente como "filtro casado".

para calcular a resolução na direção transversal em função dos fatores citados anteriormente, sua forma simplificada é dada por

$$R_{\perp} = \frac{H}{L_{\theta}} \lambda_{\max}, \quad (4.13)$$

com H representando a distância entre o arranjo e o plano focal, λ_{\max} o maior comprimento de onda das frequências analisadas e L_{θ} a abertura aparente do arranjo, dada por $L_{\theta} = L \sin(\theta)$ sendo θ o ângulo com o qual a onda incide no arranjo.

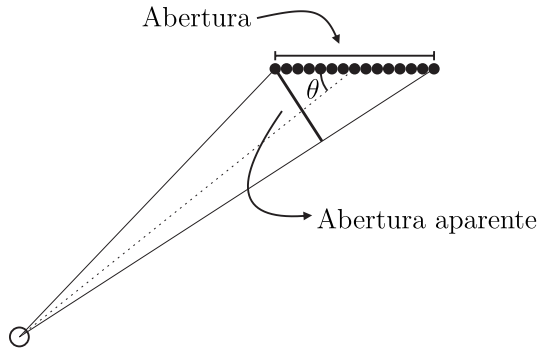


Figura 4.10.: Abertura aparente do arranjo, enxergada por uma onda incidente com uma angulação θ .

De acordo com a Equação (4.13), uma boa resolução poderia ser garantida com o aumento da abertura do arranjo, porém ela considera um arranjo de abertura contínua, com infinitos elementos ao longo do seu comprimento, quando na realidade um arranjo tem um número finito de elementos. Como visto na Seção 4.3.1, a discretização do arranjo implica em uma amostragem espacial sujeitando o imageamento ao fenômeno de *aliasing* e o aparecimento de lóbulos espúrios durante o imageamento com um arranjo linear de receptores pode ser evitado ao se respeitar a condição dada por [105, 106]

$$d \leq \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad (4.14)$$

sendo λ_{\min} o menor comprimento de onda avaliado na análise.

5 Algoritmo de detecção de objetos enterrados

Conforme exposto nos capítulos anteriores, a concepção de um método para a detecção de objetos enterrados na subsuperfície de ambientes submersos traria grande benefício para a indústria de extração e distribuição de petróleo, mas também poderia ser usufruído na localização de artefatos arqueológicos e no planejamento e acompanhamento de obras civis como pontes e portos.

O método proposto neste trabalho parte de medições ou simulações em que um pulso acústico é gerado por uma fonte localizada na coluna d'água, o sinal refletido juntamente com os sinais espalhados pelo ambiente é medido por um arranjo de hidrofones. A partir da leitura desses dados é possível extrair informações do sistema, porém é necessário interpretá-los, pois junto com as informações de interesse – relacionadas aos objetos enterrados – estão somados diversos efeitos, como as reflexões nas interfaces geológicas, o ruído ambiente, as múltiplas reflexões na superfície do mar, o relevo e a rugosidade da subsuperfície e as ondas espalhadas por heterogeneidades, como peixes e algas na coluna d'água. Algumas dessas complexidades – como as múltiplas reflexões, o relevo e a rugosidade do fundo e a presença de espalhadores na coluna d'água – não serão consideradas neste trabalho. Mas ainda assim, o algoritmo de detecção deve aplicar algumas ferramentas que facilitem a interpretação dos dados medidos.

A Figura 5.1 ilustra como o algoritmo de detecção de objetos

enterrados é dividido. Inicialmente é aplicado um *matched filter*, com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído e permitir a localização de ecos. O sinal referente ao caminho direto entre a fonte e os hidrofones é retirado do sinal. Os dados filtrados são então imageados com o algoritmo de imageamento de fonte imagem. Como os resultados desse imageamento apresentam muita informação não correlacionada, que podem mascarar a posição das fontes imagem, utiliza-se um fator de coerência como máscara para restringir o espaço de busca das fontes imagem. Na sequência, antes de se realizar a localização das fontes imagem, é aplicado um Filtro Gaussiano em duas dimensões, para suavizar a imagem e reduzir o número de máximos locais. Com essa imagem restringida e filtrada, realiza-se a localização das fontes imagem. Tendo a posição das fontes imagem, é possível realizar a filtragem dos sinais de reflexões nas interfaces geológicas para cada hidrofone. O último passo é realizar o imageamento clássico com os dados filtrados, permitindo a localização dos espalhadores enterrados.

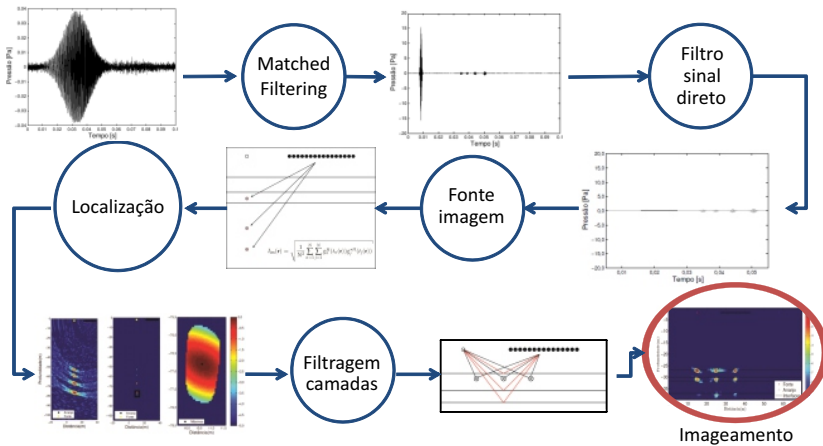


Figura 5.1.: Fluxograma das ferramentas implementadas no algoritmo de detecção de espalhadores enterrados.

Este capítulo apresenta a teoria envolvida em cada um dos passos descritos na Figura 5.1.

5.1 *Matched Filtering*

Devido à complexidade do ambiente submerso, o sinal medido por um arranjo de hidrofones acaba por apresentar sinais não correlacionados com o pulso enviado, que são registrados como ruído nas medições. No Seção 3, o *matched filter* foi apresentado como uma ferramenta aplicada para se obter uma melhor relação sinal-ruído, porém cabe definir de forma detalhada o conceito do *matched filter* e o resultado prático de sua aplicação.

Sistemas de sonar são um bom exemplo de aplicações em que se deseja localizar um sinal conhecido em meio a ruídos não correlacionados, o filtro projetado para cumprir essa função deve corresponder com o sinal conhecido, por essa razão este tipo de filtro é chamado de *matched filter* [103]. Para compreender melhor a construção do *matched filter*, parte-se de um exemplo simples, um sinal medido $y(t)$, composto por um sinal conhecido $s(t)$, ponderado por α , atrasado em t_1 e na presença de ruído $n(t)$:

$$y(t) = \alpha s(t - t_1) + n(t). \quad (5.1)$$

Deseja-se então projetar um filtro $m(t)$ que quando aplicado à $y(t)$ resulte em uma função que permita que o atraso t_1 possa ser facilmente localizado. A função ideal para realizar essa localização seria uma que apresentasse valores apenas para $t = t_1$, ou seja, deseja-se que a convolução do sinal medido com o filtro seja um Delta de Dirac, assim:

$$\begin{aligned} y(t) * m_{\text{ideal}}(t) &= [\delta(t - t_1) * \alpha s(t) * m_{\text{ideal}}(t)] + n(t) * m_{\text{ideal}}(t), \\ &= \alpha \delta(t - t_1) + 0(t), \end{aligned} \quad (5.2)$$

sendo o símbolo $*$ o operador convolução, e $0(t)$ uma representação do valor zero para qualquer tempo t . Para o domínio da

frequência, tem-se

$$\begin{aligned} Y(f)M_{\text{ideal}}(f) &= e^{-2i\pi ft_1} \alpha S(f)M(f) + N(f)M_{\text{ideal}}(f), \\ &= \alpha e^{-2i\pi ft_1} + 0(f), \end{aligned} \quad (5.3)$$

sendo $Y(f)$ a Transformada de Fourier de $y(t)$ e $M_{\text{ideal}}(f)$ a Transformada de Fourier do filtro $m_{\text{ideal}}(t)$, usualmente chamada de função de transferência do filtro. As Equações (5.2) e (5.3) determinam duas condições que devem ser satisfeitas. A primeira condição

$$n(t) * m_{\text{ideal}}(t) = 0(t) \Rightarrow N(f)M_{\text{ideal}}(f) = 0(f), \quad (5.4)$$

não traz conclusões construtivas, pois para que seja satisfeita, das duas uma, ou $N(f) = 0$ Pa ou $M(f) = 0$. Já a segunda condição determina que

$$\alpha s(t) * m_{\text{ideal}}(t) = \delta(t) \Rightarrow \alpha S(f)M_{\text{ideal}}(f) = 1(f). \quad (5.5)$$

A Equação (5.5), permite verificar que o *matched filter* projetado deve ser recíproco ao sinal conhecido $s(t)$, chegando-se às seguintes formas para a função de transferência do filtro:

$$M_{\text{ideal}}(f) = \frac{1}{\alpha S(f)} = \frac{S^*(f)}{\alpha |S(f)|^2} = \frac{e^{-i\phi(S(f))}}{\alpha |S(f)|}, \quad (5.6)$$

com ϕ sendo a fase do sinal S . Essas expressões por si só limitam o filtro, pois exigem que $S(f) \neq 0$ para todo f , mas sua análise é importante por fornecer indícios de como deve ser a forma do *matched filter*. Utilizando a segunda igualdade para construir a resposta impulsiva do filtro, tem-se

$$\begin{aligned} m_{\text{ideal}}(t) &= \mathcal{F}^{-1} \{S^*(f)\} * \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{1}{\alpha |S(f)|^2} \right\}, \\ &= \frac{1}{\alpha} s^*(-t) * \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{1}{|S(f)|^2} \right\}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

O primeiro termo, $s^*(-t)$ cancela a fase do sinal conhecido

$s(t)$, fazendo com que o conteúdo da fase contenha apenas a informação do deslocamento t_1 , enquanto que o segundo termo $\mathcal{F}^{-1}\{|S(f)|^{-2}\}$ compensa $S(f)$ para as frequências nas quais seus valores sejam pequenos, de forma a garantir que o resultado do sinal filtrado seja o mais próximo de um Delta de Dirac. Porém esse termo de amplificação pode ser um problema quando o ruído presente em $y(t)$ for de banda larga [103], pois qualquer ruído presente nas frequências em que $S(f) \ll 1$ será amplificado. Para casos reais, uma estratégia para evitar esse problema envolve desconsiderar o termo de amplificação

$$m(t) = s^*(-t). \quad (5.8)$$

Essa equação define o *matched filter* clássico. Aplicando o filtro ao sinal medido tem-se que

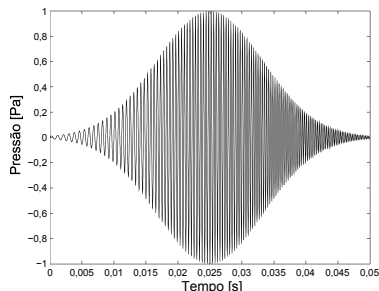
$$\begin{aligned} y(t) * s^*(-t) &= \alpha\delta(t - t_1) * s(t) * s^*(-t) + n(t) * s^*(-t) \\ &= \alpha\delta(t - t_1) * R_{ss}(t) + n(t) * s^*(-t) \end{aligned} \quad (5.9)$$

sendo R_{ss} a autocorrelação do sinal s . Ou seja, nesta equação é verificada a afirmação dada na Seção 3 de que a aplicação do *matched filter* resulta em um cópia escalonada da autocorrelação do sinal de entrada para cada tempo em que ele se repetir.

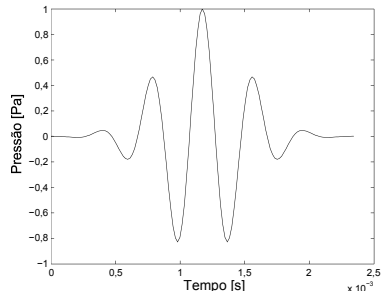
A Figura 5.2 é apresentada com o intuito de ilustrar a aplicação do filtro para diferentes sinais de entrada. As Figuras 5.2 (a) e 5.2 (b) mostram dois sinais utilizados como fonte, o primeiro sendo um *chirp* de 0,05 s com frequência inicial de 1000 Hz e final de 4000 Hz modulado por uma Gaussiana de desvio padrão $1/3$ e o segundo sendo um pulso com espectro Gaussiano¹ centrado em 2500 Hz e com largura de banda de 3000 Hz. Aplicando esses sinais como entrada em uma simulação (conforme a configuração 47# (Tabela 6.3) sem os espalhadores) e adicionando um ruído da mesma ordem de grandeza que as reflexões, obtém-se para o primeiro hidrofone do arranjo os sinais medidos mostrados nas Figuras 5.2 (c) e 5.2 (d). Aplica-se então o *matched filter*

¹ Um espectro com forma Gaussiana, com desvio padrão tal que garante uma largura de banda de 3000 Hz.

para ambos os sinais, resultando nas Figuras 5.2 (e) e 5.2 (f). Destaca-se que, para ambos os sinais, a aplicação do *matched filter* confere considerável redução do ruído de fundo, permitindo a localização das reflexões. Porém uma diferença perceptível entre a Figuras 5.2 (e) e 5.2 (f) é observada na relação sinal-ruído, sendo esta perceptivelmente maior quando utilizado um *chirp* como sinal de entrada.



(a) Chirp modulado.



(b) Pulso.

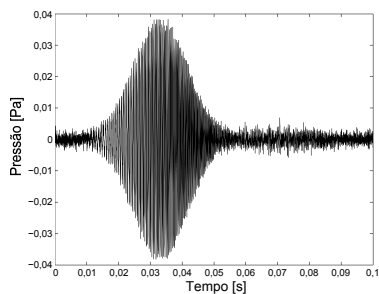
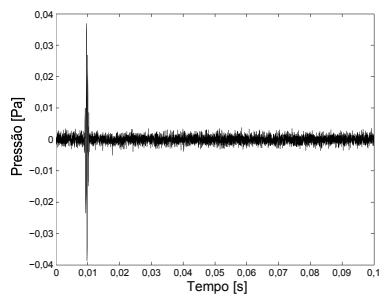
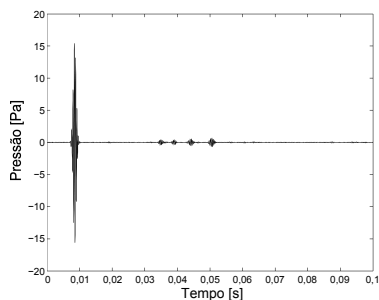
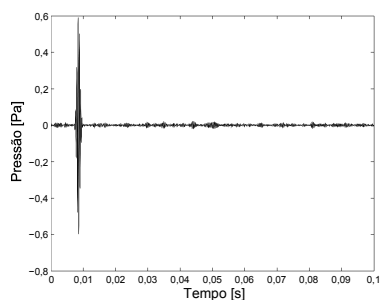
(c) Chirp + $n(t)$.(d) Pulso + $n(t)$.(e) Chirp *Matched filter*.(f) Pulso *Matched filter*.

Figura 5.2.: Resultado da aplicação do *matched filter* para um sinal simulado quando o pulso de entrada é um *chirp* modulado por uma Gaussiana ou um pulso.

5.2 Filtragem do sinal direto

Verifica-se na Figura 5.2 (e) que o sinal que incide diretamente da fonte no hidrofone possui uma amplitude muito maior do

que aquela observada proveniente das reflexões nas camadas geológicas. Essa mesma diferença será observada na imagem gerada a partir desses sinais, o que pode dificultar na interpretação do mapa e na localização das fontes imagens. Propõe-se então a retirada do sinal referente ao caminho direto entre a fonte e os hidrofones.

O primeiro passo para a filtragem do sinal direto passa por definir a duração do pulso comprimido. Uma forma de obter esse valor consiste em identificar a duração do pulso obtido com a auto-correlação do sinal de entrada, já que, sabe-se que os pulsos observados no sinal filtrado são justamente cópias escalonadas da auto-correlação do sinal de entrada.

Primeiramente, com o objetivo de facilitar a obtenção automática dessa duração do pulso, é utilizado um artifício matemático. São derivados sinais analíticos a partir dos sinais medidos para cada um dos hidrofones. Esse sinal analítico é uma forma de representar um sinal real $g_n(t)$ como um sinal complexo, tal que

$$g_n^H(t) = g_n(t) + i\mathcal{H}\{g_n(t)\}, \quad (5.10)$$

na qual $g_n^H(t)$ é o sinal analítico do hidrofone n e \mathcal{H} é o operador Transformada de Hilbert. Representar o sinal dessa forma facilita algumas manipulações matemáticas, pois ela permite representar o sinal por uma amplitude e uma fase instantâneas, logo:

$$g_n^H(t) = \hat{G}(t)e^{i\phi(t)}, \quad (5.11)$$

com $\hat{G}(t)$ representando a amplitude instantânea e ϕ a fase instantânea do sinal. Essa forma de representação, promove fácil acesso à envoltória do sinal, bastando calcular a magnitude do seu sinal analítico. A Figura 5.3 mostra um exemplo de sinal resultante da auto-correlação do sinal de entrada e seu envoltório obtido através da magnitude de seu sinal analítico.

Tendo a envoltória da auto-correlação do sinal de entrada, basta encontrar o tamanho do vetor para o qual os valores são maiores que zero para se encontrar a duração do pulso. Porém, devido a forma como o cálculo computacional é realizado, os valores

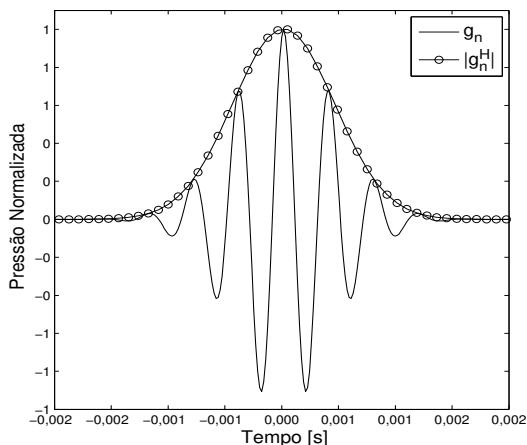


Figura 5.3.: Exemplo de um sinal resultante do processamento de *match filtering* e sua envoltória obtida através da magnitude de seu sinal analítico.

não são exatamente zero, tornando necessário estipular um limite manual para o zero aproximado. Com o intuito de automatizar este processo, verificou-se que ao apresentar esta envoltória com uma escala em decibels, são observados diversos mínimos locais, conforme pode ser visto na Figura 5.4. A distância entre os dois mínimos mais próximos à região central foi escolhida como a duração do pulso.

Com a duração do pulso em mãos, o procedimento para a retirada do sinal direto envolve localizar o tempo em que o sinal direto ocorre e aplicar uma janela do tamanho do pulso na qual os valores são subtraídos, assim,

$$g_n^{\text{dir}}(t) = g_n(t) - g_n(t)\Pi(t - t_{dn}) \quad (5.12)$$

na qual g_n^{dir} representa o sinal para o hidrofone n sem o sinal direto, t_{dn} representa o tempo de percurso da fonte até o hidrofone n e Π uma janela tal que,

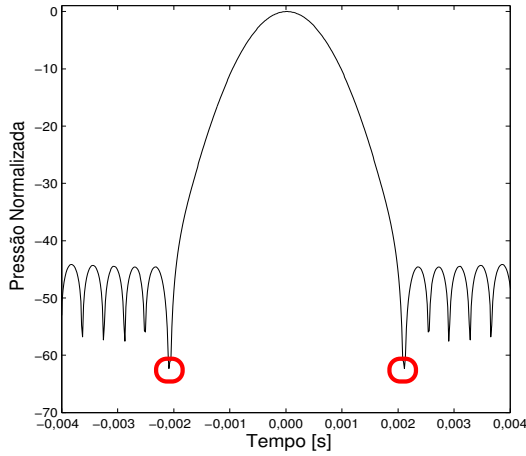
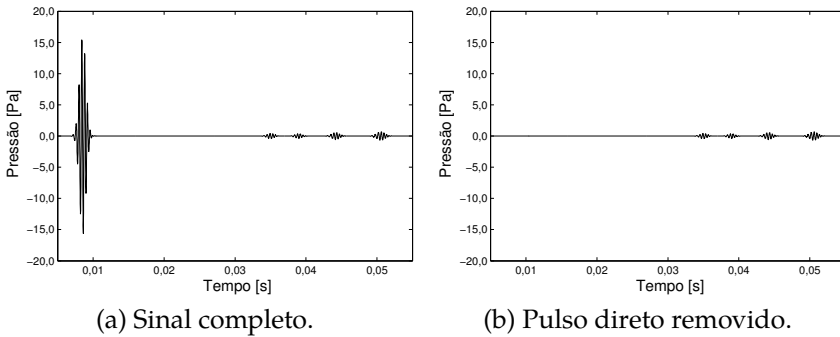


Figura 5.4.: Mesma envoltória do sinal conforme Figura 5.3, mas apresentada na escala dB (ref = 1).

$$\Pi(t - t_{dn}) = \begin{cases} 1 & t < (t_{dn} - \frac{\tau_p}{2}) \\ 0 & (t_{dn} - \frac{\tau_p}{2}) \leq t \leq (t_{dn} + \frac{\tau_p}{2}) \\ 1 & t > (t_{dn} + \frac{\tau_p}{2}) \end{cases} \quad (5.13)$$

sendo τ_p a duração do pulso. A Figura 5.5 mostra o resultado desse processamento.



(a) Sinal completo.

(b) Pulso direto removido.

Figura 5.5.: Exemplo de um sinal resultante do processamento de filtragem do pulso direto.

5.3 Imageamento de Fonte Imagem

A próxima etapa no procedimento de localização de objetos enterrados envolve identificar as interfaces geológicas. Pinson [8, 9, 107] desenvolve um método sísmico para a determinação de parâmetros geoacústicos baseado na representação do campo acústico em um ambiente submerso como a sobreposição do campo de fontes imagem. A escolha de representar o sistema dessa forma, como comenta o autor, permite identificar o número de camadas e suas características. As próximas seções descrevem o método da fonte imagem, as devidas aproximações assumidas para que o mesmo seja válido para o problema proposto, e a sua utilização para a identificação das interfaces geológicas em um ambiente submerso.

5.3.1 Método da fonte imagem

O método da fonte imagem é um dos métodos mais utilizados para o modelamento da propagação acústica em ambientes fechados (acústica de salas), ele consiste em uma forma meticulosa de construir uma solução da função de Green para diversas condições de contorno [108]. Esse método tem suas raízes em ótica geométrica, porque a sua aplicação passa por assumir os contornos nos quais a onda acústica incide como espelhos, produzindo uma fonte virtual da fonte real espelhada em relação ao contorno [109]. Tem-se que o tempo para a propagação da onda da fonte virtual ao receptor será exatamente igual ao tempo de propagação da fonte real ao receptor pelo menor caminho de reflexão no contorno (reflexão especular).

Conforme Kovitz [110], a melhor forma de descrever o método da fonte imagem é por meio de um exemplo. A Figura 5.6 mostra uma fonte sonora, representada como um círculo preenchido, imersa em um meio com propriedades acústicas c_0 e ρ_0 , e posicionada nas coordenadas (x_s, z_s) . Nas imediações dessa fonte existe uma interface com um outro meio de propriedades acústicas c_1 e ρ_1 . Segundo o método das fontes imagem, a alteração no campo acústico introduzida por essa interface pode ser contabilizada ao

se adicionar uma imagem da fonte original espelhada em relação à interface, nesse exemplo posicionada nas coordenadas $(x_s, -z_s)$ e representada como um círculo vazio. Dessa forma, o campo acústico medido pelo receptor, representado pelo quadrado vazio posicionado em (x, z) , é a sobreposição dos campos gerados por essas duas fontes.

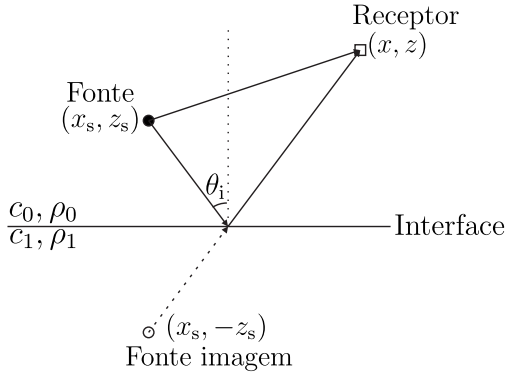


Figura 5.6.: Esquema do princípio do método de fonte imagem.

Em termos matemáticos, tem-se que a solução da equação da onda não homogênea para esse exemplo pode ser escrita como o somatório de duas soluções para fontes elementares em campo livre (Funções de Green), uma localizada na fonte real e a outra na fonte imagem, de forma que a resposta impulsiva² do sistema se torna:

$$h(t) = \frac{\delta(t - \frac{r_0}{c_0})}{r_0} + \frac{\delta(t - \frac{r_{im}}{c_0})}{r_{im}}, \quad (5.14)$$

dados,

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_s)^2}, \quad (5.15)$$

$$r_{im} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z + z_s)^2}, \quad (5.16)$$

as distâncias fonte-receptor e fonte imagem-receptor, respectiva-

² Resposta do sistema a uma excitação pontual igual (ou próxima) a um Delta de Dirac.

mente. Sendo a resposta do sistema dada pela convolução da resposta impulsiva com um sinal de entrada qualquer $s(t)$,

$$g(x, z, t) = h(t) * s(t). \quad (5.17)$$

Esse conceito pode ser expandido para qualquer número sucessivo de reflexões nos contornos. A resposta impulsiva de uma sala fechada, por exemplo, pode ser obtida de forma simples conforme ressalta Romano [108], basta seguir os passos:

1. Expandir todas as possíveis posições das fontes imagem;
2. Obter o tempo de propagação da onda das fontes imagem até o ponto de interesse (receptor);
3. Levantar em conta a redução da pressão acústica devido ao espalhamento esférico/cilíndrico;
4. Levantar em conta as condições de contorno, que podem apresentar diferenças de impedância, que devem adicionar um termo de escalonamento da amplitude (A_i) na resposta;
5. A resposta impulsiva é o somatório da contribuição de todas as fontes, reais e virtuais:

$$h(t) = \sum_{i=0}^n \frac{A_i \delta(t - \Delta t_i)}{r_i}, \quad (5.18)$$

sendo Δt_i o tempo de propagação da onda de dada fonte/fonte imagem i até o receptor, sendo que

$$\Delta t_i = \frac{r_i}{c}. \quad (5.19)$$

Este princípio de aproximar reflexões como fontes imagens já vem sendo usados a muitos anos. Eyring [111] em 1930 propôs um método para a obtenção de uma forma de equacionamento do tempo de reverberação de salas. Mintzer [112] em 1950 avaliou a aplicação do método da fonte imagem em diferentes configurações, como com apenas um plano refletor, dois planos refletores paralelos e uma sala retangular. Allen [113] em 1979 discutiu um método de

simulação computacional simples para a propagação acústica em salas retangulares de paredes não-rígidas baseado no método da fonte imagem.

Mesmo sendo um método onipresente em muitos campos de pesquisa de engenharia e acústica nas últimas décadas, como pontuado por Lehmann [114], o método da fonte imagem, devido a sua simplicidade conceitual e relativa simplicidade de implementação, continua sendo aplicado em diversas situações, como no modelamento da propagação sonora em ambientes fechados, no controle de ruído em grandes espaços, em estudos de auralização e realidade aumentada. Em muitos casos o método da fonte imagem se apresenta como uma forma rápida de gerar dados de entrada para os mais diversos algoritmos de processamento de sinais, como feito por Lehmann [115] que utiliza dados de campo reverberante em uma sala, gerados com o método da fonte imagem, para testar um algoritmo de localização de fontes baseado um método Monte Carlo Sequencial³.

Nos últimos anos, Pinson [8–10] vêm utilizando o método da fonte imagem como uma ferramenta para a realização do imageamento da superfície de fundo de ambientes submersos. O método assume que as interfaces geológicas entre diferentes meios de propagação da onda (coluna d'água e camadas de diferentes sedimentos) são espelhos acústicos onde imagens da fonte real devem aparecer. A estrutura dessa superfície de fundo pode então ser determinada por meio da localização dessas fontes imagem. O método permite a obtenção da espessura das diferentes camadas geológicas assim como as velocidades de propagação da onda acústica nessas camadas.

O princípio básico da localização das fontes imagem, e por consequência, da localização das interfaces geológicas, está em migrar o sinal de cada um dos hidrofones para a sua respectiva posição de fonte image no espaço. Essa migração é feita conforme o processo de imageamento descrito no Capítulo 4, aplicando a Equação (4.4). Porém, a grande diferença entre as duas migrações

³ Tradução do termo em inglês *Sequential Monte Carlo*.

está na lei do tempo utilizada. Para o imageamento clássico, cada um dos pontos do espaço é assumido como um espalhador, de forma que sua lei do tempo fica $t_n(\mathbf{r}) = R_0/c + R/c$. Já quando se realiza a migração das fontes imagens, assume-se que cada ponto no espaço se comporta como uma fonte imagem que emite o sinal de entrada juntamente com a fonte real, fazendo com que a lei do tempo fique $t_n(\mathbf{r}) = \|\mathbf{r}_n - \mathbf{r}\|/c$, que representa o tempo de propagação da onda do ponto de interesse $\mathbf{r} = (x, z)$ até o hidrofone n . De forma que é utilizada a seguinte equação de migração:

$$I_{\text{im}}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N g_n^H(t_n(\mathbf{r})) g_j^{*H}(t_j(\mathbf{r}))}, \quad (5.20)$$

com $g_n^H(t_n(\mathbf{r}))$ sendo o sinal analítico medido no hidrofone n do arranjo. A Figura 5.7 mostra um exemplo do imageamento das fontes imagem obtido à partir dos sinais filtrados, conforme apresentado na Figura 5.5 (b), após a aplicação da Equação 5.20. Os tempos de atraso utilizados neste imageamento assumem que todas as fontes estão localizadas em um meio homogêneo com velocidade de propagação sonora c_0 , isso adiciona um erro do posicionamento das fontes imagem, que deveriam estar alinhadas no mesmo eixo da fonte real caso fossem utilizadas as velocidades de propagação corretas durante o cálculo dos tempos de propagação. Mesmo essas posições no espaço não sendo corretas, elas representam corretamente o tempo de viagem para cada reflexão e suprem a necessidade do algoritmo de filtragem de interfaces geológicas. Pinson [10] apresenta uma forma de obter os valores de espessura e de velocidade de propagação sonora em cada camada a partir dessas posições incorretas das fontes imagem. Com isso, ele consegue caracterizar a subsuperfície de fundo de forma relativamente simples, com gastos computacionais muito menores do que aqueles gastos em processos de inversão usuais e com a utilização de dados proveniente de sistemas comuns de sonar.

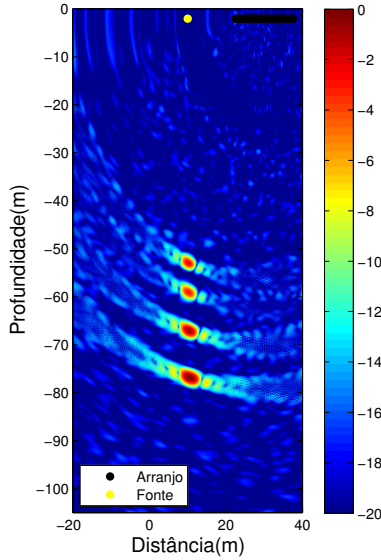


Figura 5.7.: Mapa de pressões gerado pelo imageamento das fontes imagens com a utilização da Equação 5.20 em dados simulados. A apresentação das pressões é dada em escala dB, após sua normalização.

Destaca-se que algumas aproximações são feitas para se modelar a propagação em meios multicamadas com o método da fonte imagem. É assumido que a coluna d'água e as camadas geológicas são homogêneas, sem variações das propriedades acústicas em sua totalidade, e, que não ocorrem reflexões múltiplas entre camadas. Essa aproximação usualmente é válida, pois a amplitude dos sinais referente às múltiplas reflexões é de ordem consideravelmente menor quando comparada à primeira reflexão. É importante também que o ângulo de incidência θ_i na camada seja menor que o ângulo crítico, pois caso contrário, ocorreria a reflexão total impedindo a identificação de camadas mais profundas.

5.4 Localização da Fonte Imagem

Seguindo o procedimento para a localização de objetos enterrados, deseja-se localizar as fontes imagem. Para o caso apresentado na Figura 5.7, não seria um problema identificar manualmente a

posição das fontes imagens, pois devido a simplicidade do modelo, não surgem grandes distorções. Porém, o ruído de fundo, ou até mesmo os rastros dos círculos de cada hidrofone – referentes às reflexões nas interfaces – e sua combinação nas proximidades da fonte imagem podem dificultar uma localização automática. A seguir são aplicadas algumas técnicas para o melhoramento da imagem assim como o procedimento de localização das fontes imagem.

5.4.1 Fator de coerência

A ocorrência de qualquer fenômeno que adicione distorções aos sinais medidos pelo arranjo de hidrofones utilizado no imageamento de um ambiente pode resultar em diferenças não correlacionadas (fora de fase) entre hidrofones, alterando a amplitude e a fase entre os sinais que constroem a imagem. No caso do imageamento de fontes imagem, o próprio sinal referente à reflexão nas interfaces pode aparecer como distorção na forma de um círculo. Essas imperfeições podem ser verificadas qualitativamente ao se analisar a imagem, porém o ideal seria a obtenção de um valor quantitativo que permitesse julgar a qualidade da imagem.

Hollman *et al* [116] propõe uma forma de avaliar a qualidade da imagem. Partindo do princípio do imageamento, em que os sinais de cada elemento do arranjo são migrados para as suas posições no espaço para então serem somados, tem-se que para uma região de máximo na imagem, por exemplo, espera-se que picos e vales nos sinais medidos para cada um dos hidrofones se alinhem e que sejam somados de forma construtiva. Porém, distorções de fase, principalmente, podem fazer com que a soma dos sinais não seja perfeitamente construtiva, reduzindo a qualidade da imagem. Essa operação de soma, é chamada de soma coerente⁴. É possível então estabelecer uma relação entre a soma coerente dos sinais e a soma incoerente desses mesmos sinais, de forma a determinar as regiões nas quais os sinais somam de maneira destrutiva e

⁴ Tradução do termo em inglês *coherent sum*.

consequentemente, determinar as regiões que possuem qualidade reduzida da imagem. Essa relação, chamada *fator de coerência*, é dada pela Equação (5.21) abaixo

$$I_{cf} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N g_n \right|^2}{\sum_{n=1}^N |g_n|^2}, \quad (5.21)$$

sendo g_n um sinal medido por um receptor n e utilizado no imageamento. O numerador representa o quadrado da soma coerente dos sinais enquanto que o denominador representa o quadrado da soma incoerente dos sinais. Aplicando a Equação (5.21) ao problema de imageamento de fonte imagem em questão, chega-se à relação

$$I_{cf}(\mathbf{r}) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n^H(t_n(\mathbf{r})) \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g_j^{*H}(t_n(\mathbf{r}))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n^H(t_n(\mathbf{r})) g_n^{*H}(t_n(\mathbf{r}))}, \quad (5.22)$$

que se reduz a

$$I_{cf}(\mathbf{r}) = \frac{\frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N g_n^H(t_n(\mathbf{r})) g_j^{*H}(t_n(\mathbf{r}))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g_n^H(t_n(\mathbf{r})) g_n^{*H}(t_n(\mathbf{r}))}, \quad (5.23)$$

com g_n^H representando o sinal analítico para o hidrofone n e g_n^{*H} seu conjugado. Tem-se que quando não houver diferença de fase entre os sinais, os somatórios darão o mesmo resultado e o fator de coerência (I_{cf}) terá o valor igual a 1. Diferenças de fase tendem a ter pouco impacto na soma incoerente enquanto que para a soma coerente pode ocorrer interação destrutiva entre os sinais, cancelando-os, de forma que I_{cf} tende a zero. A Equação (5.23) pode ser problemática devido a sua possível indefinição caso o denominador tenha valores iguais a zero, uma forma simples de contornar esse problema envolve a inclusão de um pequeno valor

finito ϵ no denominador [117]. Porém é necessário compensar uma possível amplificação dos sinais quando o denominador torna-se apenas ϵ , isso é feito multiplicando o numerador e o denominador pelo termo que zera, conforme

$$I_{cf}(\mathbf{r}) = \frac{\frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N s_n^H(t_n(\mathbf{r})) s_j^{*H}(t_n(\mathbf{r})) \sum_{n=1}^N s_n^H(t_n(\mathbf{r})) s_n^{*H}(t_n(\mathbf{r}))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s_n^H(t_n(\mathbf{r})) s_n^{*H}(t_n(\mathbf{r})))^2 + \epsilon^2} \quad (5.24)$$

A Figura 5.8 mostra o resultado da aplicação da Equação (5.24) nos dados da Figura 5.7 para três diferentes valores de ϵ . Observa-se que a maioria dos artefatos presentes na Figura 5.7, somem quando aplicado o fator de coerência, isso ocorre pois o método resulta em valores baixos quando determinado ponto não possui contribuição da maioria dos hidrofones no arranjo. O aumento do ϵ implica em um escalonamento do fator de coerência, este pode ser ajustado para que se tenha menores regiões de busca.

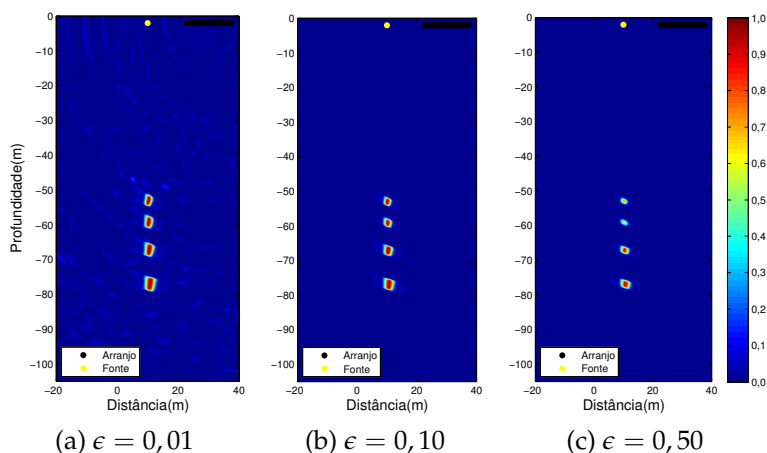


Figura 5.8.: Imageamento de fonte imagem para diferentes valores de ϵ .

Para destacar a capacidade do fator de coerência em "limpar" a imagem, a Figura 5.9 mostra o imageamento quando o sinal para dois hidrofones são alterados, adiciona-se um pulso com amplitude

da ordem do sinal direto em uma posição temporal escolhida aleatoriamente. Verifica-se que os círculos referentes ao pulso inserido nos hidrofones um e cinco aparecem claramente no mapa de fontes imagem (Figura 5.9 (a)) mas, por não apresentarem correlação com nenhum dos outros hidrofones do arranjo, apresentam um baixo fator de coerência, sendo praticamente retirados da imagem (Figura 5.9 (b)).

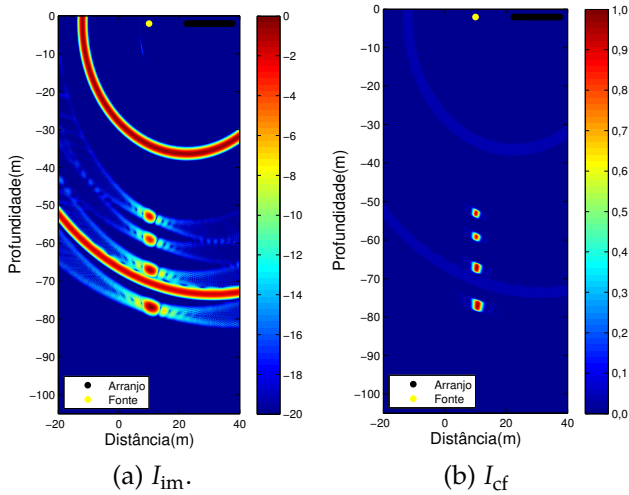


Figura 5.9.: Resultado da aplicação do fator de coerência quando é adicionado um pulso da ordem do sinal direto em tempos aleatórios para dois hidrofones distintos.

5.4.2 Filtro Gaussiano

De posse dos resultados do fator de coerência para o imageamento das fontes imagem, é possível restringir a área de busca por máximos locais apenas para as áreas da imagem que apresentaram fator de coerência próximo a 1. Para tal cria-se uma máscara:

$$W_{cf}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0 & I_{cf}(\mathbf{r}) < k_{cf} \\ 1 & I_{cf}(\mathbf{r}) > k_{cf} \end{cases}; \quad (5.25)$$

sendo k_{cf} o critério escolhido para determinar a máscara. Aplicando essa máscara no mapa de pressões da Figura 5.7, obtém-se um novo mapa conforme a Figura 5.10 (a). A área na qual deve ser encontrado os valores de máximo, que representam as fontes imagem, já está consideravelmente reduzida, porém uma avaliação mais detalhada, como mostrada na Figura 5.10 (b), verifica a existência de alguns pontos isolados próximos aos contornos das regiões de busca que serão identificados como máximos locais, resultado na localização de fontes imagem em posições incorretas, como mostra a Figura 5.10 (c).

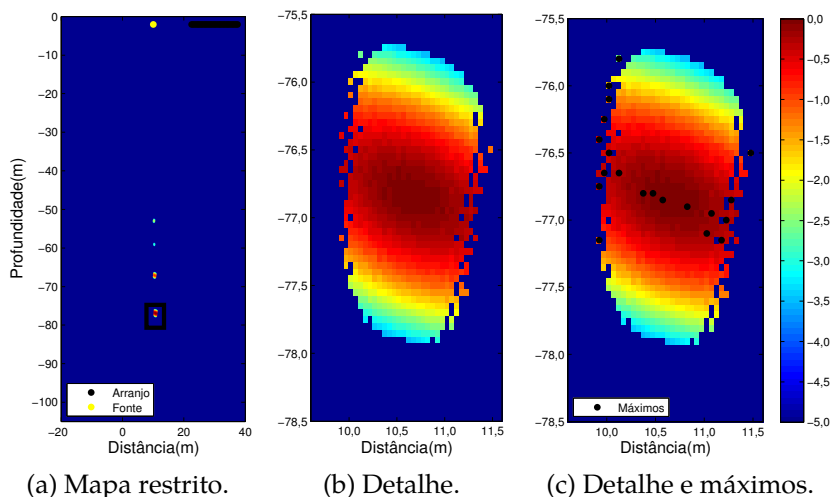


Figura 5.10.: Resultado da aplicação da máscara gerada a partir do fator de coerência no mapa de pressões originado do imageamento de fonte imagem apresentado na Figura 5.7.

Para contornar esse problema, optou-se por aplicar em ambos os mapas, de imageamento de fonte imagem e de fator de coerência, um filtro espacial largamente utilizado em processamento de imagem, chamado de Filtro Gaussiano. Esse filtro é o que se pode chamar de filtro de suavização, utilizado para para desfocar a imagem, reduzindo seu nível de detalhamento e o impacto de ruído. A ideia por trás de filtros de suavização está em substituir o valor de

cada pixel da imagem por uma média dos valores de seus vizinhos [118, 119], no caso do Filtro Gaussiano, esta média é ponderada por uma função gaussiana dada por

$$m_{\text{gauss2D}}(x, y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.26)$$

na qual σ é o desvio padrão da gaussiana e o seu valor é associado ao grau de detalhamento que se estará perdendo. Este filtro deve então ser convoluido com os mapas de interesse tal que a imagem filtrada I_{gauss} seja dada por

$$I_{\text{gauss}}(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r}) * m_{\text{gauss2D}}(\mathbf{r}). \quad (5.27)$$

O fato de m_{gauss2D} ser circularmente simétrica, permite que essa operação seja realizada de maneira simples, primeiramente convoluindo com uma gaussiana em uma dimensão todas as linhas da imagem, em seguida convoluindo com a mesma gaussiana todas as colunas da imagem:

$$I_{\text{gauss}}(\mathbf{r}) = m_{\text{gauss1D}} * (m_{\text{gauss1D}} * I(\mathbf{r}))^T, \quad (5.28)$$

sendo as m_{gauss1D} uma matriz cujas linhas são funções gaussianas em uma dimensão

$$m_{\text{gauss1D}} = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.29)$$

com a convolução das matrizes sendo realizada linha à linha e o índice $(\cdot)^T$ representando a operação de transposição de matriz. A Figura 5.11 mostra o resultado da filtragem da Figura 5.7 com o Filtro Gaussiano para diferentes valores de σ .

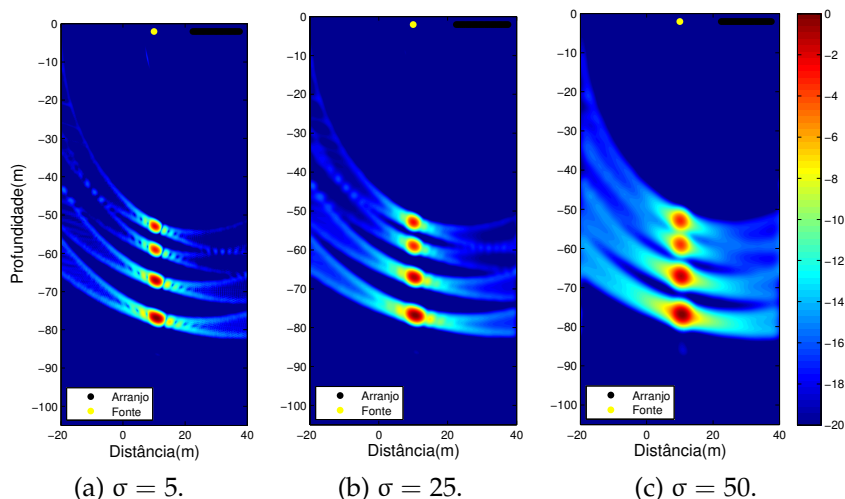


Figura 5.11.: Resultado da aplicação do filtro gaussiano no mapa de pressões originado do imageamento de fonte imagem apresentado na Figura 5.7 para diferentes valores de σ .

Percebe-se que com o aumento de σ os contornos tornam-se mais suaves em detrimento da exatidão da imagem, cuja informação é espalhada. Aplicando esse filtro também na imagem de fator de coerência (Figura 5.10 (a)) e definindo uma nova máscara, pode-se recriar a Figura 5.10 (c). A Figura 5.12 mostra a aplicação da nova máscara no mapa de fontes imagem já filtrado. Verifica-se que o filtro gaussiano, além de eliminar os pontos isolados nos contornos da máscara identificados como máximos na Figura 5.10 (c), também suaviza a imagem, se livrando dos múltiplos máximos locais presentes próximos ao centro da região de busca e permitindo a localização da fonte imagem com maior exatidão.

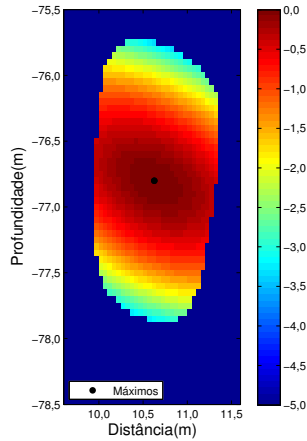


Figura 5.12.: Resultado da aplicação da máscara de busca no detalhe do mapa de fontes imagem normalizado após a aplicação do filtro gaussiano, apresentado em escala dB.

5.5 Filtragem das camadas geológicas e imageamento de espalhadores

As posições das fontes imagem, obtidas por meio do processamento descrito na Seção 5.4, fornecem o correto tempo de viagem que as ondas acústicas levam para propagar da fonte até as interfaces geológicas e retornar ao arranjo de hidrofones. Sabendo esse tempo de viagem, é possível extrair o pulso das reflexões para cada uma das interfaces de maneira similar ao procedimento realizado para extrair o pulso do caminho direto descrito na Seção 5.2. A grande diferença entre os dois procedimentos está no pulso que será retirado do sinal. Caso a Equação (5.12) seja utilizada diretamente para os sinais das interfaces de cada hidrofone, é possível que não apenas a informação das interfaces seja retirada, pois dentro da janela estipulada pode haver a presença de sinais referentes aos espalhadores que tenham tempos de viagem similares às interfaces.

Para evitar remover sinais referentes aos espalhadores, conforme apresentado por Pinson [63], deve ser determinado um novo sinal g_{geo} que contenha informação apenas das interfaces geológicas, de

tal forma que sua aplicação na Equação (5.12),

$$g_n^{\text{scat}}(t) = g_n(t) - g_{\text{geo } n}(t)\Pi(t - t_{dn}), \quad (5.30)$$

resultaria em um sinal filtrado, contendo apenas a informação de possíveis espalhadores volumétricos. A forma de se obter g_{geo} envolve um processo iterativo em que, para cada fonte imagem detectada, é realizada uma média dos sinais para todos os hidrofones. Tal que, para cada hidrofone n , obtenha-se os sinais para cada interface l

$$g_{\text{geo } n}^{(l)} = \frac{1}{M\sqrt{c^{(0)}t_n^{(l)}}} \sum_{m=1}^M \sqrt{c^{(0)}t_m^{(l)}} g_m(t - t_n^{(l)} + t_m^{(l)})\Pi(t - t_n^{(l)}). \quad (5.31)$$

com $t_{n/m}^{(l)}$ representando o tempo de viagem da fonte imagem l ao hidrofone n/m , M o número total de hidrofones, $1/M\sqrt{c^{(0)}t_n^{(l)}}$ e $\sqrt{c^{(0)}t_m^{(l)}}$ sendo termos utilizados para compensar o espalhamento geométrico (em 2D), de forma que para que se obtenha $g_{\text{geo } n}$ deve-se somar os sinais $g_{\text{geo } n}^{(l)}$ para todas as fontes imagem, logo

$$g_{\text{geo } n} = \sum_{l=1}^{\mathfrak{L}} g_{\text{geo } n}^{(l)}, \quad (5.32)$$

com \mathfrak{L} representando o número total de fontes imagem.

A combinação das Equações (5.31) e (5.32) permite conservar a informação referente aos espalhadores pois, conforme explicado no Capítulo 4 e na Seção 5.3, as interfaces podem ser interpretadas como espelhos equanto que os espalhadores funcionam como fontes secundárias de Huygens. De modo que, mesmo os seus sinais se sobrepondo na mesma região do espaço após a migração (Figura 5.13), a forma da frente de onda oriunda da interface é diferente daquela oriunda do espalhador. Isso implica em que o instante em que o sinal da onda espalhada está presente é diferente para cada um dos hidrofones, tal que a realização da média para todos os hidrofones suprime os sinais dos espalhadores, pois estes não somam em fase.

Conhecendo g_{geo} para cada hidrofone, basta aplicá-lo à Equação (5.30), resultando nos sinais contendo apenas informação dos espalhadores g_n^{scat} . O último passo na detecção de objetos enterrados envolve imagear g_n^{scat} através da Equação (4.4), resultando na Figura 5.14 (b).

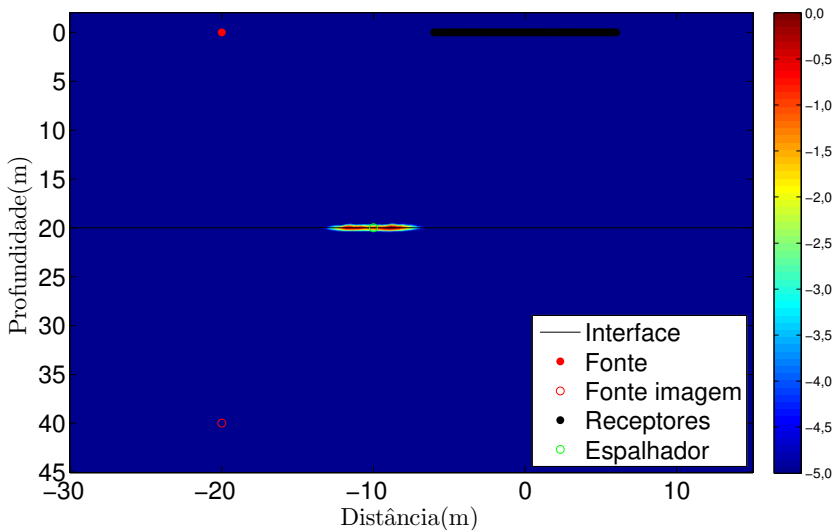
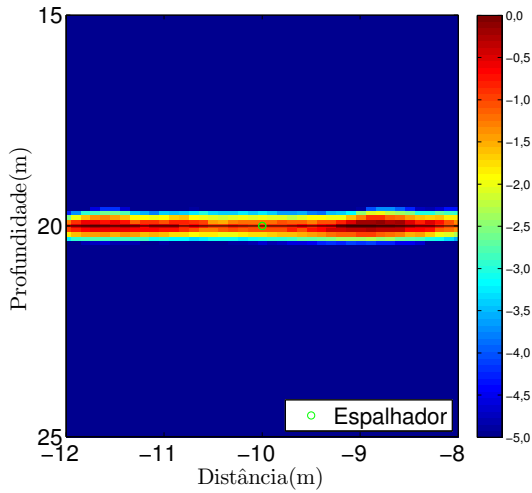
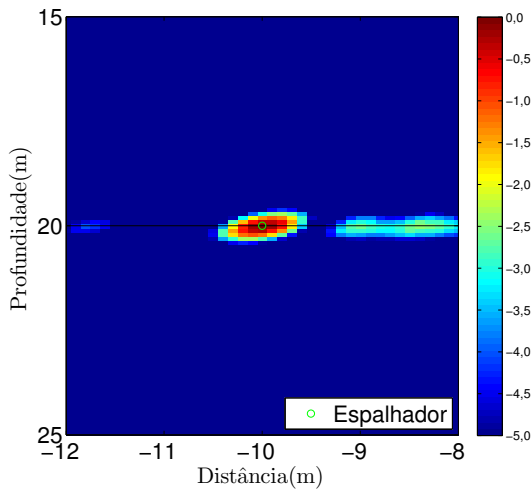


Figura 5.13.: Imageamento dos dados medido com uma fonte emitindo um *chirp* de 3000 a 7000 Hz modulado por uma Gaussiana, apresentado em escala dB.

Avaliando a Figura 5.14, é perceptível a melhora obtida com o algoritmo de filtragem das interfaces geológicas, que se mostra como um ferramenta poderosa para auxiliar a interpretação de dados sísmicos quando o interesse é a localização de espalhadores. Percebe-se também que alguns artefatos são identificados nas proximidades do espalhador, como pode ser visto na Figura 5.14 (b), tendo uma diferença de apenas 3 dB na amplitude. Torna-se de interesse alterar as configurações de arranjo e de medição (e.g., sinal de entrada, posição da fonte, posição dos espalhadores etc) com o objetivo de reduzir ao máximo esses artefatos, o que leva aos estudos desenvolvidos no Capítulo 6 seguinte.



(a) Original.



(b) Filtrado.

Figura 5.14.: A Figura 5.14 (a) apresenta um detalhe da Figura 5.13 enquanto que a Figura 5.14 (b) apresenta o mesmo detalhe mas para quando o sinal migrado é o sinal filtrado g^{scat} .

5.6 Aplicação do método

Esta seção busca aplicar o método proposto a uma situação mais próxima à realidade. Primeiramente são definidas as características do sistema: (1) o ambiente a ser simulado (suas dimensões e propriedades), (2) o sinal de entrada utilizado e (3) a configuração do sistema de medição. Este sistema é resolvido com o auxílio do software SimSonic2D. Os dados obtidos na simulação são descritos e processados com os algoritmos de filtragem de camadas e imageamento de espalhadores.

5.6.1 Modelamento do ambiente de interesse

Os modelos desenvolvidos para gerar dados de entrada para os algoritmos implementados devem cumprir alguns requisitos:

- Modelar a propagação na coluna d'água;
- Modelar a interface água-substrato;
- Modelar a propagação no substrato;
- Modelar espalhadores.

O código em FDTD (descrito na Seção 3) é capaz de modelar a propagação na coluna d'água em sua totalidade e também permite definir regiões com diferentes propriedades (heterogeneidades volumétricas), bastando apenas escolher o melhor modelo de propagação para representar o substrato.

No Capítulo 1 foi destacado que o enterramento dos dutos é usualmente realizado nas áreas de maior atividade humana e hidrodinâmica, ou seja, nas áreas próximas à costa. Jackson e Richardson [29] comentam que sedimentos mais grosseiros, como o cascalho e a areia, tendem a se acumular próximos a essas regiões, de forma que é interessante uma busca na literatura sobre qual das duas formas de representação fornecidas pelo SimSonic2D (fluido ou sólido elástico) melhor representam esses tipos de sedimentos.

Um autor relevante na literatura com relação às propriedades geocústicas e elásticas de sedimentos da subsuperfície de fundo é Hamilton [120, 121]. Em um série de trabalhos desenvolvidos, principalmente nos anos 70 e 80, ele buscou classificar e descrever sedimentos presentes na sub-superfície de fundo. Uma das conclusões de suas publicações está relacionada a rigidez apresentada pela maioria dos sedimentos marinhos. O autor considera que devido a essa rigidez as ondas cisalhantes transmitidas pelo substrato devem ser levadas em consideração. Porém Jackson e Richardson [29], também referências no assunto, comentam que em substratos não consolidados, como é o caso de cascalho e areias, as ondas cisalhantes se propagam a uma velocidade muito menor do que àquela da água, e a sua consideração nos modelos de propagação trariam correções muito pequenas. Por esse motivo e devido a maior simplicidade e maior acesso às propriedades necessárias para o modelamento do substrato como um meio fluido, decidiu-se utilizar esta abordagem para os modelos que seguem.

5.6.2 Geometria e propriedades dos modelos

Os experimentos numéricos a serem realizados pretendem simular uma investigação similar àquela apresentada na Figura 4.1 do Capítulo 4. Porém, estipula-se um ambiente, complexo o bastante para que o algoritmo de imageamento de espalhadores possa ser validado, todavia simples o bastante para não dificultar a interpretação dos dados. A Figura 5.15 apresenta a configuração escolhida. Um meio com uma coluna d'água de espessura l_0 e quatro camadas de substrato de espessura l_i , cujas interfaces são planas. O sistema de medição está posicionado a uma distância h acima da interface água-substrato, sendo L_{gc} a distância da fonte ao centro do arranjo e L a abertura do arranjo.

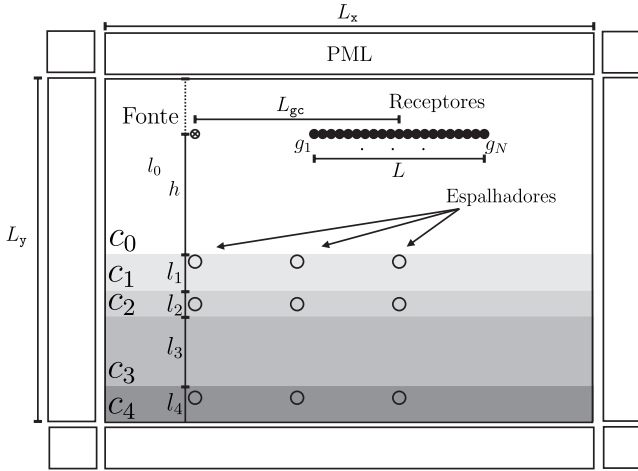


Figura 5.15.: Esquema do experimento numérico utilizado para modelar uma medição acústica em ambiente marinho.

O domínio total terá um comprimento na direção x (L_x) de 70 m e um comprimento na direção y (L_y) de 40 m. Como condição de contorno, conforme mencionado no Capítulo 2, o SimSonic2D© permite a definição de PMLs. Conforme apresentado na Figura 5.15, PMLs serão aplicadas em todos os contornos do sistema com o objetivo de retirar os efeitos de múltiplas reflexões entre o fundo e a superfície, simplificando a interpretação dos dados extraídos.

Sabendo a configuração desejada para o experimento numérico, basta estipular as propriedades de cada meio. Conforme citado no Capítulo 2 a velocidade de propagação sonora na coluna d'água é intrinsecamente complexa e diversos trabalhos na literatura foram desenvolvidos no sentido de desenvolver equações empíricas para prever o seu valor. Um dos trabalhos mais completos na literatura, desenvolvido em por Chen [122], propõe um algoritmo com 41 termos que fornece valores da velocidade do som na água em função dos parâmetros temperatura, salinidade e pressão. No entanto, muitos desses termos tem dez ou mais algarismos significativos, Medwin [123] propõe uma versão simplificada que

apresenta diferenças da ordem de 1 m/s em relação ao obtido por Chen [122] para ambientes típicos de águas rasas, dada por:

$$c_0 = 1444,2 + 4,6\mathfrak{T} - 0,055\mathfrak{T}^2 + 0,00029\mathfrak{T}^3 + (1,34 + 0,01T)(\mathfrak{S} - 35) + 0,016D, \quad (5.33)$$

com \mathfrak{T} representando a temperatura da água em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), \mathfrak{S} a sua salinidade em partes por mil (‰) e D a sua profundidade em metros (m). Porém, como a velocidade do som entra como uma constante no problema de interesse, podendo prontamente ser corrigida caso determinada, optou-se por utilizar o valor arredondado de 1500 m/s, usualmente aplicado em trabalhos similares [40, 56, 107].

Já para as propriedades dos sedimentos que compõe a sub-superfície, trabalhos como [124, 125] reportam valores de velocidade do som para as primeiras camadas de sedimento que variam de 1450 a 1650 m/s para areia e cascalho, sendo esses estudo realizados respectivamente nas baías de Guanabara e de Santos. De forma que nos experimentos numéricos deste trabalho serão utilizados valores de velocidade do som no sedimento dentro dessa faixa. Como auxílio para estabelecer os valores de densidade foi utilizada a Equação (5.34), obtida através da regressão de uma série de medições realizadas por Hamilton [126], dada por

$$c = c_0(1,6490 - 0,9807\rho + 0,3595\rho^2), \quad (5.34)$$

com a densidade ρ , para essa equação, dada em g/cm^3 .

A Equação (5.34) é utilizada para determinar a densidade das camadas em função das velocidades de propagação escolhidas. Enquanto que as espessuras dos sedimentos foram escolhidas com base na configuração proposta por Pinson [107], com espessuras variando de 2 a 5 m. A Tabela 5.1 mostra os valores de espessura e propriedades geoacústicas escolhidas. Destaca-se o asterisco na espessura da camada 4, que serve apenas para indicar que fisicamente, devido à PML no contorno inferior, esta camada se comporta como um meio infinito.

Também na Figura 5.15, observa-se a presença de nove espa-

Tabela 5.1.: Configuração das camadas geológicas do sistema simulado.

n ^o da camada	ρ [kg/m ³]	c_i [m/s]	l_m [m]
0#	1000	1500	27
1#	1667	1520	3
2#	1724	1540	2
3#	1854	1600	5
4#	1941	1650	3*

lhadores de diâmetro $\beta = 0,5$ m organizados em três conjuntos. Os espalhadores centrais de cada conjunto estão posicionados a uma distância $L_{gc}/2$ igual a metade do comprimento entre a fonte e o centro do arranjo, essa posição foi escolhida pois é nela que ocorre a reflexão especular entre a fonte e o centro do arranjo, tornando esta a posição de maior dificuldade na diferenciação do sinal referente à reflexão nas camadas geológicas e do sinal referente à interação da onda com os espalhadores. Os espalhadores laterais estão posicionados nas mesmas coordenadas na direção x que a fonte e que o centro do arranjo, e permitem avaliar o efeito que o ângulo das ondas incidentes no arranjo exerce sobre os resultados de imageamento. A Tabela 5.2 contém as propriedades utilizadas para cada grupamento de espalhadores, com (*) = $(r_s, r_s + L_{gc}/2, r_s + L_{gc})$, sendo r_s a posição em x da fonte. Ou seja, a posição dos espalhadores é função de L_{gc} , parâmetro que será variado nos estudos do Capítulo 6.

Tabela 5.2.: Propriedades dos espalhadores.

n ^o	ρ [kg/m ³]	c [m/s]	x [m]	y [m]
1#	1891	1620	(*)	$h_g + \beta$
2#	1925	1640	(*)	$h_g + l_1 + l_2/2 + \beta$
3#	2084	1750	(*)	$h_g + l_1 + l_2 + l_3 + l_4/2 + \beta$

5.6.3 Sinal de entrada

Quando qualquer tipo de medição ativa é realizada, a escolha do tipo de sinal de entrada do sistema de medição é importante, pois esse sinal de entrada influencia diretamente nos dados medidos.

No caso de medições com sistemas de sonar ativos, o sinal de entrada influencia diretamente na relação sinal-ruído e na resolução espacial alcançada pelo sistema de medição. Na Seção 4.3 são mostradas as vantagens que um sinal do tipo *chirp* juntamente com um processamento de *matched filtering* traz em relação à detecção de ecos e melhoramento da relação sinal-ruído. Desta forma, como sinal de entrada para as simulações serão utilizados *chirps* (Figura 5.16), similares aqueles apresentados na Seção 5.1, com 0,035 s de duração e modulados por gaussianas descritas por:

$$w_{\text{chirp}}(m) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{m}{\sigma M/2} \right)^2}, \quad (5.35)$$

sendo m os instantes de tempo amostrados, M o tempo total da janela e $\sigma = 1/3$ o desvio padrão.

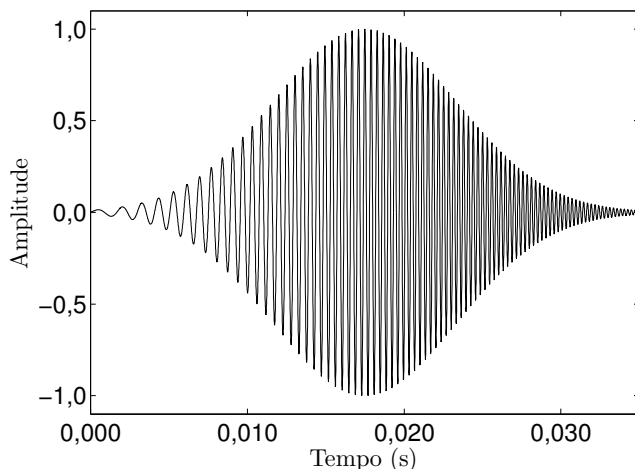


Figura 5.16.: Sinal de entrada aplicado na fonte para uma frequência central de 2500 Hz e uma largura de banda de 4000 Hz.

5.6.4 Aplicação do algoritmo implementado

No estudo de caso desenvolvido nas seguintes seções, será simulado um ambiente submerso multicamadas, sendo que os dados de pressão serão obtidos utilizando um sistema composto por um arranjo de 51 hidrofones, cuja distância entre elementos é igual

a $d = \lambda/4$, centrado a 20 m da fonte. Este modelo é então resolvido com o auxílio do SimSonic2D©. Como saída das simulações, são obtidos as curvas de pressão sonora medidas em cada um dos hidrofones. A Figura 5.17 mostra o exemplo do sinal obtido para um dos hidrofones do arranjo.

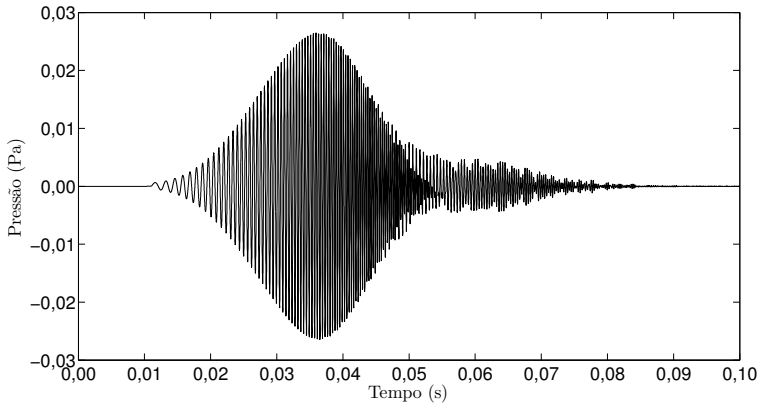


Figura 5.17.: Sinal medido pelo primeiro hidrofone do arranjo do estudo de caso.

O sinal, conforme apresentado, não permite nenhum tipo de interpretação devido à complexidade do *chirp* juntamente com a interação das ondas refletidas e espalhadas. Por essa razão, é válido apresentar também o mesmo sinal após seu processamento por *matched filtering* (Figura 5.18). Visualmente já é possível interpretar o sinal. Verifica-se a presença de um pulso maior, referente a propagação direta da fonte aos hidrofones, e quatro pulsos menores, referentes ao sinal em cada uma das interfaces. Já as informações sobre os espalhadores, essas têm uma amplitude muito menor quando comparada às reflexões especulares e não são identificáveis visualmente .

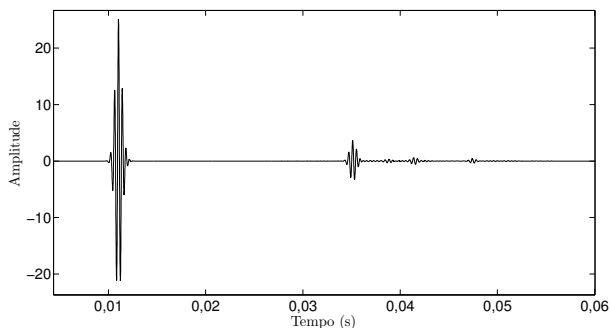


Figura 5.18.: *Matched filter* do sinal medido pelo primeiro hidrofone do arranjo (veja Figura 5.17).

Organizando os sinais filtrados de cada hidrofone na forma de um sismograma (Figura 5.19) é possível chegar à algumas conclusões: percebe-se a presença da primeira da terceira e da quarta interfaces sem muitas dúvidas, porém a segunda aparece pouco destacada. Fora as interfaces, é difícil de identificar qualquer outro artefato.

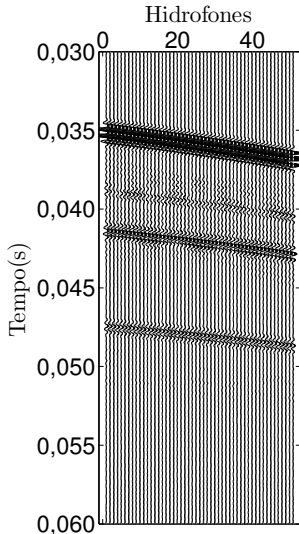


Figura 5.19.: Sismograma dos dados de leitura de pressão em um arranjo de 51 hidrofones obtidos pela simulação de um ambiente submerso com quatro camadas de sedimento.

Esses sinais simulados são então processados com o algoritmo descrito nas seções acima. Primeiramente é realizada a migração Kirchhoff dos sinais (Figura 5.20), esse processamento por si só já demonstra ser uma forma melhor de se apresentar os dados em relação aos sismogramas, pois torna mais fácil sua interpretação. A imagem gerada já permite identificar, não só as interfaces, como também identificar indícios de alguns dos espalhadores como apontado na Figura 5.20.

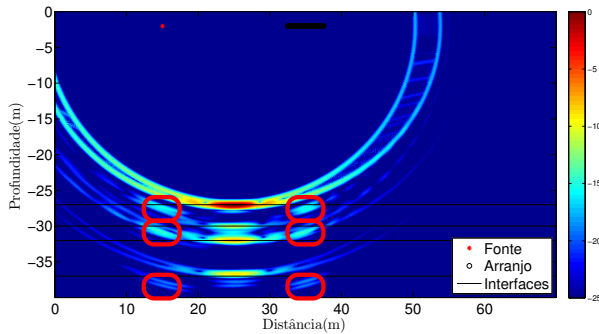


Figura 5.20.: Imageamento com a Migração de Kirchhoff.

Espera-se então que ao aplicar o algoritmo de filtragem de interfaces geológicas se obtenha um maior detalhamento dos espalhadores. O resultado de imageamento dos sinais filtrados está apresentado na Figura 5.21.

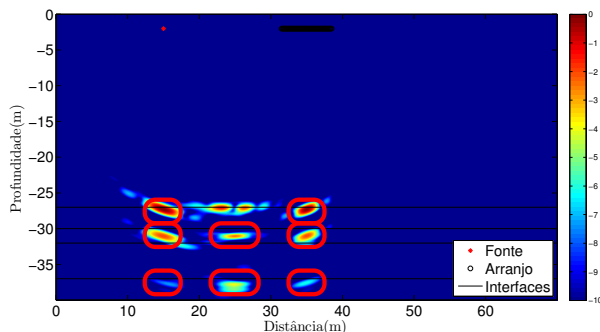


Figura 5.21.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados já filtrados pelo algoritmo de filtragem de interfaces.

De maneira geral, percebe-se que a filtragem das camadas geológicas permite ampliar a relação dos sinais dos espalhadores, facilitando sua localização, porém esses resultados apresentaram algumas particularidades. Os primeiros detalhes a serem destacados são: a presença de dois sinais próximos à primeira interface ao invés de apenas um, isso se dá pois não foi verificada a correta separação do sinal do espalhador e o sinal da reflexão na interface; e o fato de os espalhadores se apresentarem como dois máximos locais. Foi justamente para compreender esses efeitos e suas causas que foram concebidas as diversas configurações de simulação avaliadas na análise paramétrica desenvolvidas no Capítulo 6.

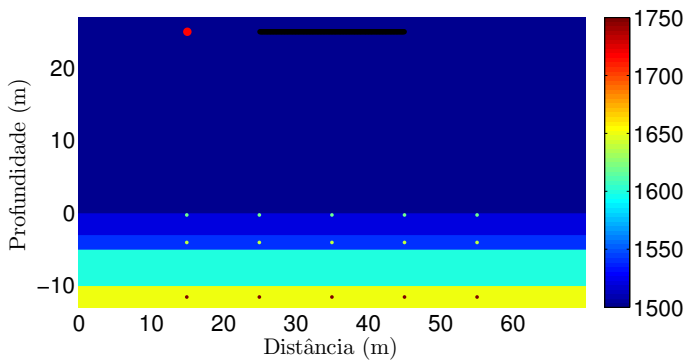
5.6.5 Série de simulações

Os estudos até este momento foram realizados para a geração de apenas um pulso (ou tiro) do *chirp* de entrada. Porém, em uma investigação de sísmica, a embarcação que carrega o sistema de medição se movimenta a uma velocidade constante e pulsos são enviados em intervalos regulares de tempo. Para cada um desses instantes é realizado o imageamento dos sinais, a soma dessas imagens permite aumentar amplamente a relação sinal-ruído.

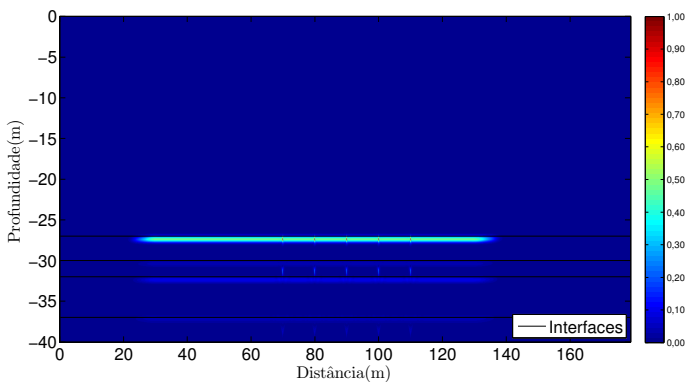
Foram realizadas então uma série de simulações no intuito de representar uma embarcação rebocando um sistema de medição

definido conforme a configuração 27#, posteriormente definida no Capítulo 6. Foram adicionados mais duas colunas de espalhadores para cada conjunto de espalhadores. Em cada medição, a posição dos espalhadores foi modificada para simular o deslocamento de uma embarcação emitindo um pulso a cada metro. Não foi levada em consideração a velocidade da embarcação e o consequente Efeito Doppler associado. As Figuras 5.22 (b) e 5.22 (c) apresentam a imagem da combinação obtida pelo cálculo, nas corretas posições espaciais, da média dos imageamentos para cada posição da embarcação.

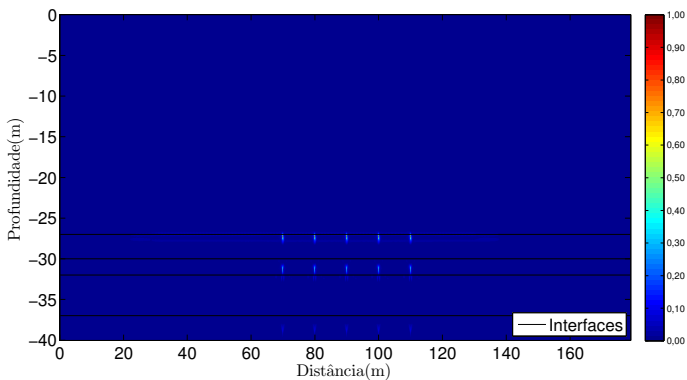
A Figura 5.22 (b) mostra que calcular a média dos mapas de pressão reduz consideravelmente as distorções próximas aos espalhadores, que podem ser observadas no imageamento clássico conforme apresentado na Figura 5.20, por exemplo. Boa parte desses efeitos de distorção estão associados ao ângulo em que as ondas espalhadas chegam ao arranjo, já que, conforme explicado na Seção 4.3.3.2, a resolução espacial obtida depende desse ângulo de incidência (no arranjo) das ondas espalhadas. Para cada posição da embarcação, os ângulos de incidência das ondas no arranjo são diferentes, de forma que, quando realizada a média dos mapas de pressões de todas as posições da embarcação, os efeitos devido aos ângulos são compensados, verificando-se considerável redução nas distorções próximas aos espalhadores presentes na segunda camada, assim como uma aparente melhora na resolução. Porém, mesmo com a eliminação dessas distorções, é observada uma melhora considerável na localização dos espalhadores após a filtragem das camadas (Figura 5.22 (c)).



(a) Configuração



(b) Sem filtragem



(c) Filtrado

Figura 5.22.: Média do imageamento para cada uma das posições da embarcação.

5.7 Desafios relacionados à aplicação do método

As seções anteriores definiram as etapas de processamento de sinais necessárias para a geração de imagens que tem como objetivo auxiliar na detecção de objetos enterrados. Porém, os dados de entrada utilizados são resultados de simulações de modelos simplificados da realidade, de forma que os dados são consideravelmente mais simples em comparação àqueles que seriam obtidos na prática. Para a aplicação do método proposto a dados reais, alguns desafios devem ser levados em consideração.

Primeiramente, deve-se pensar no sistema de medição utilizado. Para obter a devida penetração das ondas sonoras nas camadas de substrato, é necessário utilizar fontes impulsivas de alta energia, como *boomers*, *airguns* ou *sparkers*, ou fontes com transdutores piezoelétricos que permitem a emissão contínua de ondas acústicas de frequência modulada (*chirp*) que podem ser processadas em pulsos através do *matched filtering* (Seção 5.1). Um exemplo de fonte comercial que poderia cumprir a função de projetor para experimentos em águas rasas é o transdutor para ambientes submersos LL-1424HP (Figura 5.23) da *Lubell Labs*, um transdutor piezoelétrico que trabalha em uma faixa de frequência de 200 Hz a 9 kHz, atingindo um nível de pressão sonora máximo de 197 dB (ref = $1\mu\text{Pa}$) a 600 Hz.

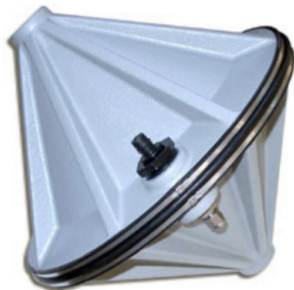
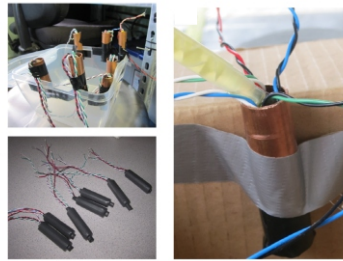
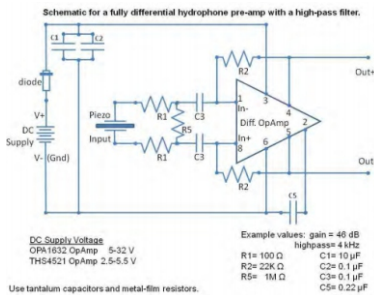


Figura 5.23.: Imagem do transdutor para ambientes submersos LL-1424HP da *Lubell Labs* (imagem retirada do folheto do produto [127]).

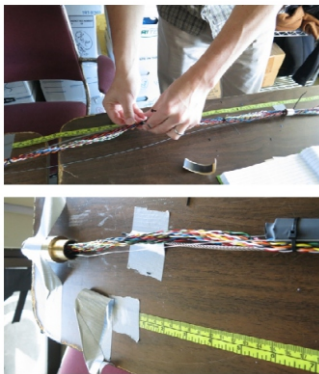
A medição deve então ser realizada por um arranjo de hidrofones

devidamente dimensionado (ver Capítulo 6). Um bom guia para a construção de um arranjo para medições de sísmica em ambientes submersos é dado por Rankin *et al* [128], um documento que descreve em detalhamento a produção de um arranjo de hidrofones desde a confecção de pré-amplificadores e hidrofones até a montagem dos componentes em uma mangueira flexível preenchida com óleo.



(a) Pré-amplificador

(b) Hidrofones



(c) Cabeamento



(d) Mangueira

Figura 5.24.: Imagens resumindo o processo de confecção de um arranjo de hidrofones (imagens retiradas de Rankin *et al* [128]).

Utilizar este princípio construtivo – transdutores dispostos em uma mangueira flexível – faz com que o arranjo não esteja rigida-

mente ligado ao barco, de forma que a posição de seus elementos é pouco afetada pelos movimentos aos quais embarcações estão usualmente sujeitas (guinada, arfada e rolamento⁵). Porém, dispor os elementos do arranjo em uma mangueira flexível permite, mesmo que de maneira restrita, a movimentação isolada dos elementos do arranjo, o que por si só pode adicionar erro aos resultados de imageamento. No artigo [129] apresentado no encontro *RIO Acoustics 2015*, foi avaliada uma configuração de arranjo inclinado, com uma diferença de 0,5 m entre o primeiro e o último elemento do arranjo. O estudo indicou que para águas rasas, esse pequeno erro no posicionamento dos elementos do arranjo não resulta em grandes alterações nas imagens obtidas com a aplicação do método de fontes imagem.

Após definir uma fonte que permita o nível de penetração desejada das ondas acústicas no substrato e um arranjo linear pouco dependente da movimentação do barco, os principais problemas para a aplicação do algoritmo de detecção são oriundos do ambiente de interesse. Como frisado diversas vezes nos capítulos anteriores, o ambiente submerso é complexo, apresentando diversas fontes de ruído não correlacionado. Dentre estas fontes de ruído, destacam-se a rugosidade nas interfaces geológicas, que acaba por promover a difração das ondas incidentes, permitindo o retorno de ondas para os receptores em ângulos diversos, diferentes do especular (Figura 5.25). Estes caminhos alternativos de propagação incidem sobre um mesmo receptor em diferentes tempos e podem se apresentar como um ruído durante a realização do imageamento das fontes imagem.

⁵ Tradução dos termos em inglês *pitch*, *yaw* e *roll*.

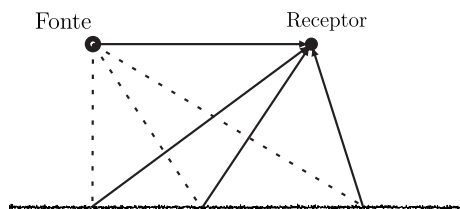


Figura 5.25.: Esquema para a representação dos caminhos de propagação resultantes do espalhamento da onda incidente por interfaces rugosas.

Porém, salvo para ruídos de fundo muito elevados, mesmo com o ruído adicionado devido ao espalhamento na interface rugosa, caso a interface seja plana, a energia recebida pelo caminho especular seria maior e a fonte imagem seria localizada corretamente.

O maior problema para se trabalhar com o algoritmo apresentado nas seções acima com dados reais são as diferentes configurações de relevo existentes, pois o algoritmo assume que as interfaces são planas e paralelas, caso isso não seja observado, as fontes imageadas podem não representar o número e as espessuras corretos das camadas geológicas. Por exemplo, Figura 5.26 apresenta uma representação de um relevo acentuado em que ocorre reflexão especular entre fonte e receptor em dois diferentes pontos, de forma que o imageamento de fonte imagem dos dados obtidos neste ambiente resultariam no registro errôneo de duas fontes.

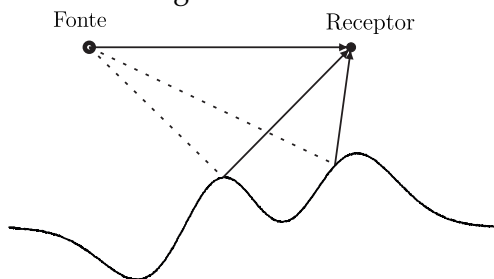


Figura 5.26.: Relevos acentuados podem resultar na ocorrência de múltiplas reflexões especulares, implicando na localização errônea de múltiplas camadas.

6 Análises paramétricas

Com o intuito de avaliar o algoritmo implementado – descrito no Capítulo 5 – será desenvolvida uma série de experimentos numéricos focando na influência que características construtivas do arranjo e da medição têm sobre as imagens obtidas com o algoritmo de detecção de objetos enterrados.

Com as geometrias do ambiente submerso de interesse definidas no Capítulo 5, basta estipular as configurações de arranjo a serem avaliadas. Primeiramente, definem-se os parâmetros de interesse:

- Distância entre elementos do arranjo,
- Abertura do arranjo,
- Número de elementos do arranjo
- Distância entre a fonte e o centro do arranjo,
- Banda de frequência do sinal de entrada.

Esses parâmetros foram escolhidos, pois se espera que tenham impacto direto no imageamento, seja por influenciar diretamente a resolução da imagem, ou por estar diretamente relacionado à amostragem espacial dos dados. Como muitos desses parâmetros estão interligados e, para que se possa avaliá-los isoladamente, uma série de configurações distintas devem ser simuladas. Primeiramente escolheu-se as frequências centrais do sinal de entrada a serem utilizadas, sendo estas 1500, 2500, 5000 e 7500 Hz. Para essas quatro frequências serão avaliados todos os parâmetros construtivos descritos acima.

Como muitas das configurações individualmente não agregam muito à discussão, pois a variação dos parâmetros construtivos resulta em tendências similares para as diversas frequências centrais do *chirp*, neste capítulo serão discutidos apenas os resultados de imageamento para as configurações com frequência central igual a 2500 Hz. Os resultados que ilustram melhor as conclusões obtidas serão discutidos, enquanto que todos os outros resultados estarão apresentados nos Apêndices.

6.1 Distância entre elementos do arranjo (d)

Iniciam-se os estudos avaliando os efeitos que diferentes distâncias entre elementos do arranjo têm sobre o resultado de imageamento. Para tal, são desenvolvidas as configurações de 1# a 17# para o experimento numérico, expostas na Tabela 6.1.

Avaliando as Figuras 6.2 e 6.3, percebe-se que essas configurações propostas para comparar o efeito que a distância entre hidrofones tem sobre o imageamento, acabam avaliando na verdade o efeito que a abertura do arranjo tem sobre os resultados. Mesmo que, de certa forma, com essas configurações seja possível perceber que o aumento da distância entre hidrofones implica no aparecimento de artefatos, possivelmente associados ao fenômeno de *aliasing* por apresentar um padrão de máximos e mínimos similares a um tabuleiro de xadrez [130] (destaque em amarelo na Figura 6.3), é muito mais marcante que as configurações com maiores distâncias entre hidrofones – consequentemente com maiores aberturas do arranjo – apresentaram uma capacidade maior de destacar os espalhadores, como pode ser visto na Figura 6.3.

Tabela 6.1.: Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância (d) entre elementos no resultado de imageamento, para um número fixo de elementos.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]
1#	1500	3000	$\lambda_c/4^*$	51	12,5
2#	1500	3000	$\lambda_c/2$	51	25,0
3#	1500	3000	λ_c	51	50,0
4#	2500	4000	$\lambda_c/4^*$	51	7,0
5#	2500	4000	$\lambda_c/2$	51	15,0
6#	2500	4000	λ_c	51	30,0
7#	2500	4000	$2\lambda_c$	51	60,0
8#	5000	4000	$\lambda_c/4$	51	4,0
9#	5000	4000	$\lambda_c/2^*$	51	7,0
10#	5000	4000	λ_c	51	15,0
11#	5000	4000	$2\lambda_c$	51	30,0
12#	5000	4000	$4\lambda_c$	51	60,0
13#	7500	4000	$\lambda_c/4^*$	51	2,0
14#	7500	4000	$\lambda_c/2$	51	5,0
15#	7500	4000	λ_c	51	10,0
16#	7500	4000	$2\lambda_c$	51	20,0
17#	7500	4000	$4\lambda_c$	51	40,0

Notas: O símbolo * foi aplicado para representar quando o valor de d utilizado foi aproximado, sendo utilizado o valor mais próximo permitido pela discretização do modelo em diferenças finitas.

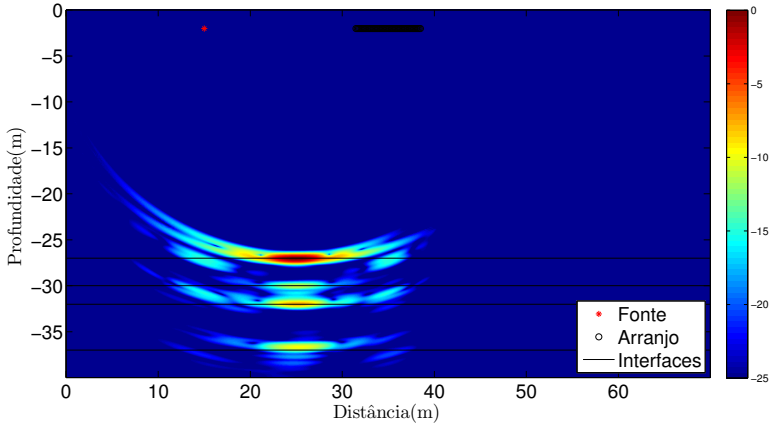
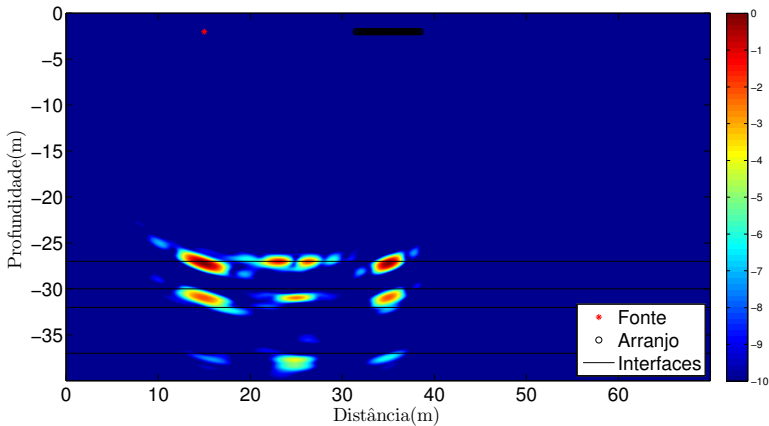
(a) $d = \lambda/4$ Sem filtragem(b) $d = \lambda/4$ Com filtragem

Figura 6.1.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 4#, assim como o imageamento dos sinais filtrados

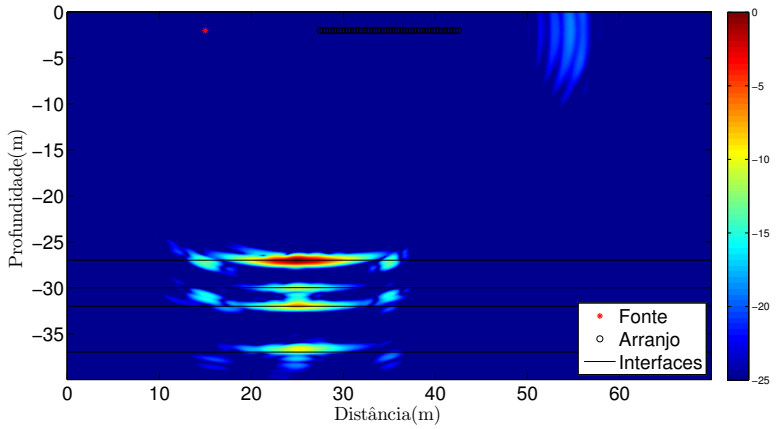
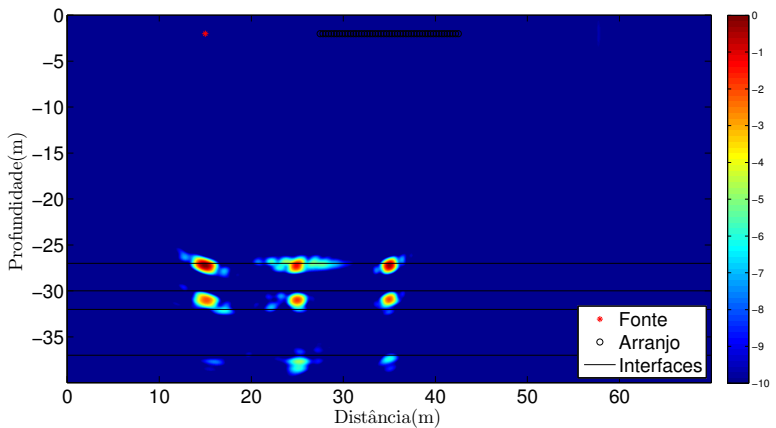
(a) $d = \lambda/2$ Sem filtragem(b) $d = \lambda/2$ Com filtragem

Figura 6.2.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 5#, assim como o imageamento dos sinais filtrados

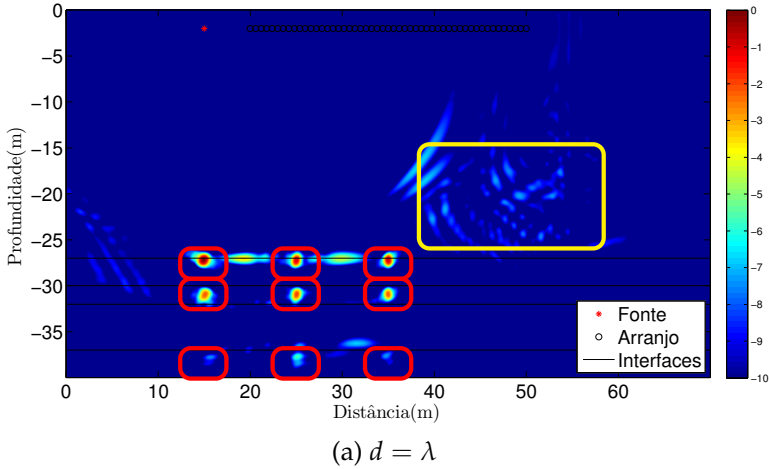


Figura 6.3.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados da configuração 6# já filtrados pelo algoritmo de filtragem de interfaces. Espalhadores destacados em vermelho e *aliasing* ou ruído em amarelo

Para complementar essa análise, são então avaliadas configurações em que são variadas as distância entre elementos para mesmas aberturas de arranjo, variando o número total de elementos (Tabela 6.2).

Tabela 6.2.: Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância entre elementos (d) no resultado de imageamento, para um tamanho fixo da abertura do arranjo.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]
18#	1500	3000	$\lambda_c/4^*$	84	20
19#	1500	3000	$\lambda_c/2$	41	20
20#	1500	3000	λ_c	21	20
21#	1500	3000	$2\lambda_c$	11	20
22#	2500	4000	$\lambda_c/4^*$	143	20
23#	2500	4000	$\lambda_c/2$	67	20
24#	2500	4000	λ_c	34	20
25#	2500	4000	$2\lambda_c$	17	20
26#	5000	4000	$\lambda_c/4$	250	20
27#	5000	4000	$\lambda_c/2^*$	143	20
28#	5000	4000	λ_c	67	20
29#	5000	4000	$2\lambda_c$	34	20
30#	5000	4000	$4\lambda_c$	17	20
31#	7500	4000	$\lambda_c/4^*$	334	20
32#	7500	4000	$\lambda_c/2$	201	20
33#	7500	4000	λ_c	101	20
34#	7500	4000	$2\lambda_c$	51	20
35#	7500	4000	$4\lambda_c$	26	20

Notas: O símbolo * foi aplicado para representar quando o valor de d utilizado foi aproximado, sendo utilizado o valor mais próximo permitido pela discretização do modelo em diferenças finitas.

As Figuras 6.5 e 6.6 mostram os resultados de imageamento de espalhadores obtidos com as configurações de 22 a 25. Percebe-se que para os casos em que é respeitada a condição $d \leq \lambda/2$ não são observadas diferenças perceptíveis entre o imageamento (Figuras 6.5 (a) e 6.5 (b)), já para as configurações que não respeitam tal condição, Figuras 6.6 (a) e 6.6 (b), percebe-se a presença artefatos que não existem, sendo estes frutos da baixa amostragem espacial, consequências do *aliasing*. Porém, destaca-se que, mesmo

com alguns artefatos indesejados, os resultados obtidos para um espaçamento entre elementos de λ e até mesmo para 2λ permitem destacar os espalhadores quando comparados aos resultados sem a filtragem das camadas geológicas (Figura 6.4). Desta forma, ao definir uma configuração para um possível sistema de medição, o projetista tem certa flexibilidade em relação ao espaçamento entre hidrofones, o interessante é poder ter um arranjo maior (maior abertura) para o mesmo número de hidrofones, sem que hajam grandes perdas na qualidade da imagem final.

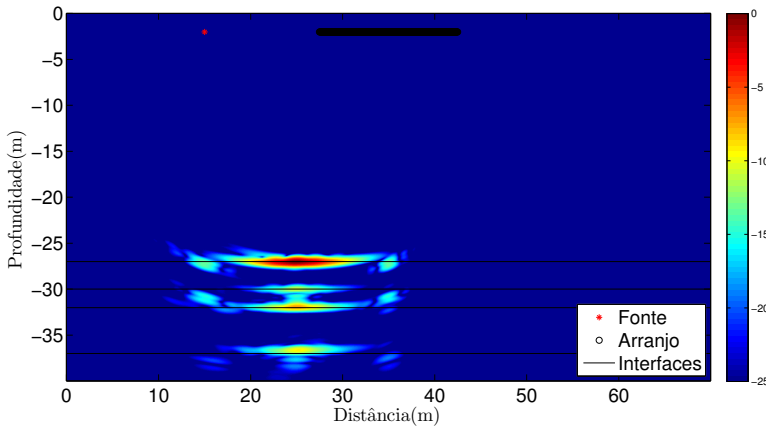


Figura 6.4.: Imageamento pré-filtragem das camadas geológicas, configuração 25#.

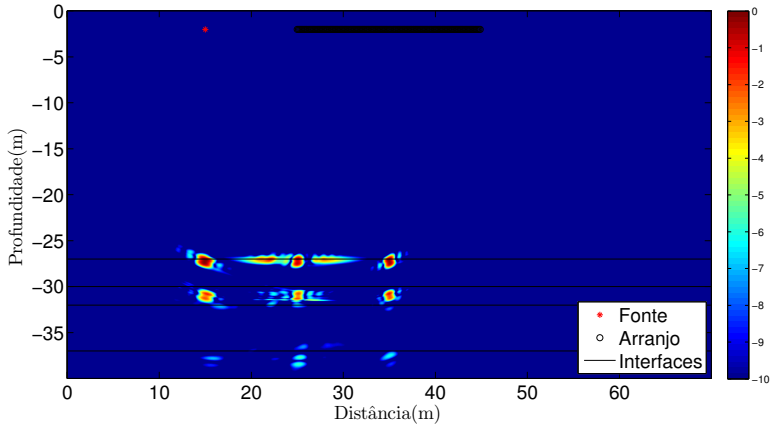
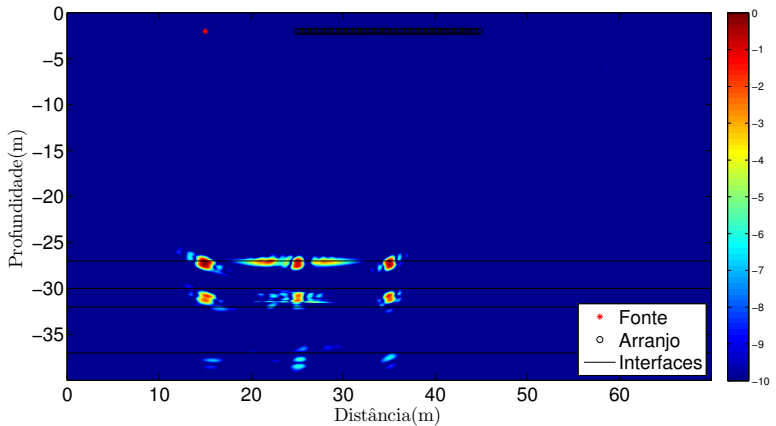
(a) $d = \lambda/4$.(b) $d = \lambda/2$ m.

Figura 6.5.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 22# e 23#.

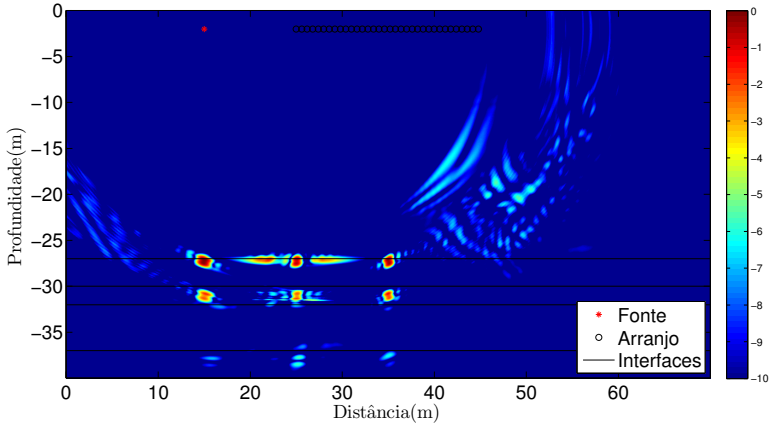
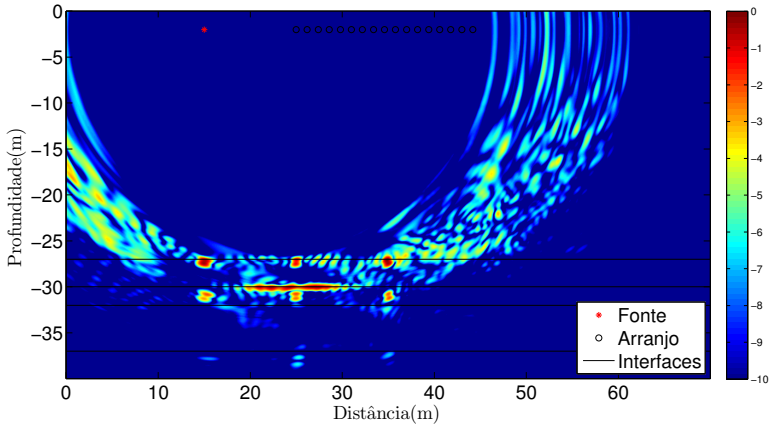
(a) $d = \lambda$.(b) $d = 2\lambda$.

Figura 6.6.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 24# e 25#.

6.2 Abertura do arranjo

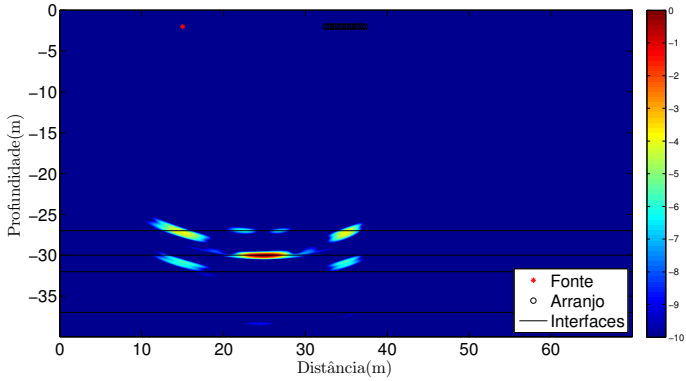
Os estudos desenvolvidos na Seção 6.1 deixaram um indício de que, para o bom funcionamento do algoritmo de filtragem das interfaces geológicas, a abertura do arranjo tem grande importância. Desta forma, foram estipuladas as configurações apresentadas na Tabela 6.3 com o intuito de avaliar isoladamente o efeito dessa característica.

As configurações 39#, 40# e 41# (Figura 6.7) permitem avaliar o efeito que uma abertura do arranjo de 5, 15 e 30 m têm sobre os resultados de imageamento quando não há a influência de *aliasing*, já que essas configurações usam uma distância entre hidrofones $d < \lambda/2$.

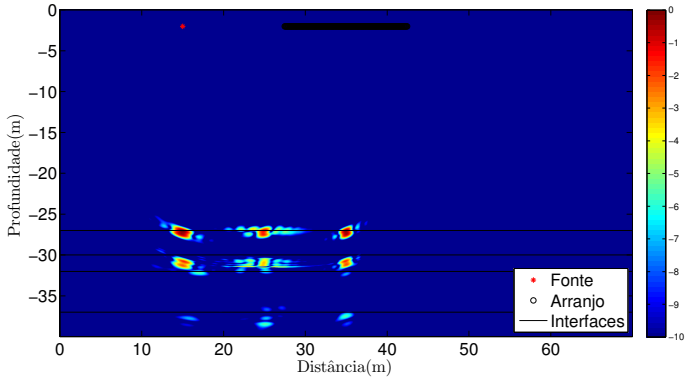
Tabela 6.3.: Parâmetros das simulações para estudo da influência do tamanho da abertura do arranjo no resultado de imageamento, para uma distância fixa entre elementos do arranjo.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]
36#	1500	3000	$\lambda/2$	11	5,00
37#	1500	3000	$\lambda/2$	31	15,00
38#	1500	3000	$\lambda/2$	61	30,00
39#	2500	4000	$\lambda/2$	17	4,80
40#	2500	4000	$\lambda/2$	51	15,00
41#	2500	4000	$\lambda/2$	101	30,00
42#	5000	4000	$\lambda/2^*$	36	4,90
43#	5000	4000	$\lambda/2^*$	108	14,98
44#	5000	4000	$\lambda/2^*$	215	29,96
45#	7500	4000	$\lambda/2$	51	5,00
46#	7500	4000	$\lambda/2$	151	15,00
47#	7500	4000	$\lambda/2$	301	30,00

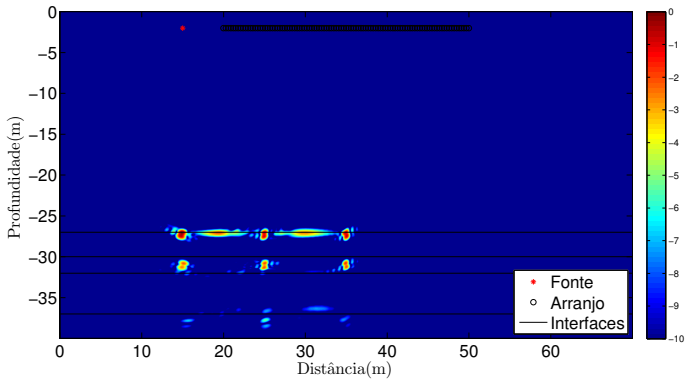
Notas: O símbolo * foi aplicado para representar quando o valor de d utilizado foi aproximado, sendo utilizado o valor mais próximo permitido pela discretização do modelo em diferenças finitas.



(a) Arranjo de 5 m.



(b) Arranjo de 15 m.



(c) Arranjo de 30 m.

Figura 6.7.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 15#, 16# e 17#.

Percebe-se que com o aumento da abertura do arranjo a resolução transversal melhora gradualmente – fenômeno esperado, conforme o conceito de resolução espacial definido na Seção 4.3.3.2 – sendo que os sinais referentes aos espalhadores ocupam espaços consideravelmente menores para o arranjo de 30 m. Destaca-se também que, para as menores aberturas avaliadas, o algoritmo de filtragem não separou corretamente a reflexão na interface e o espalhamento nos espalhadores, principalmente no que se refere ao espalhador central da primeira camada.

Uma explicação para esse comportamento do algoritmo tem fundamento na forma como é realizada a média dos sinais (Equação (5.31)). Conforme explicado na Seção 5.5, as frentes de onda das camadas e dos espalhadores chegam ao arranjo com formas diferentes, porém para a direção especular com o centro do arranjo essas ondas se sobrepõe para os espalhadores centrais. Desse modo, caso apenas um espaço pequeno em torno do centro do arranjo seja amostrado (uma abertura pequena), não haverá grandes diferenças entre os sinais refletidos e espalhados, fazendo com que o ambos sejam filtrados, como ocorre para o espalhador central da primeira camada conforme apresentado na Figura 6.7 (a). Comportamento similar é observado para os resultados com frequências centrais de 1500, 5000 e 7500 Hz.

6.3 Número de hidrofones

Para avaliar o efeito que o número de hidrofones tem sobre o resultado de imageamento de objetos enterrados, fixou-se a abertura do arranjo e se variou o número de hidrofones, tomando o cuidado para que as distâncias entre hidrofones não superasse $\lambda/2$ (Tabela 6.4), para que o resultado do imageamento não sofra com o *aliasing* espacial, conforme explicado no Capítulo 5. Evitar o *aliasing* para todas as frequências centrais e ao mesmo tempo garantir uma resolução transversal razoável, implica num número grande de hidrofones, conforme apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4.: Parâmetros das simulações para estudo da influência do número de elementos no resultado de imageamento.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]
48#	1500	3000	$0,100\lambda$	151	15
49#	1500	3000	$0,080\lambda$	188	15
50#	1500	3000	$0,040\lambda$	376	15
51#	2500	4000	$0,167\lambda$	151	15
52#	2500	4000	$0,133\lambda$	188	15
53#	2500	4000	$0,067\lambda$	376	15
54#	5000	4000	$0,333\lambda$	151	15
55#	5000	4000	$0,267\lambda$	188	15
56#	5000	4000	$0,133\lambda$	376	15
57#	7500	4000	$0,500\lambda$	151	15
58#	7500	4000	$0,400\lambda$	188	15
59#	7500	4000	$0,200\lambda$	376	15

A variação do número total de hidrofones (Figura 6.8) não resultou em mudanças perceptíveis no imageamento, porém essa conclusão pode ser precipitada, principalmente devido ao grande número de hidrofones utilizados (mesmo para menor quantidade de 151). Espera-se que o aumento do número de hidrofones impacte diretamente a relação sinal-ruído da imagem, tal que uma análise com a presença de ruído mais elevado traria conclusões mais relevantes. A Figura 6.9 traz esse estudo, foi adicionado aos sinais dos hidrofones um ruído aleatório gaussiano com amplitude média igual a $1/10$ da amplitude máxima do sinal. Percebe-se uma redução da amplitude do ruído com o aumento da quantidade de hidrofones, com a configuração com $N = 376$ melhorando consideravelmente a localização do espalhadores presentes na quarta camada. Dessa forma, observa-se que o projetista do sistema de medição também deve levar em consideração quão ruidoso é o ambiente no qual o sistema será utilizado para tomar a decisão de aumentar ou reduzir o número de hidrofones de seu arranjo.

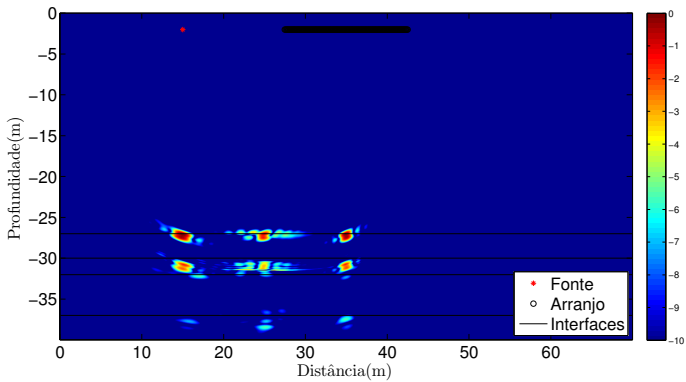
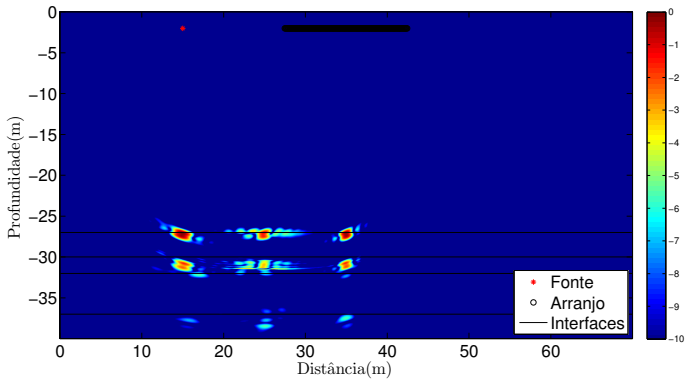
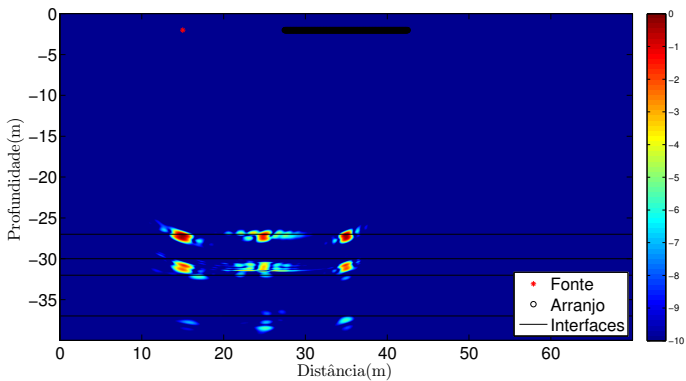
(a) $N = 151$.(b) $N = 188$.(c) $N = 376$.

Figura 6.8.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 51#, 52# e 53#.

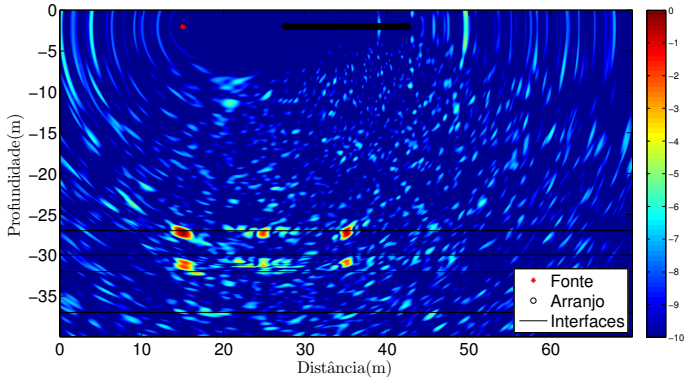
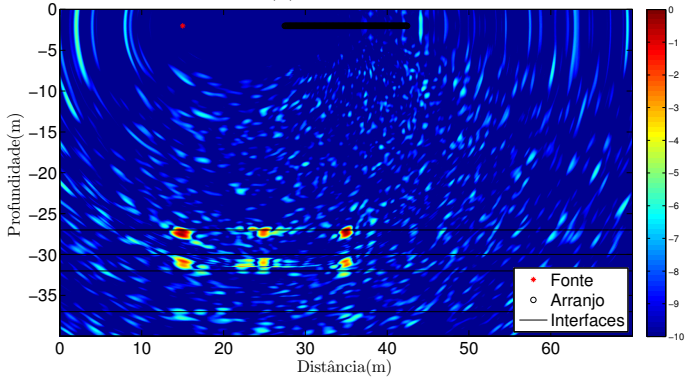
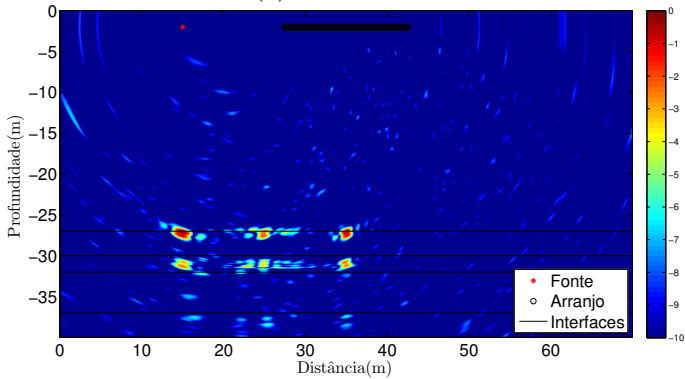
(a) $N = 151$.(b) $N = 188$ m.(c) $N = 376$.

Figura 6.9.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 51#, 52#, e 53#, com a adição de um ruído aleatório com amplitude $1/10$ da amplitude dos sinais.

6.4 Largura de banda do *chirp*

Para avaliar o efeito do tamanho de banda do *chirp* de entrada sobre os resultados de imageamento, optou-se por fixar a abertura do arranjo em 20 m com uma distância entre elementos igual a $\lambda/2$ (Tabela 6.5). Espera-se obter melhores resoluções radiais com o aumento da largura de banda, conforme descrito na Seção 4.3.3.2 do Capítulo 4.

Tabela 6.5.: Parâmetros das simulações para estudo da influência da largura de banda do *chirp* de entrada no resultado de imageamento.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]
60#	1500	1000	$\lambda/2$	41	20,00
61#	1500	2000	$\lambda/2$	41	20,00
62#	1500	3000	$\lambda/2$	41	20,00
63#	2500	1000	$\lambda/2$	67	20,00
64#	2500	2000	$\lambda/2$	67	20,00
65#	2500	3000	$\lambda/2$	67	20,00
66#	2500	4000	$\lambda/2$	67	20,00
67#	5000	1000	$\lambda/2^*$	143	19,88
68#	5000	2000	$\lambda/2^*$	143	20,00
69#	5000	3000	$\lambda/2^*$	143	20,00
70#	5000	4000	$\lambda/2^*$	143	20,00
71#	7500	1000	$\lambda/2$	201	20,00
72#	7500	2000	$\lambda/2$	201	20,00
73#	7500	3000	$\lambda/2$	201	20,00
74#	7500	4000	$\lambda/2$	201	20,00

Notas: O símbolo * foi aplicado para representar quando o valor de d utilizado foi aproximado, sendo utilizado o valor mais próximo permitido pela discretização do modelo em diferenças finitas.

A Figura 6.10 mostra o resultado do imageamento para as configurações de 63# a 66#. Percebe-se claramente a influência direta que a largura de banda tem na resolução da imagem, apresentando – assim como a abertura do arranjo – grande

influência na capacidade do algoritmo em filtrar as interfaces geológicas mantendo a informação dos espalhadores. A baixa resolução faz com que não seja possível separar as frentes de onda que chegam da interface e as frentes de onda espalhadas pelos espalhadores.

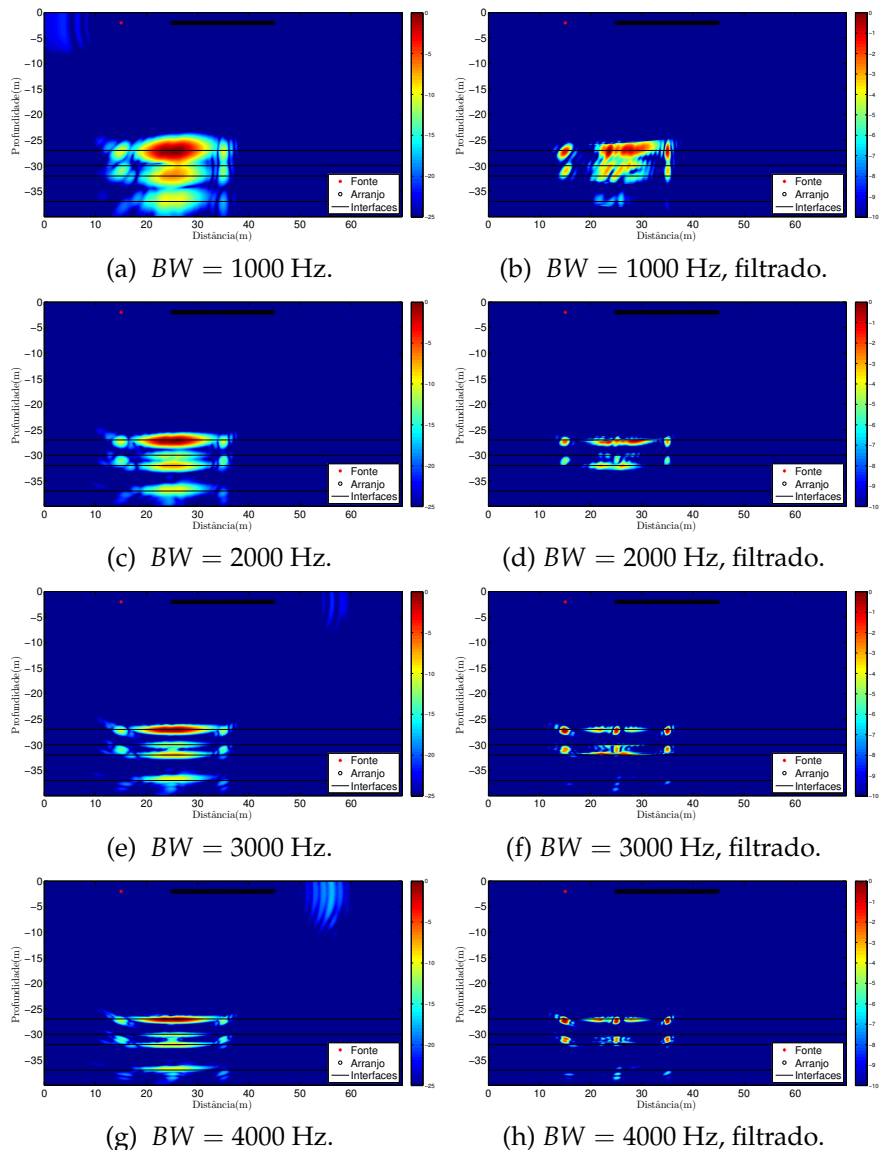


Figura 6.10.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 63#, 64#, 65# e 66#. A coluna da esquerda apresenta o imageamento para para os sinais completos e a coluna da direita apresenta o imageamento para os sinais filtrados.

6.5 Distância da fonte ao centro do arranjo

Por último avalia-se a distância entre a fonte e o centro do arranjo (Tabela 6.6), foram utilizadas configurações para o arranjo iguais as apresentadas Tabela 6.5 para a largura máxima de banda avaliada. Espera-se uma redução da resolução com o aumento dessa distância, pois dessa forma o ângulo de incidência da reflexão especular sobre o arranjo diminuiria, resultando em uma menor abertura efetiva do arranjo.

Tabela 6.6.: Parâmetros das simulações para estudo da influência da distância da fonte ao centro do arranjo (L_{gc}) no resultado de imageamento.

nº da simulação	f_c [Hz]	BW	d [m]	N	L [m]	L_{gc} [m]
75#	1500	3000	$\lambda_c/2$	41	20	11
76#	1500	3000	$\lambda_c/2$	41	20	20
77#	1500	3000	$\lambda_c/2$	41	20	30
78#	2500	4000	$\lambda_c/2$	67	20	11
79#	2500	4000	$\lambda_c/2$	67	20	20
80#	2500	4000	$\lambda_c/2$	67	20	30
81#	5000	4000	$\lambda_c/2^*$	143	20	11
82#	5000	4000	$\lambda_c/2^*$	143	20	20
83#	5000	4000	$\lambda_c/2^*$	143	20	30
84#	7500	4000	$\lambda_c/2$	201	20	11
85#	7500	4000	$\lambda_c/2$	201	20	20
86#	7500	4000	$\lambda_c/2$	201	20	30

Notas: O símbolo * foi aplicado para representar quando o valor de d utilizado foi aproximado, sendo utilizado o valor mais próximo permitido pela discretização do modelo em diferenças finitas.

A Figura 6.11 apresenta os resultados de imageamento para as configurações de 78# a 80#. Percebe-se que, com o aumento da distância entre a fonte e o centro do arranjo, a resolução da imagem diminui, esse efeito é especialmente percebido para os espalhadores posicionados na mesma linha que a fonte. Quando as ondas incidem em ângulos maiores (em relação a normal do arranjo) no centro do arranjo, elas enxergam uma abertura menor, sendo essa abertura efetiva a projeção do arranjo em uma linha perpendicular à direção de propagação da onda [100]. De forma que, para a obtenção de melhores resoluções e consequentemente melhores resultados de imageamento de espalhadores, o projetista deve optar por menores distâncias entre a fonte e o centro do arranjo.

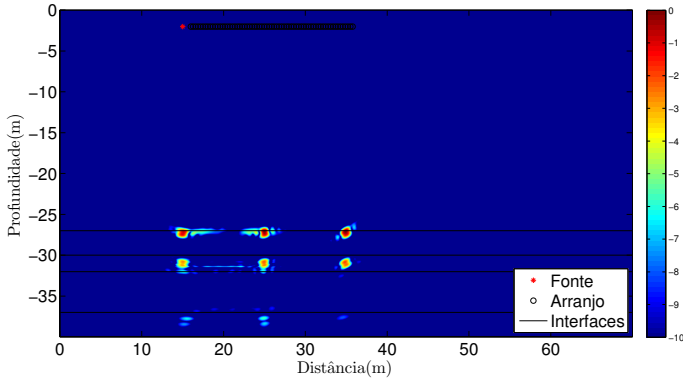
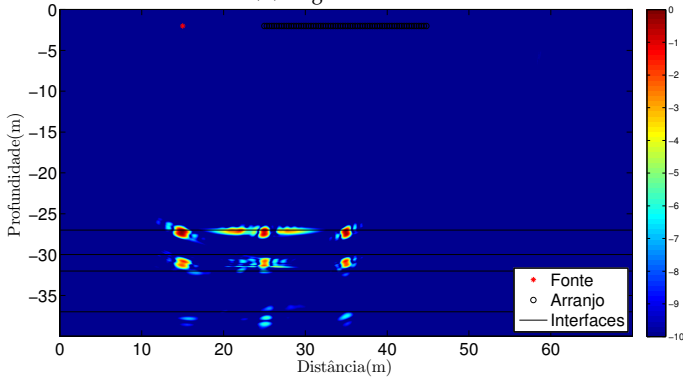
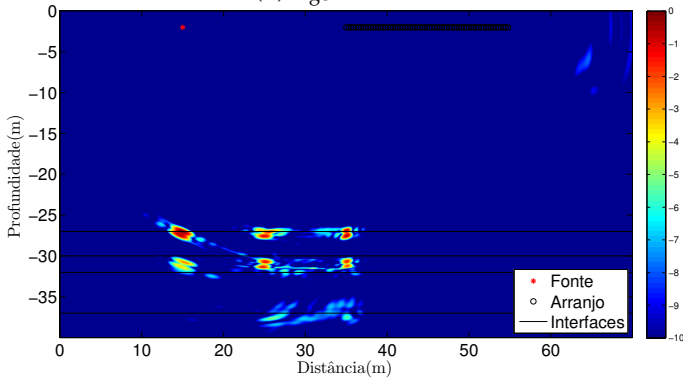
(a) $L_{gc} = 11$ m.(b) $L_{gc} = 20$ m.(c) $L_{gc} = 30$ m.

Figura 6.11.: Imageamento de espalhadores dos sinais obtidos com os dados simulados das configurações 78#, 79#, e 80#, com a adição de um ruído aleatório com amplitude $1/10$ da amplitude dos sinais.

6.6 Frequência central do *chirp* de entrada

Entendendo como cada parâmetro construtivo do sistema de medição influenciou o resultado de imageamento quando um *chirp* com frequência central de 2500 Hz é utilizado, é possível avaliar com fundamento o impacto que diferentes frequências centrais têm sobre o imageamento. Para realizar tal comparação optou-se escolher um configuração com: $d \leq \lambda/2$ para evitar efeitos de *aliasing*, abertura de 20 m para que se tenha boa resolução transversal, sem ruído para desconsiderar o número total de hidrofones e distância entre a fonte e o centro do arranjo de 20 m. A Figura 6.15 mostra os imageamentos sem a filtragem das camadas geológicas e com a filtragem para cada uma das quatro frequências avaliadas.

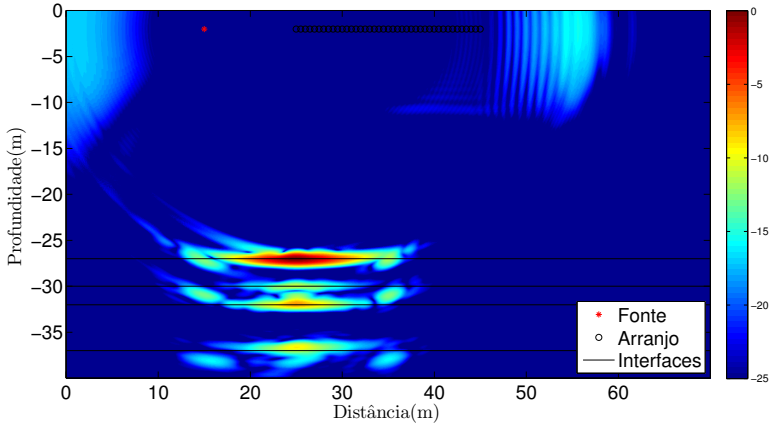
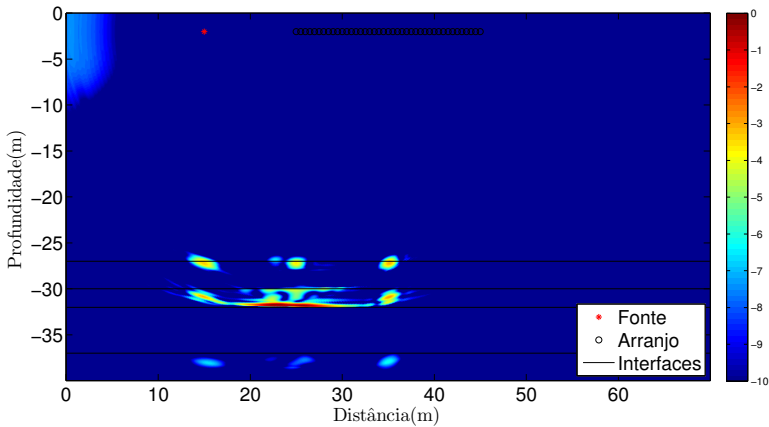
(a) $f_c = 1000$ Hz.(b) $f_c = 1000$ Hz, filtrado.

Figura 6.12.: Imageamento sem e com a filtragem das interfaces geológicas para as frequências centrais de 1000 Hz.

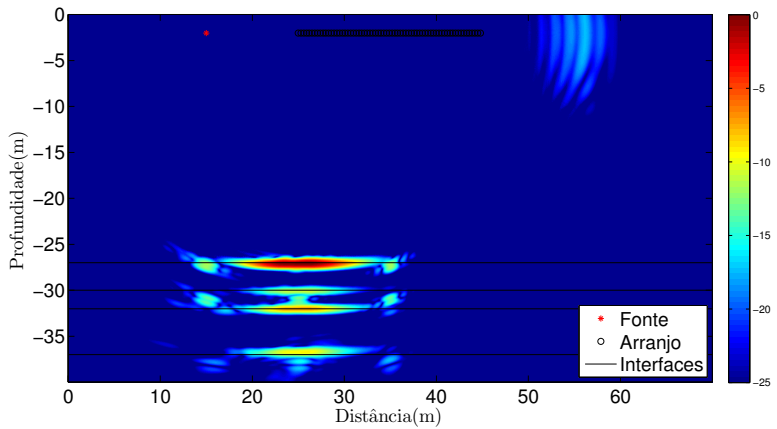
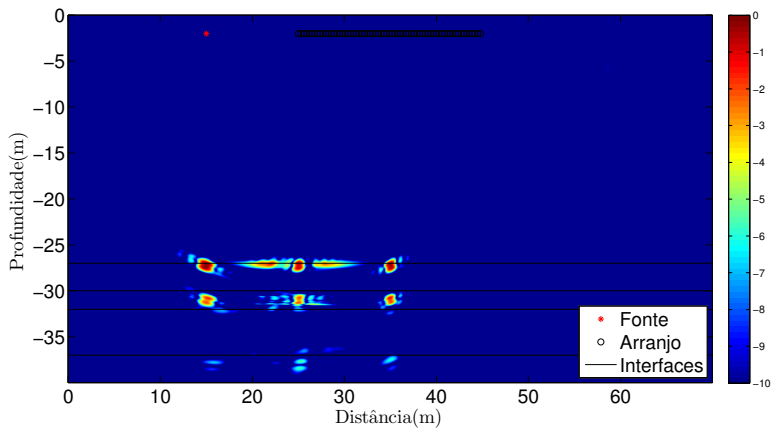
(a) $f_c = 2500$ Hz.(b) $f_c = 2500$ Hz, filtrado.

Figura 6.13.: Imageamento sem e com a filtragem das interfaces geológicas para as frequências centrais de 2500 Hz.

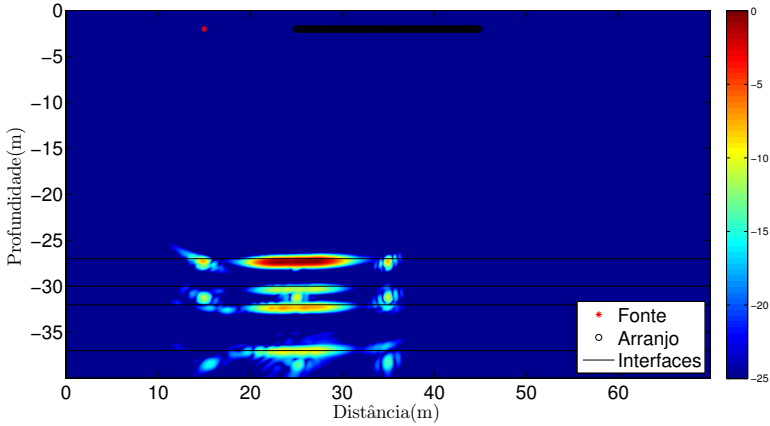
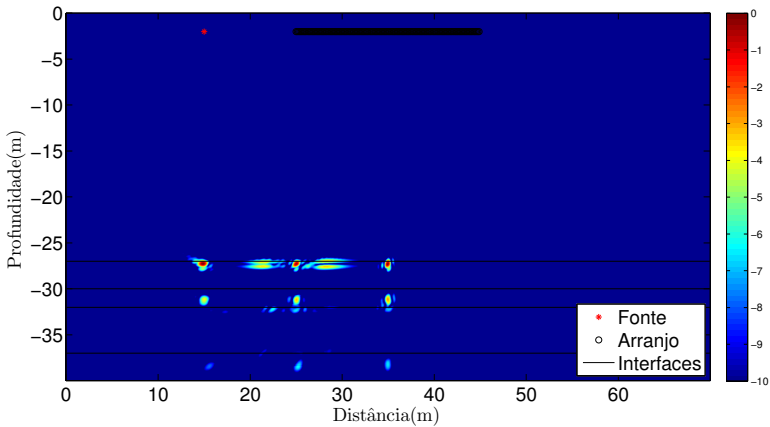
(a) $f_c = 5000$ Hz.(b) $f_c = 5000$ Hz, filtrado.

Figura 6.14.: Imageamento sem e com a filtragem das interfaces geológicas para as frequências centrais de 5000 Hz.

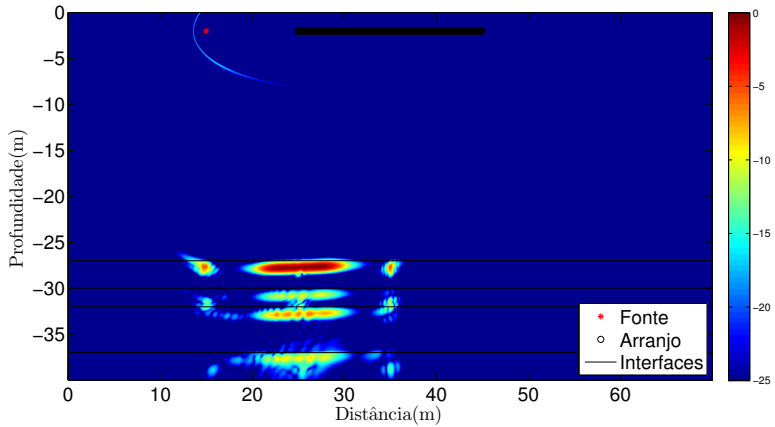
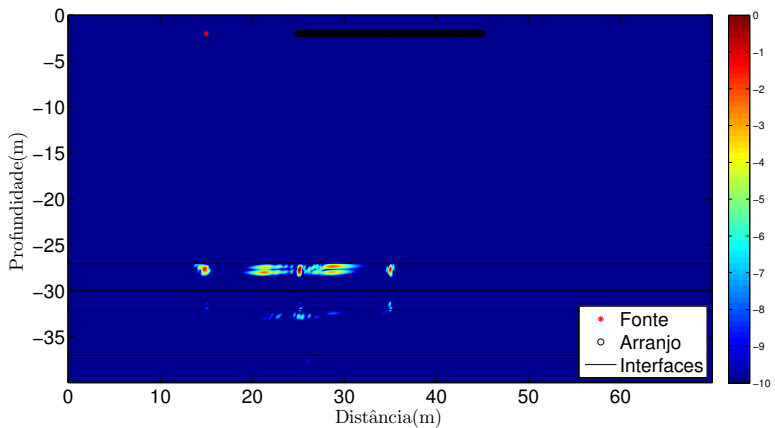
(a) $f_c = 7500$ Hz.(b) $f_c = 7500$ Hz, filtrado.

Figura 6.15.: Imageamento sem e com a filtragem das interfaces geológicas para as frequências centrais de 7500 Hz.

As Figuras 6.12 (a) e 6.12 (b) mostram que, para a frequência de 1000 Hz, não é alcançada uma resolução que permita a diferenciação das frentes de onda espalhadas e refletidas, o que resulta em artefatos indesejados. De modo que o projetista, de acordo com as conclusões obtidas nas discussões acima, sabe que tem algumas opções para obter melhores resultados: manter o espaçamento entre hidrofones e aumentar o número de hidrofones (aumentar a abertura), ou aumentar o espaçamento mantendo o número de hidrofones, tomando o cuidado para que o *aliasing* resultante não comprometa as informações de interesse, caso queira manter este sinal de entrada.

As Figuras 6.13 (a) e 6.13 (b) já mostram um bom resultado da filtragem de camadas geológicas, permitindo a visualização dos espalhadores nas primeiras duas camadas. Um detalhe a se destacar nesta configuração é a presença de dois máximos em torno da posição real dos espalhadores ao invés de apenas um máximo, alguns autores [57, 58, 131] reportam artefatos similares em suas imagens como duas reflexões oriundas do espalhador, uma referente à reflexão/difração em seu topo, e outra em a reflexão/difração em seu fundo. Porém, Bakker [132] afirma que para que tais reflexões sejam vistas, o pulso incidente deve ser agudo o bastante, tal que $\tau_{pc} < 2\phi$, sendo ϕ o raio do espalhador. Para o caso em questão essa condição não é atendida, sendo necessária uma análise mais profunda para verificar essa questão.

As Figuras 6.14 (a) e 6.14 (b) apresentaram o melhor desempenho das configurações testadas, apresentando os espalhadores bem destacados e com ótima resolução. Já as Figuras 6.15 (a) e 6.15 (b) apresentaram um resultado inesperado, percebe-se que mesmo na Figura 6.15 (a) os máximos referentes às reflexões especulares já estão consideravelmente deslocados em relação às interfaces. Verificou-se em um momento posterior que esse erro ocorreu no *matched filtering*, como pode ser visto na Figura 6.16, percebe-se que o centro do pico está claramente atrasado em relação ao início do sinal, o que reflete no imageamento, representando as interfaces como se estivessem mais profundas do que realmente estão.

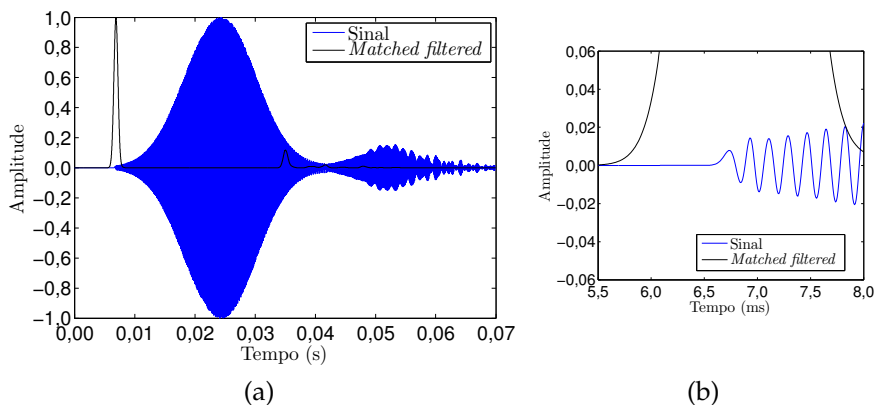
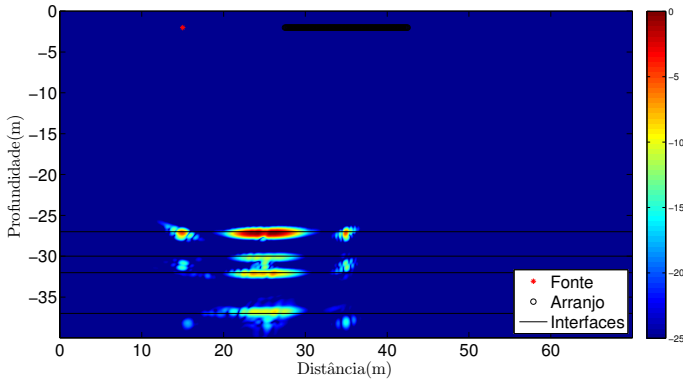
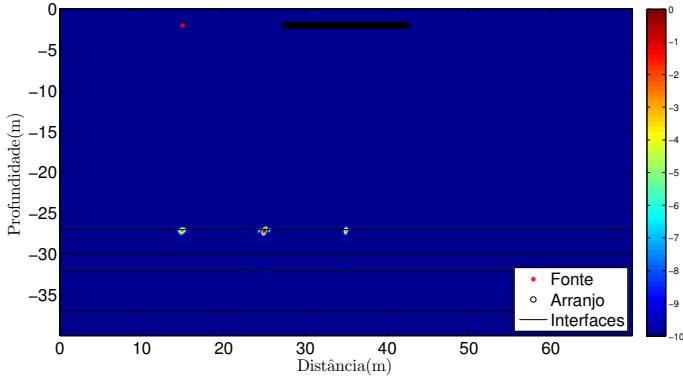


Figura 6.16.: Sinal simulado para o primeiro hidrofone e o resultado de seu *matched filter* com o sinal de entrada. (a) sinais completos e (b) detalhamento dos sinais.

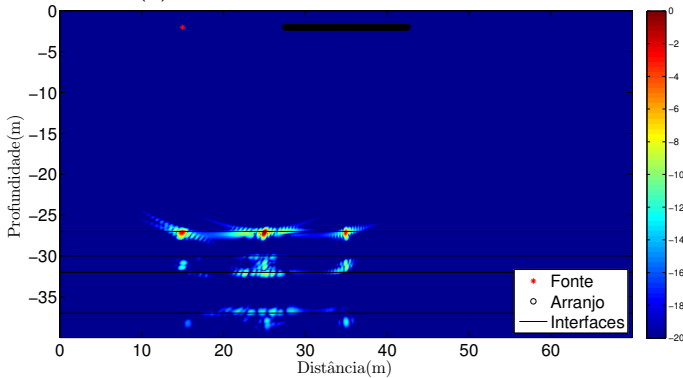
Esse efeito ocorre, provavelmente, devido à uma distorção do sinal provocada pela dispersão numérica inerente à resolução da equação da onda por um esquema em diferenças finitas. O autor do Simsonic© recomenda que sejam utilizados um mínimo de 10 elementos para descrever o menor comprimento de onda presente na análise. Além disso, esse critério deve ser revisto para condições em que a distância de propagação seja da ordem de dezenas de comprimentos de onda, sendo recomendadas relações de até 20 ou mais elementos por comprimento de onda nesse caso [133]. Para as configurações cuja frequência central do *chirp* é igual a 7500 Hz e largura de banda igual a 4000 Hz, tem-se uma relação de aproximadamente 8 elementos para o menor comprimento de onda, não cumprindo ambos os critérios. Para tentar verificar essa hipótese foi simulado a mesma configuração que é apresentada na Figura 6.14 (a), mas com o dobro da discretização (Figura 6.17), verificou-se na Figura 6.17 (a) que as interfaces são representadas em suas posições corretas. Mas que, mesmo com o correto posicionamento das interfaces, a filtragem das camadas não melhorou satisfatoriamente a relação sinal-ruído para os espalhadores do segundo e terceiro conjunto (Figura 6.17 (c)).



(a) Não filtrado



(b) Filtrado, escala de -10 dB a 0 dB

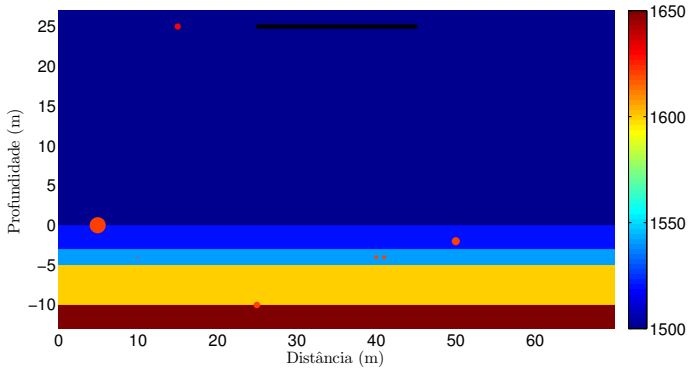


(c) Filtrado, escala de -20 dB a 0 dB

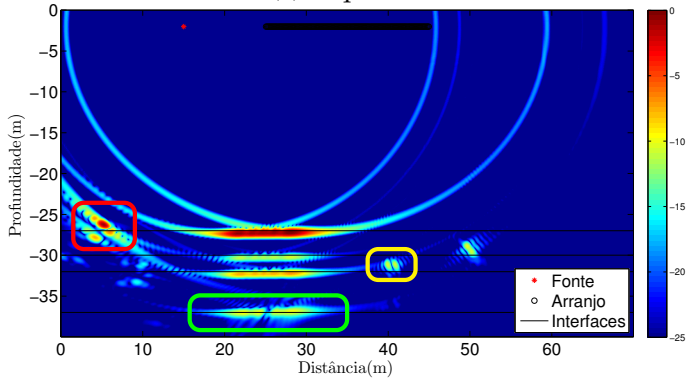
Figura 6.17.: Imageamento sem e com a filtragem das interfaces geológicas para a configuração 46#, com um modelo com uma discretização duas vezes maior.

6.7 Estudos complementares

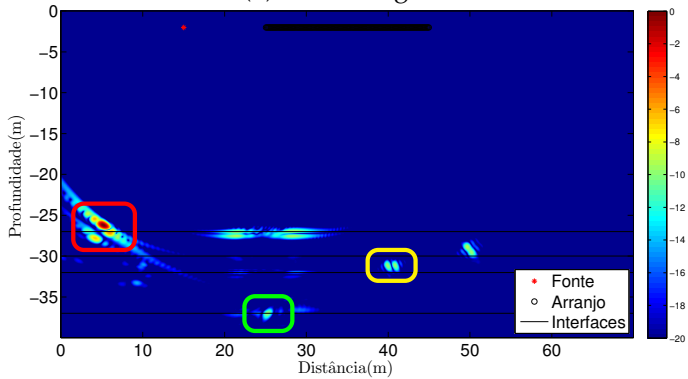
Compreendendo o efeito que os parâmetros construtivos do arranjo de medição têm sobre o imageamento de espalhadores, pode ser interessante mostrar a aplicação do algoritmo de imageamento de espalhadores para diferentes configurações do ambiente. Mantêm-se a estrutura das camadas geológicas, reorganizando apenas as posições, tamanhos e propriedades dos espalhadores. São avaliadas três configurações, a primeira (Figura 6.18) apresenta espalhadores com diâmetros diverso sendo dois destes posicionados próximos uma ao outro, tal que o interesse é verificar se a configuração de arranjo determinada nos estudos acima é capaz de separar corretamente estes espalhadores na distância.



(a) Esquema



(b) Sem filtragem



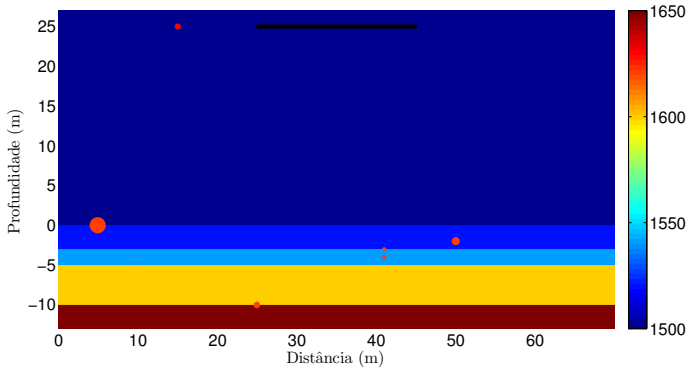
(c) Com filtragem

Figura 6.18.: Estudo da primeira configuração complementar, que avalia qual é o efeito que diferentes tamanhos de espalhadores e diferentes distâncias horizontais entre espalhadores têm sobre o imageamento.

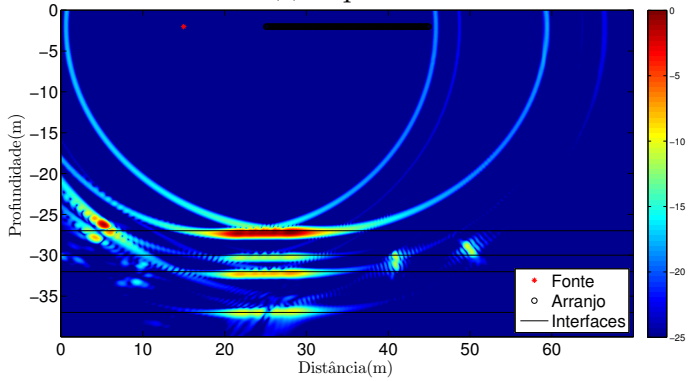
Observa-se na marcação amarela das Figuras 6.18 (b) e 6.18 (c) que a configuração de arranjo de bom desempenho definida nos estudos das seções acima – um arranjo com 20 m de abertura, 143 hidrofones e a uma distância de 20 m da fonte, com um *chirp* centrado em 5000 Hz – permite a separação dos dois espalhadores distanciados 0,5 m um do outro. Pode-se destacar também que nesse novo ambiente simulado existe apenas um espalhador localizado próximo a região de reflexão especular, e que o algoritmo de filtragem permite separá-lo da interface, como é visto na marcação verde.

Outro detalhe a ser observado, é em como o espalhador contido dentro da marcação vermelha aparece no imageamento. Percebe-se uma região de maior amplitude, provavelmente referente à reflexão das ondas na interface água-espalhador, à direita e abaixo desse máximo verifica-se outro máximo, de menor amplitude, que pode ser proveniente do caminho de reflexão fonte-interface-espalhador-receptores, conforme indica Williams [57]. Já o outro máximo, mais abaixo e à esquerda, provavelmente se deve à reflexão da onda na interface espalhador-substrato [58], conforme mencionado na Seção 6.6.

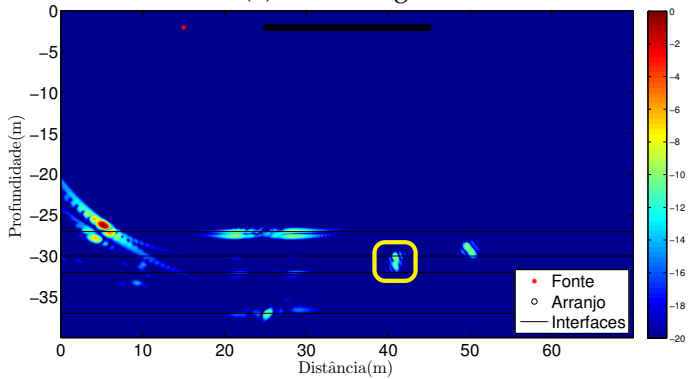
Na segunda configuração (Figura 6.19), também se deseja verificar a capacidade de separar dois espalhadores próximos, mas agora na profundidade.



(a) Esquema



(b) Sem filtragem

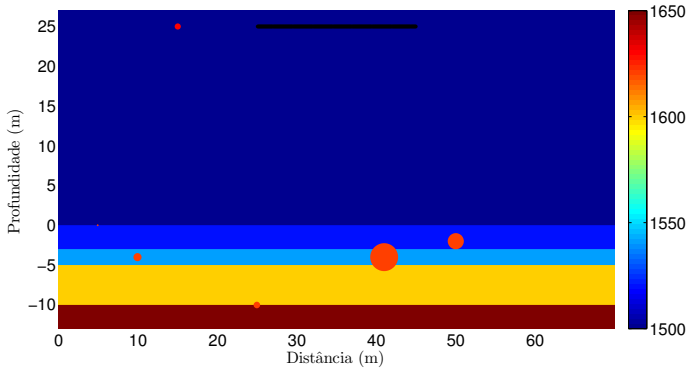


(c) Com filtragem

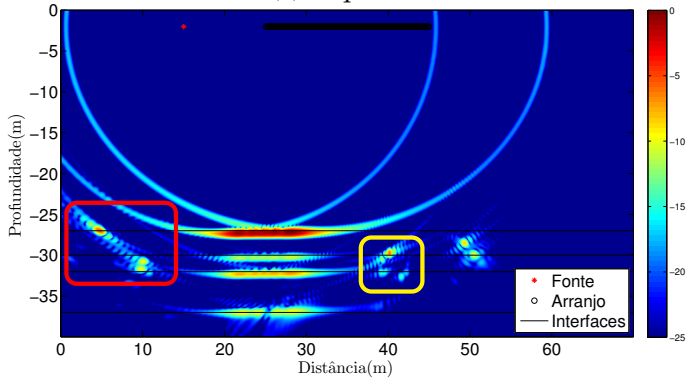
Figura 6.19.: Estudo da segunda configuração complementar, que avalia qual é o efeito que diferentes tamanhos de espalhadores e diferentes distâncias verticais entre espalhadores têm sobre o imageamento.

Observa-se, na marcação amarela, que as amplitudes referentes a cada um dos espalhadores acabam se encostando, a separação dos espalhadores não é satisfatória. Para que fosse possível separar os espalhadores, a resolução radial – definida no Capítulo 4 – deve ser melhorada. Para tal, poderia ser aumentada a largura de banda do *chirp* de entrada.

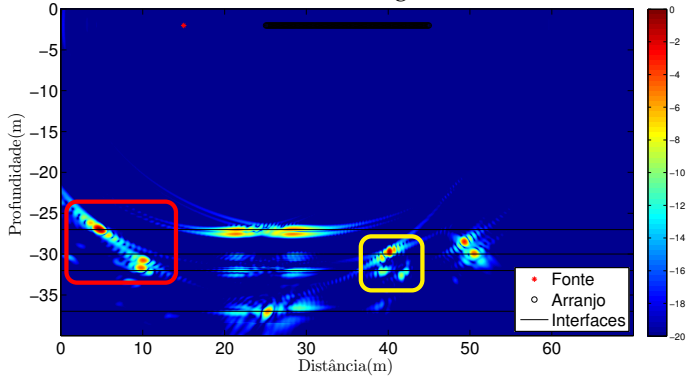
Já a terceira configuração (Figura 6.20) apresenta um espalhador grande, sendo seu diâmetro maior que a camada a qual este ocupa. Deseja-se verificar como esta situação é registrada pelo algoritmo de imageamento.



(a) Esquema



(b) Sem filtragem



(c) Com filtragem

Figura 6.20.: Estudo da terceira configuração complementar, que avalia qual é o efeito que diferentes espalhadores com diâmetro maior que uma camada têm sobre os resultados de imageamento.

Nessa configuração, foi reduzido o diâmetro do espalhador mais à esquerda (marcação vermelha da Figura 6.20 (b)), e ele passou a ser identificado com apenas um máximo, além disso, o segundo espalhador – que antes era pequeno e apresentava baixa amplitude – foi aumentado e passou ser representado por dois máximos. Ambas essas observações são um bom indício de que a hipótese de reflexão na interface espalhador-substrato esteja correta. Já na marcação amarela, verifica-se que, o espalhador maior que a camada, acaba não sendo bem representado na imagem. Isso ocorre, porque suas dimensões são consideravelmente maiores que o comprimento de onda incidente, de forma que ele não se comporta como espalhador pontual. Sua presença é verificada devido aos efeitos dos caminhos de reflexão (substrato-espalhador, fonte-interface-espalhador-receptores, e espalhador-substrato), como quatro pontos de maior amplitude. Também é perceptível uma adição de distorções próximas à quarta interface quando comparadas as Figura 6.20 (c) e 6.19 (c). Esse efeito é, provavelmente, resultado da interação das ondas refletidas na interface e das ondas espalhadas pelo grande espalhador, pois seus tempos de viagem são similares.

7 Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo a implementação de um método para a localização de heterogeneidades volumétricas (espalhadores) na subsuperfície (substrato) de áreas submersas. Juntamente, também foi avaliado o impacto que diferentes parâmetros de um sistema de medição têm sobre a localização de espalhadores com o método implementado. De forma a atingir este objetivo e deixar clara a implementação do método, foram abordados diversos conceitos ao longo deste documento.

Primeiramente, foi realizada uma breve revisão sobre os métodos utilizados na área de geofísica para a caracterização de ambientes submerso, assim como uma revisão bibliográfica mais detalhada da aplicação de técnicas acústicas/sísmicas na caracterização completa do ambiente submerso. Destacando trabalhos na literatura em que estas técnicas são utilizadas para a localização de objetos enterrado na subsuperfície

Na sequência, feita uma revisão bibliográfica dos métodos numéricos usualmente aplicados aos problemas de acústica/sísmica em ambientes submersos. O método das diferenças finitas, se destacou como uma ótima ferramenta para a obtenção de dados de sísmica, pois, além de modelar os fenômenos de interesse, como a reflexão, refração e difração das onda acústicas, também permite o modelamento de geometrias complexas e com variações de propriedades físicas ao longo do volume.

Para a melhor compreensão do estudo a ser realizado, o procedimento usual de investigação acústica em ambientes submerso, sua configuração e os dados gerados foram descritos. Sendo expostas as principais formas de apresentar estes dados, assim como algumas

técnicas de processamento como o NMO ou o empilhamento, todavia com ênfase para o imageamento baseado na migração de Kirchhoff.

Com o intuito de facilitar interpretação desse dados de investigações sísmicas, foi implementado um algoritmo de imageamento de espalhadores. O algoritmo baseia-se em um procedimento em que sinais referentes às interfaces geológicas presentes no substrato são retirados dos sinais medidos. Para encontrar o tempo correto em que os sinais referentes às interfaces geológicas estão presentes, utiliza-se um imageamento baseado no método da fonte imagem. Com essa informação, determinam-se os ecos das interfaces como uma média dos ecos para aquela interface em cada um dos hidrofones de um arranjo, para então subtraí-los do sinal completo.

De forma a testar os algoritmos implementados, foram desenvolvidos modelos para simular uma investigação de sísmica em um ambiente submerso típico. A resolução destes modelos foi realizada utilizando-se o código de diferenças finitas no domínio do tempo SimSonic©. Este código permite o modelamento de um meio multicamadas – cada camada com diferentes propriedades geoacústicas – com a presença de espalhadores, fornecendo como saída resultados de pressão sonora medida em um arranjo de hidrofones.

Os modelos numéricos desenvolvidos foram utilizados para realizar a validação do algoritmo de imageamento de espalhadores. Sendo então realizada uma análise paramétrica, com o objetivo de melhor compreender a influência que parâmetros construtivos do arranjo têm sobre o resultado de imageamento. Com esse estudo buscou-se dar uma base para que o projetista de um sistema medição – que tenha o objetivo de imagear espalhadores – possa otimizar seu sistema em relação ao custo e a performance.

Como conclusões específicas do trabalho, destaca-se grande vantagem em pós-processar sinais – obtidos em investigações acústicas em ambientes submersos – na forma de imagens, com o auxílio da migração de Kirchhoff. O imageamento permite

extrair informações dos sinais que não podem ser detectadas quando estes são avaliados diretamente, pois eles migram os eventos de difração para sua posição no espaço, facilitando amplamente a interpretação dos dados. Com relação ao algoritmo de filtragem das camadas geológicas, verificou-se que ele auxilia na detecção de espalhadores dispersos no ambiente de interesse, pois ele aumenta a relação sinal-ruído desses espalhadores, já que elimina uma das maiores fontes de ruído para esse estudo, que são os ecos proveniente das interfaces. Outra conclusão importante de se destacar concerne a discretização utilizada para os modelos de diferenças finitas. Verificou-se que, mesmo para uma relação de cerca de dez pontos de discretização por comprimento de onda, os resultados apresentaram um considerável erro de dispersão, alterando parcialmente a forma do sinal, acarretando no posicionamento incorreto dos ecos após o *matched filtering*. Essa distorção está associada à frequência de análise, mas também às distâncias de propagação, de forma que para maiores distâncias de propagação o critério típico de discretização deve ser revisto.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para pesquisas futuras, sugere-se:

- a aplicação do algoritmo de imageamento de espalhadores em dados reais. Se possível, seria de interesse realizar um experimento controlado, onde se pudesse garantir um meio multicamadas com interfaces planas e horizontais. Porém, também seria proveitoso aplicar o imageamento de Kirchhoff a dados reais quaisquer e verificar as imagens geradas após a filtragem das camadas geológicas;
- melhoramento do algoritmo de fonte imagem. O algoritmo poderia ser estendido para tratar de ambientes multicamadas cujas interfaces apresentam curvaturas;
- desenvolver um modelo mais completo, que leve em consideração efeitos de múltiplas e de espalhamento por interfaces

rugosas.

- implementar a rotina de estimação dos parâmetros geoacústicos a partir dos mapas de fonte imagem e implementar a correção dessas velocidades de propagação ao algoritmo de imageamento;
- utilizar um outro método numérico, possivelmente elementos finitos, para gerar os dados de entrada do estudo, de modo a verificar se o mesmo efeito de distorção relacionado à distância de propagação é verificado.

Referências Bibliográficas

- [1] L. A. P. de Souza, *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2006.
(Citado nas páginas 39 e 41)
- [2] P. Kearey, M. Brooks, and I. Hill, *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons, 2013.
(Citado na página 40)
- [3] W. M. Telford, L. P. Geldart, and R. E. Sheriff, *Applied Geopysics*. Cambridge University Press, 1990.
(Citado na página 40)
- [4] L. A. Brooks, *Ocean acoustic interferometry*. Tese de doutorado, School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, Australia, 2008.
(Citado na página 40)
- [5] B. R. Biffard, *Seabed remote sensing by single-beam echosounder: models, methods and applications*. Tese de doutorado, School of Earth and Ocean Sciences, University of Victoria, 2011.
(Citado na página 40)
- [6] J. P. Ristow, “Estudo e desenvolvimento de algoritmos de sonar ativo para mapeamento de áreas submersas,” Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
(Citado nas páginas 41 e 94)
- [7] CONTEC, “Fabricação, construção, montagem, instalação e

pré-comissionamento de dutos rígidos submarinos,” relatório técnico, Petrobrás, 2014.

(Citado na página 41)

- [8] S. Pinson and L. Guillon, “Sound speed profile characterization by the image source method,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, p. 1685, 2010.

(Citado nas páginas 42, 49, 107 e 110)

- [9] S. Pinson, L. Guillon, and C. W. Holland, “Range dependent sediment sound speed profile measurements using the image source method,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, p. 156, 2013.

(Citado nas páginas 42, 49, 107 e 110)

- [10] S. Pinson and C. W. Holland, “Seafloor sound-speed profile and interface dip angle measurement by the image source method,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, p. 4240, 2013.

(Citado nas páginas 42, 49, 110 e 111)

- [11] M. Ainslie, *Principles of Sonar Performance Modelling*. Springer, 2010.

(Citado na página 45)

- [12] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*. Springer, 2011.

(Citado nas páginas 45, 52, 53 e 55)

- [13] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media, 2011.

(Citado na página 46)

- [14] P. C. Etter, *Underwater acoustic modeling and simulation*. CRC Press, 2013.

(Citado nas páginas 47, 53 e 54)

- [15] E. L. Carstensen and L. L. Foldy, “Propagation of sound through a liquid containing bubbles,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 19, no. 3, pp. 481–501, 1947.

(Citado na página 47)

- [16] J. D. Macpherson, "The effect of gas bubbles on sound propagation in water," *Proceedings of the Physical Society. Section B*, vol. 70, no. 1, p. 85, 1957.
(Citado na página 47)
- [17] L. L. Foldy, "Propagation of sound through a liquid containing bubbles. pt. 1, general theory.," relatório técnico, OSRD 3601, 1944.
(Citado na página 47)
- [18] K. U. Heeschen, A. M. Tréhu, R. W. Collier, E. Suess, and G. Rehder, "Distribution and height of methane bubble plumes on the cascadia margin characterized by acoustic imaging," *Geophysical Research Letters*, vol. 30, no. 12, 2003.
(Citado na página 47)
- [19] M. V. Hall, "A comprehensive model of wind-generated bubbles in the ocean and predictions of the effects on sound propagation at frequencies up to 40 khz," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 86, no. 3, pp. 1103–1117, 1989.
(Citado na página 47)
- [20] T. K. Stanton, D. Chu, and P. H. Wiebe, "Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups," *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, vol. 53, no. 2, pp. 289–295, 1996.
(Citado na página 47)
- [21] T. K. Stanton, D. Chu, P. H. Wiebe, R. L. Eastwood, and J. D. Warren, "Acoustic scattering by benthic and planktonic shelled animals," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 108, no. 2, pp. 535–550, 2000.
(Citado na página 47)
- [22] G. A. Colombo, H. Mianzan, and A. Madirolas, "Acoustic characterization of gelatinous plankton aggregations: four case studies from the argentine continental shelf," *ICES*

Journal of Marine Science: Journal du Conseil, vol. 60, no. 3, pp. 650–657, 2003.

(Citado na página 47)

- [23] B. Katsnelson, V. Petnikov, and J. Lynch, *Fundamentals of Shallow Water Acoustics*. Springer Science+Business Media,, 2012.

(Citado nas páginas 47 e 48)

- [24] A. G. D. OLIVEIRA, “Uma análise de métodos de supressão de múltiplas de superfície livre aplicados a um dado real,” Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará, 2011.

(Citado na página 47)

- [25] C. Eckart, “The scattering of sound from the sea surface,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 25, no. 3, pp. 566–570, 1953.

(Citado na página 47)

- [26] C. Eckart, “The scattering of sound from the sea surface,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 25, p. 566, 1954.

(Citado na página 47)

- [27] A. G. Voronovich, “Small-slope approximation in wave scattering by rough surfaces,” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 89, p. 116, 1985.

(Citado na página 47)

- [28] S. T. McDaniel, “Sea surface reverberation: A review,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 94, no. 4, pp. 1905–1922, 1993.

(Citado na página 47)

- [29] D. R. Jackson and M. D. Richardson, *High Frequency Seafloor Acoustics*. Springer, 2007.

(Citado nas páginas 48, 124 e 125)

- [30] A. N. Ivakin, “A unified approach to volume and roughness scattering,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, no. 2, pp. 827–837, 1998.

(Citado na página 48)

- [31] D. R. Jackson, R. I. Odom, M. L. Boyd, and A. N. Ivakin, "A geoacoustic bottom interaction model (gabim)," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 35, no. 3, pp. 603–617, 2010.
(Citado na página 48)
- [32] M. J. Isakson, N. P. Chotiros, R. A. Yarbrough, and J. N. Piper, "Quantifying the effects of roughness scattering on reflection loss measurements," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, pp. 3687–3697, 2010.
(Citado na página 48)
- [33] M. J. Isakson and N. P. Chotiros, "Finite element modeling of acoustic scattering from fluid and elastic rough interfaces," *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, vol. 40, no. 2, pp. 475–484, 2015.
(Citado na página 48)
- [34] S. Passaro, "Marine electrical resistivity tomography for ship wreck detection in very shallow water: a case study from agropoli (salerno, southern italy)," *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, pp. 1989–1998, 2010.
(Citado na página 48)
- [35] L. A. P. de Souza, "Estratigrafia rasa de ultra-alta resolução na investigação de ambientes submersos," in *Apresentado no 47o Congresso Brasileiro de Geologia*, 2014.
(Citado na página 48)
- [36] A. A. Neto, "The use of geophysical methods for the location and monitoring of buried pipelines at the shore zone." 2014.
(Citado na página 48)
- [37] D. Mindell and B. Bingham, "A high-frequency, narrow-beam sub bottom profiler for archaeological applications," in *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 4, pp. 2115–2123 vol.4, 2001.
(Citado na página 49)

- [38] J. Kosalos and D. Chayes, "A portable system for ocean bottom imaging and charting," in *OCEANS '83, Proceedings*, pp. 649–656, Aug 1983.
(Citado na página 49)
- [39] J. Dybedal and R. Boe, "Ultra high resolution sub-bottom profiling for detection of thin layers and objects," in *OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.'* *Proceedings*, vol. 1, pp. I/634–I/638 vol.1, Sep 1994.
(Citado na página 49)
- [40] W.-M. Tian, "Integrated method for the detection and location of underwater pipelines," *Applied Acoustics*, vol. 69, no. 5, pp. 387 – 398, 2008.
(Citado nas páginas 49, 93 e 127)
- [41] L. M. BREKHOVSKIKH, *Waves in Layered Media*. Applied Mathematics and Mechanics 6, Academic Press, Elsevier, 1960.
(Citado na página 49)
- [42] L. BREKHOVSKIKH, *Waves in Layered Media*. Applied Mathematics and Mechanics 16, Academic Press, Elsevier, 1980.
(Citado na página 49)
- [43] D. M. F. C. (auth.), M. I. Taroudakis, and G. N. Makrakis, *Inverse Problems in Underwater Acoustics*. Springer-Verlag New York, 1 ed., 2001.
(Citado na página 49)
- [44] Y.-M. Jiang, N. R. Chapman, and P. Gerstoft, "Short range travel time geoacoustic inversion with vertical line array," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, no. 3, pp. EL135–EL140, 2008.
(Citado na página 49)
- [45] M. Siderius, P. L. Nielsen, and P. Gerstoft, "Range-dependent seabed characterization by inversion of acoustic data from

- a towed receiver array," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, p. 1523, 2002.
(Citado na página 49)
- [46] S. E. Dosso, M. J. Wilmut, and A. L. S. Lapinski, "An adaptive-hybrid algorithm for geoacoustic inversion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, pp. 324–336, Jul 2001.
(Citado na página 49)
- [47] V. Valkovic, D. Sudac, D. Matika, and R. Kollar, "An underwater system for explosive detection," in *Optics and Photonics in Global Homeland Security III*, 2007.
(Citado na página 50)
- [48] R. Lim, J. L. Lopes, R. H. Hackman, and D. G. Todoroff, "Scattering by objects buried in underwater sediments: Theory and experiment," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, no. 4, pp. 1762–1783, 1993.
(Citado na página 50)
- [49] S. G. Schock, A. Tellier, J. Wulf, J. Sara, and M. Ericksen, "Buried object scanning sonar," *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, 2001.
(Citado na página 50)
- [50] A. Maguer, W. L. J. Fox, H. Schmidt, E. Pouliquen, and E. Bovio, "Mechanisms for subcritical penetration into a sandy bottom: Experimental and modeling results," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, pp. 1215–1225, March 2000.
(Citado na página 50)
- [51] I. Lucifredi and H. Schmidt, "Subcritical scattering from buried elastic shells," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 120, pp. 3566–3583, December 2006.
(Citado na página 50)
- [52] S. T. G. MUIR, C. W. HORTON and L. A. THOMPSON, "The penetration of highly directional acoustic beams into

sediment,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 64, pp. 539–551, January 1979.

(Citado na página 50)

- [53] D. J. Wingham, “A theoretical study of the penetration of a water sediment interface by a parametric beam,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 76, no. 4, pp. 1192–1200, 1984.

(Citado na página 50)

- [54] D. J. Wingham, N. G. Pace, and R. V. Ceen, “An experimental study of the penetration of a water-sediment interface by a parametric beam,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, no. 2, pp. 363–374, 1986.

(Citado na página 50)

- [55] N. P. Chotiros, A. M. Mautner, A. Løvik, A. Kristensen, and O. Bergem, “Acoustic penetration of a silty sand sediment in the 1-10 khz band,” *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, vol. 22, pp. 604–615, October 1997.

(Citado na página 50)

- [56] M. A. Pinto, A. Bellettini, R. Hollett, and A. Tesei, “Real- and synthetic-array signal processing of buried targets,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 27, pp. 484–494, Jul 2002.

(Citado nas páginas 50 e 127)

- [57] K. L. Williams, S. G. Kargl, E. I. Thorsos, D. S. Burnett, J. L. Lopes, M. Zampolli, and P. L. Marston, “Acoustic scattering from a solid aluminum cylinder in contact with a sand sediment: Measurements, modeling, and interpretation,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 6, pp. 3356–3371, 2010.

(Citado nas páginas 51, 168 e 173)

- [58] R. Gritto, V. Korneev, and L. Johnson, “Detection and classification of buried uxu and determination of seafloor parameters in littoral environments using resonance scattering

sonar,” relatório técnico, Department of Defense Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP), 2010.

(Citado nas páginas 51, 168 e 173)

- [59] H. L. Roitblat, W. W. Au, P. E. Nachtigall, R. Shizumura, and G. Moons, “Sonar recognition of targets embedded in sediment,” *Neural Networks*, vol. 8, no. 7, pp. 1263–1273, 1995.
(Citado na página 51)
- [60] D. Boulinguez and A. Quinquis, “A new way of identifying buried objects,” in *OCEANS ’99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*, vol. 3, pp. 1552–1556 vol.3, 1999.
(Citado na página 51)
- [61] A. Trucco, “Detection of objects buried in the seafloor by a pattern-recognition approach,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, pp. 769–782, Oct 2001.
(Citado na página 51)
- [62] L. Borcea, F. G. Del Cueto, G. Papanicolaou, and C. Tsogka, “Filtering deterministic layer effects in imaging,” *Multiscale Modeling & Simulation*, vol. 7, no. 3, pp. 1267–1301, 2009.
(Citado na página 51)
- [63] S. Pinson and C. Holland, “Layer filtering for seafloor scatterers imaging,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 137, no. 5, pp. EL355–EL359, 2015.
(Citado nas páginas 51 e 120)
- [64] L. M. Brekhovskikh and O. Godin, *Acoustics of layered media II: point sources and bounded beams*, vol. 10. Springer Science & Business Media, 2013.
(Citado na página 52)
- [65] N. Atalla, *A numerical study of fuselage scattering effects on rotor noise*. Tese de doutorado, Florida Atlantic Univ., Boca Raton, 1991.
(Citado na página 52)

- [66] F. D. Tappert, *The parabolic approximation method*, pp. 224–287. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1977.
(Citado na página 52)
- [67] M. D. Collins, “A split-step padé solution for the parabolic equation method,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, no. 4, pp. 1736–1742, 1993.
(Citado na página 53)
- [68] V. Voller, “Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems,” *Numerical Heat Transfer*, vol. 17, no. 2, pp. 155–169, 1990.
(Citado na página 53)
- [69] C. W. Gear and L. R. Petzold, “Ode methods for the solution of differential/algebraic systems,” *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 21, no. 4, pp. 716–728, 1984.
(Citado na página 53)
- [70] M. Zlámal, “Finite element methods for parabolic equations,” *mathematics of computation*, vol. 28, no. 126, pp. 393–404, 1974.
(Citado na página 53)
- [71] C. Pekeris, U. S. O. of Scientific Research, and D. N. D. R. Committee, *Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water*. 1945.
(Citado na página 54)
- [72] M. B. Porter, “The kraken normal mode program,” relatório técnico, DTIC Document, 1992.
(Citado na página 54)
- [73] F. R. T. O.C. Zienkiewicz, CBE and J. Z. (Auth.), *The Finite Element Method Set. Its Basis and Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, 6 ed., 2005.
(Citado na página 55)
- [74] Z. Alterman and F. Karal, “Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 58, no. 1, pp. 367–398, 1968.

(Citado na página 55)

- [75] E. Coiras and J. Groen, *Simulation and 3D reconstruction of side-looking sonar images*. INTECH Open Access Publisher, 2009.

(Citado na página 56)

- [76] S. H. Gray, J. Etgen, J. Dellinger, and D. Whitmore, "Seismic migration problems and solutions," *Geophysics*, vol. 66, no. 5, pp. 1622–1640, 2001.

(Citado nas páginas 56, 67 e 81)

- [77] H. Kuttruff, *Acoustics: An Introduction*. CRC Press, 2007.

(Citado nas páginas 57, 59, 70 e 78)

- [78] A. B. C. J. V. S. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 4 ed., 1999.

(Citado na página 58)

- [79] P. M. Morse, H. Feshbach, *et al.*, *Methods of theoretical physics*, vol. 1. McGraw-Hill New York, 1953. pg. 806-806.

(Citado nas páginas 59 e 71)

- [80] R. S. T. de Carvalho, *Modelo físico de huygens na solução discretizada de campos acústicos*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

(Citado na página 60)

- [81] M. R. Bai, J.-G. Ih, and J. Benesty, *Acoustic Array Systems: Theory, Implementation, and Application*. John Wiley & Sons, 2013.

(Citado nas páginas 59 e 71)

- [82] G. T. Schuster, *Seismic Interferometry*. Cambridge University Press, 1 ed., 2009.

(Citado nas páginas 59 e 71)

- [83] W. A. Schneider, "Integral formulation for migration in two and three dimensions," *Geophysics*, vol. 43, no. 1, pp. 49–76, 1978.

(Citado nas páginas 60, 71, 82 e 83)

- [84] M. S. Christian Grossmann, Hans-Görg Roos, *Numerical treatment of partial differential equations*-. Springer, 2007.
(Citado nas páginas 61, 65 e 72)
- [85] G. C. Cohen, *Higher-Order Numerical Methods for Transient Wave Equations*. Springer, 2002.
(Citado nas páginas 61 e 72)
- [86] U. K. . E. Viggen, “Computational methods in acoustics,” 2011. This compendium is written for the course TTT12 Numerical acoustics at the Norwegian University of Science and Technology.
(Citado na página 61)
- [87] R. Alford, K. Kelly, and D. M. Boore, “Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation,” *Geophysics*, vol. 39, no. 6, pp. 834–842, 1974.
(Citado nas páginas 62 e 73)
- [88] U. R. Kristiansen and E. Viggen, “Computational methods in acoustics,” *Department of electronics and telecommunications, NTNU*, vol. 69, 2010.
(Citado na página 62)
- [89] E. Bossy, M. Talmant, and P. Laugier, “Three-dimensional simulations of ultrasonic axial transmission velocity measurement on cortical bone models,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 115, no. 5, pp. 2314–2324, 2004.
(Citado nas páginas 62 e 73)
- [90] J. Virieux, “Sh-wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method,” *Geophysics*, vol. 49, no. 11, pp. 1933–1942, 1984.
(Citado nas páginas 63 e 73)
- [91] J. Virieux, “P-sv wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method,” *Geophysics*, vol. 51, no. 4, pp. 889–901, 1986.
(Citado nas páginas 63 e 73)

- [92] L. Di Bartolo, *Modelagem sísmica Anisotrópica Através do Método das diferenças finitas utilizando sistemas de equações em segunda ordem*. Tese de doutorado, Ph. D. Thesis, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
(Citado nas páginas 63 e 74)
- [93] C. S. C. Herman Medwin, *Fundamentals of Acoustical Oceanography (Applications of Modern Acoustics)*. 1st ed., 1997.
(Citado na página 77)
- [94] N. Bleistein, J. K. Cohen, W. John Jr, *et al.*, *Mathematics of multidimensional seismic imaging, migration, and inversion*, vol. 13. Springer Science & Business Media, 2013.
(Citado na página 77)
- [95] G. F. Margrave, “Methods of seismic data processing.” *Geophysics* 55/657 Course Lecture Notes, Winter 2006, The University of Calgary.
(Citado nas páginas 78 e 79)
- [96] Ö. Yilmaz, *Seismic data analysis*, vol. 1. Society of exploration geophysicists Tulsa, 1987.
(Citado na página 81)
- [97] N. Bleistein, *Mathematical methods for wave phenomena*. Academic Press, 2012.
(Citado na página 83)
- [98] J. Wiggins, “Kirchhoff integral extrapolation and migration of nonplanar data,” *Geophysics*, vol. 49, no. 8, pp. 1239–1248, 1984.
(Citado na página 83)
- [99] W. S. French, “Computer migration of oblique seismic reflection profiles,” *Geophysics*, vol. 40, no. 6, pp. 961–980, 1975.
(Citado na página 85)
- [100] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array signal processing: concepts and techniques*. Simon & Schuster, 1992.
(Citado nas páginas 86 e 161)

- [101] K. Shin and J. K. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. John Wiley & Sons Inc., 2008.
(Citado nas páginas 86 e 91)
- [102] A. D. Waite, *Sonar for practising engineers*. John Wiley & Sons Incorporated, 2002.
(Citado na página 92)
- [103] E. R.L.Jr., *Fourier methods in imaging*. The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology, Wiley, 2010.
(Citado nas páginas 94, 99 e 101)
- [104] J. P. Ristow, “Estudo e desenvolvimento de algoritmos de sonar ativo para o mapeamento de áreas submersas,” Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
(Citado na página 94)
- [105] W. D. Fonseca, *Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
(Citado nas páginas 94 e 95)
- [106] L. Josefsson and P. Persson, *Conformal array antenna theory and design*, vol. 29. John wiley & sons, 2006.
(Citado na página 95)
- [107] S. Pinson, *Caractérisation des fonds marins par la méthode des sources images*. Tese de doutorado, Université de Bretagne occidentale-Brest, 2011.
(Citado nas páginas 107 e 127)
- [108] A. J. Romano, *Linear Systems Approach to Image Source Representations of the Sound Fields in Enclosures*. Tese de doutorado, The Pennsylvania State University, 1986.
(Citado nas páginas 107 e 109)
- [109] S. J. Thompson, *Interactive image-source techniques for virtual acoustics*. Tese de doutorado, University of Toronto (Canada), 2002.

(Citado na página 107)

- [110] P. S. Kovitz, *Extensions to the image method model of sound propagation in a room*. Tese de doutorado, The Pennsylvania State University, 1994.
(Citado na página 107)
- [111] C. F. Eyring, “Reverberation time in “dead” rooms,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 1, p. 217, 1930.
(Citado na página 109)
- [112] D. Mintzer, “Transient sound in rooms,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, p. 341, 1950.
(Citado na página 109)
- [113] J. B. Allen and D. A. Berkley, “Image method for efficiently simulating small-room acoustics,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 65, p. 943, 1979.
(Citado na página 109)
- [114] E. A. Lehmann and A. M. Johansson, “Prediction of energy decay in room impulse responses simulated with an image-source model,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 124, p. 269, 2008.
(Citado na página 110)
- [115] E. A. Lehmann and A. M. Johansson, “Particle filter with integrated voice activity detection for acoustic source tracking,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, p. 11, 2006.
(Citado na página 110)
- [116] K. Hollman, K. Rigby, and M. O’Donnell, “Coherence factor of speckle from a multi-row probe,” in *Ultrasonics Symposium, 1999. Proceedings. 1999 IEEE*, vol. 2, pp. 1257–1260, IEEE, 1999.
(Citado na página 113)
- [117] J. F. Claerbout, *Earth soundings analysis: Processing versus inversion*, vol. 6. Blackwell Scientific Publications Cambridge, Massachusetts, USA, 1992.
(Citado na página 115)

- [118] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, "Digital image processing," *Nueva Jersey*, 2008.
(Citado na página 118)
- [119] A. W. Robert Fisher, Simon Perkins and E. Wolfart, "Hypermedia image processing reference," jul 2016.
(Citado na página 118)
- [120] E. L. Hamilton, "Geoacoustic modeling of the sea floor," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 5, pp. 1313–1340, 1980.
(Citado na página 125)
- [121] E. L. Hamilton and R. T. Bachman, "Sound velocity and related properties of marine sediments," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72, no. 6, pp. 1891–1904, 1982.
(Citado na página 125)
- [122] C.-T. Chen and F. J. Millero, "Speed of sound in seawater at high pressures," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 62, no. 5, pp. 1129–1135, 1977.
(Citado nas páginas 126 e 127)
- [123] H. Medwin, "Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 58, no. 6, pp. 1318–1319, 1975.
(Citado na página 126)
- [124] F. P. Delavy, A. G. Figueiredo, R. C. Abuchacra, A. G. ao, and K. C. D. Macario, "Mapping of gas charged sediments in guanabara bay: Seismic characteristics and sediment properties," in *2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, pp. 1–6, July 2015.
(Citado na página 127)
- [125] A. A. Neto, J. d. N. Teixeira Mendes, J. M. G. de Souza, M. Redusino Jr, and R. Leandro Bastos Pontes, "Geotechnical influence on the acoustic properties of marine sediments of

- the santos basin, brazil," *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 31, no. 2, pp. 125–136, 2013.
(Citado na página 127)
- [126] E. L. Hamilton, "Compressional-wave attenuation in marine sediments," *Geophysics*, vol. 37, no. 4, pp. 620–646, 1972.
(Citado na página 127)
- [127] "Folheto do transdutor para ambientes submersos lubell ll-1424hp." <http://www.lubell.com/LL1424HP.html>. Acessado: 10-11-2016.
(Citado na página 136)
- [128] S. Rankin, J. Barlow, Y. Barkley, and R. Valtierra, "A guide to constructing hydrophone arrays for passive acoustic data collection during nmfs shipboard cetacean surveys," *US Department of Commerce Technical Memorandum NOAA-TM-NMFS-SWFSC-511*, 2013.
(Citado na página 137)
- [129] G. G. Azevedo, S. Pinson, J. A. Cordioli, and J. P. Ristow, "Influence of array configuration on the application of the image source method for the characterization of volume heterogeneities in the seafloor layers," in *2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, pp. 1–5, July 2015.
(Citado na página 138)
- [130] D. B. D. E. Lumley, J. F. Claerbout, "Anti-aliased kirchhoff 3-d migration," May 2001.
(Citado na página 142)
- [131] X. Li, E. J. Bond, B. D. Van Veen, and S. C. Hagness, "An overview of ultra-wideband microwave imaging via space-time beamforming for early-stage breast-cancer detection," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 19–34, 2005.
(Citado na página 168)

- [132] P. Bakker, “The acoustic response of a sphere in a two-layer half-space,” in *Acoustical imaging*, pp. 33–42, Springer, 1985.
(Citado na página 168)
- [133] E. Bossy, *SimSonic Suite Users Guide for SimSonic2D*, disponível em <http://www.simsonic.fr/> (Último acesso em 1 de Setembro de 2016).
(Citado na página 169)

Apêndices

A Resultados de imageamento para as diversas configurações avaliadas na análise paramétrica

Conforme mencionado no Capítulo 6, este apêndice contém os resultados de imageamento para cada uma das configurações descritas nas Tabelas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6. Devido ao tamanho da cópia física, o nível de detalhamento das figuras na cópia impressa não é ideal, sugere-se a utilização da versão eletrônica para melhor avaliar os resultados.

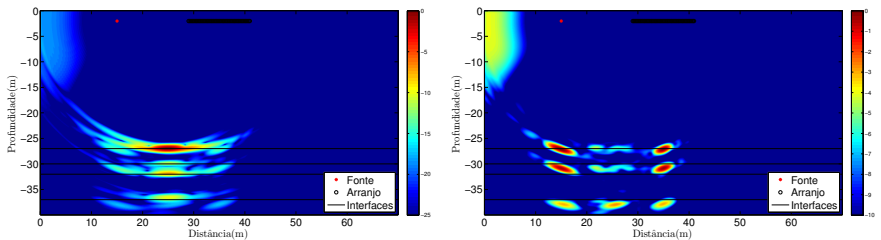


Figura A.1.: Configuração 1#.

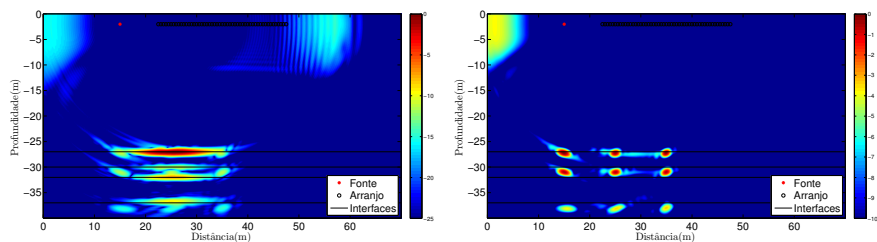


Figura A.2.: Configuração 2#.

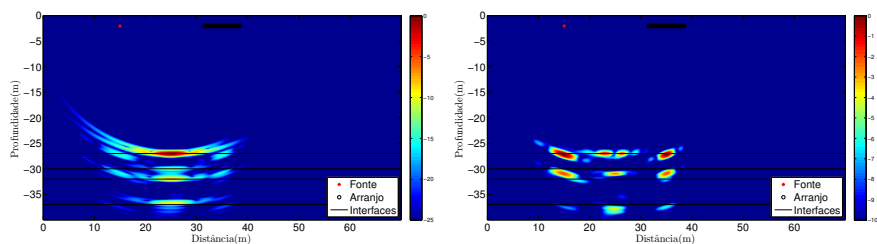


Figura A.3.: Configuração 4#.

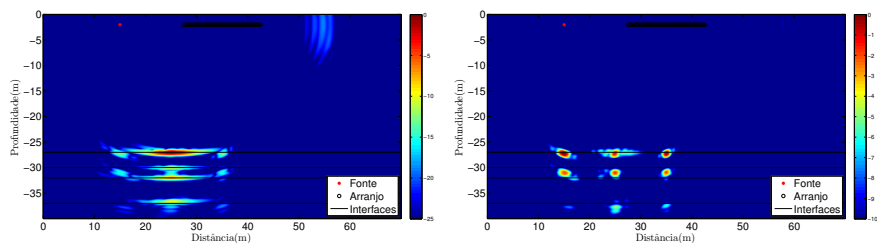


Figura A.4.: Configuração 5#.

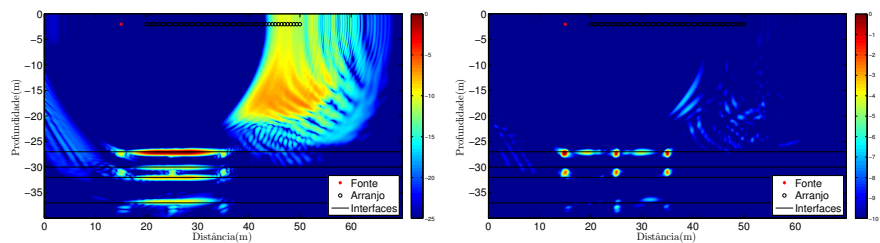


Figura A.5.: Configuração 6#.

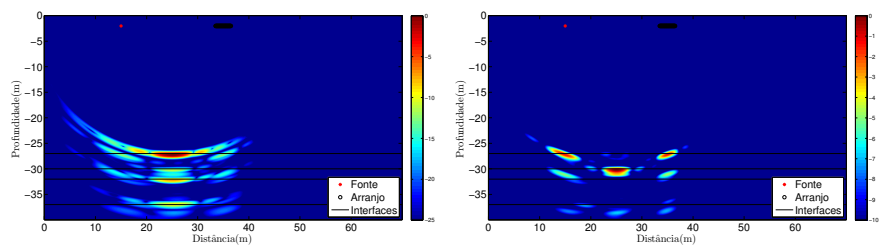


Figura A.6.: Configuração 8#.

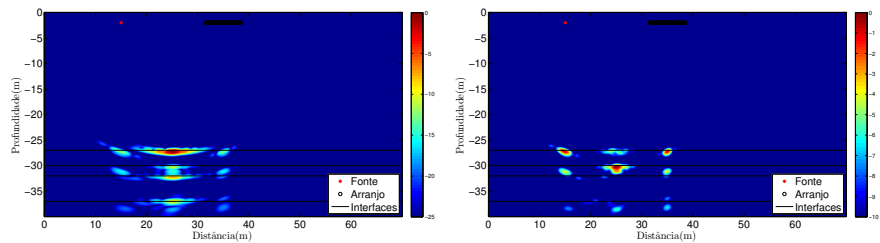


Figura A.7.: Configuração 9#.

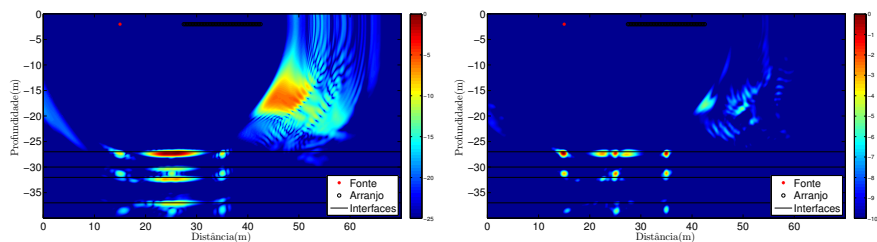


Figura A.8.: Configuração 10#.

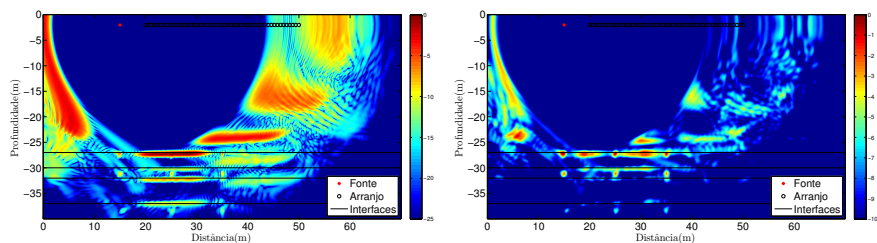


Figura A.9.: Configuração 11#.

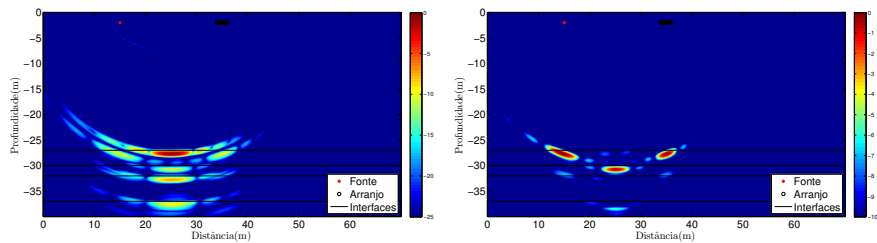


Figura A.10.: Configuração 13#.

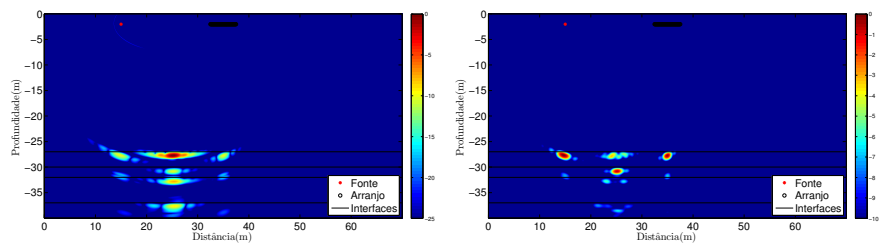


Figura A.11.: Configuração 14#.

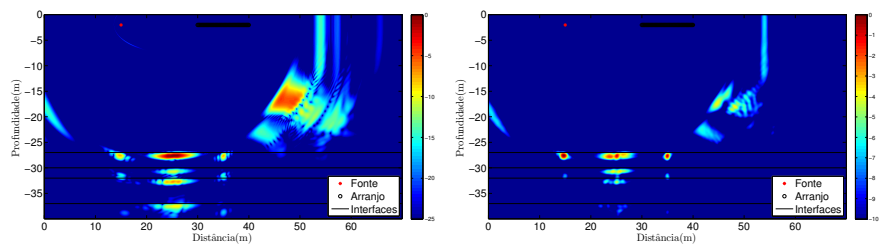


Figura A.12.: Configuração 15#.

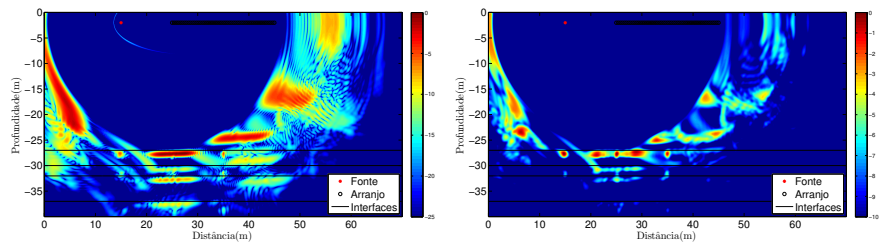


Figura A.13.: Configuração 16#.

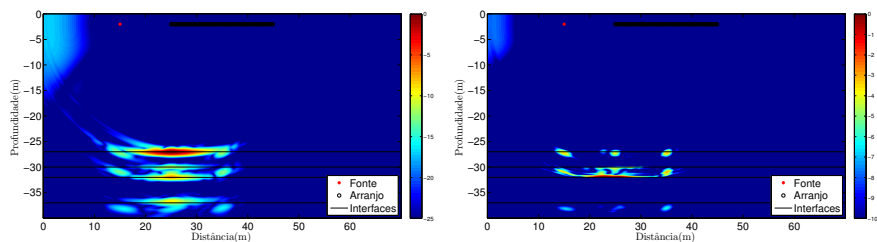


Figura A.14.: Configuração 18#.

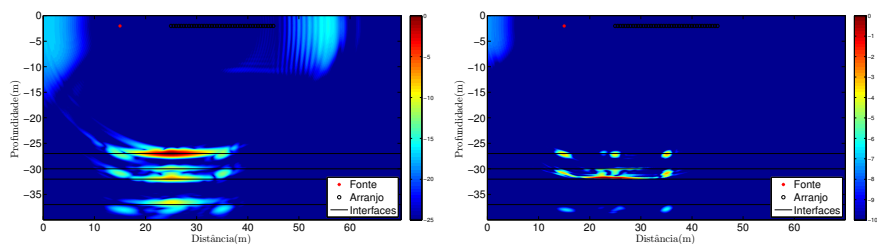


Figura A.15.: Configuração 19#.

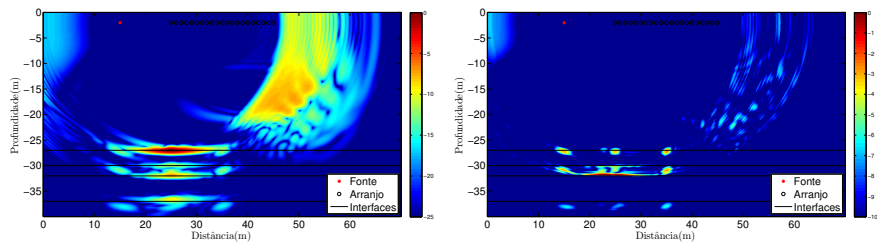


Figura A.16.: Configuração 20#.

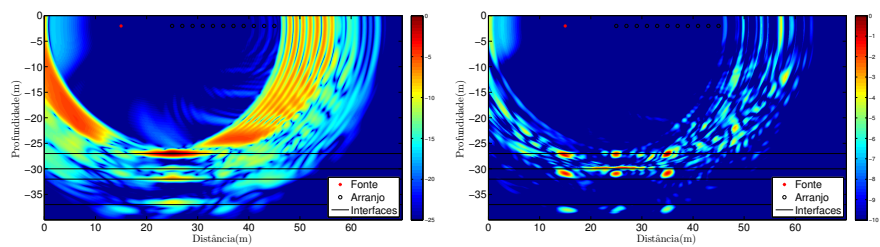


Figura A.17.: Configuração 21#.

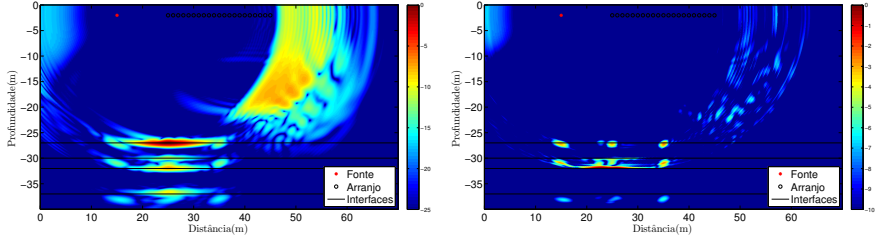


Figura A.18.: Configuração 22#.

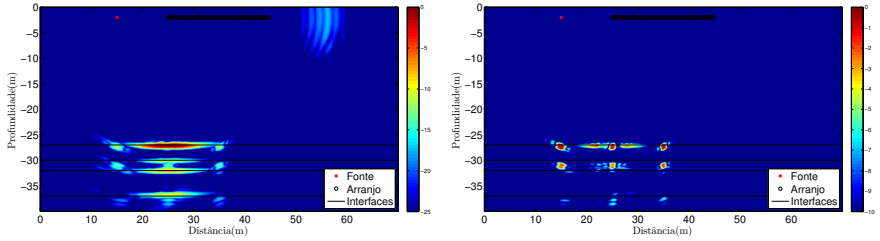


Figura A.19.: Configuração 23#.

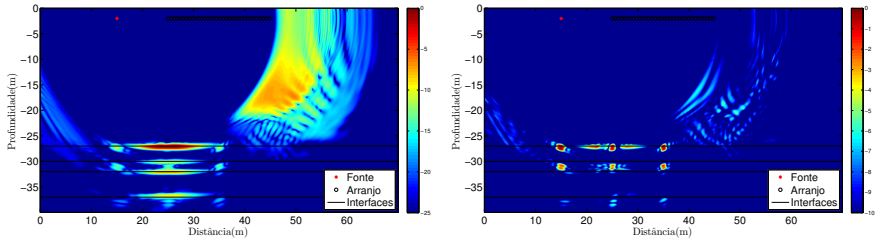


Figura A.20.: Configuração 24#.

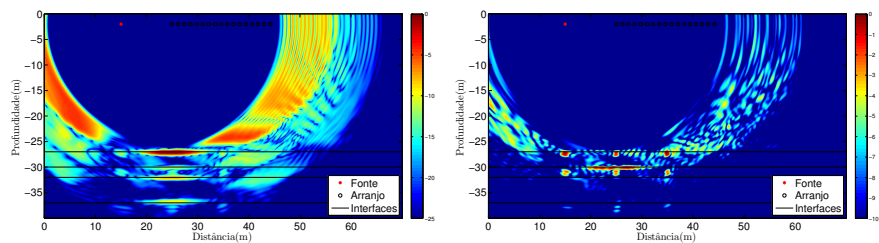


Figura A.21.: Configuração 25#.

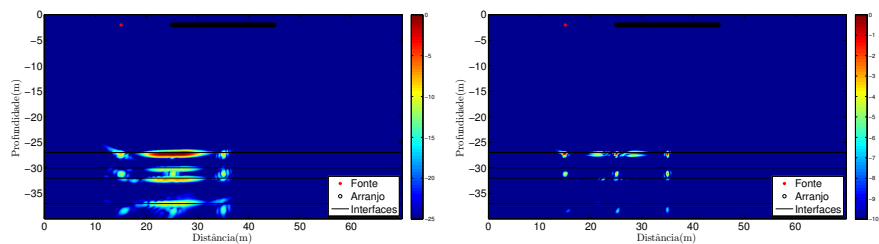


Figura A.22.: Configuração 26#.

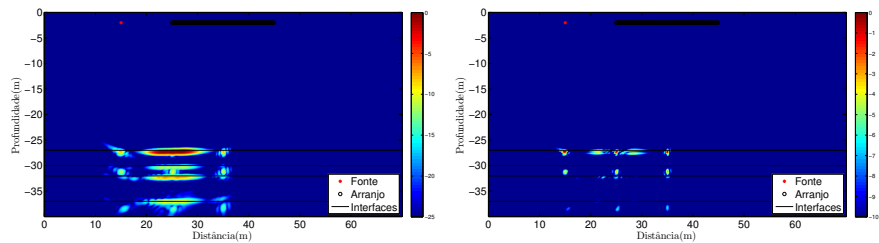


Figura A.23.: Configuração 27#.

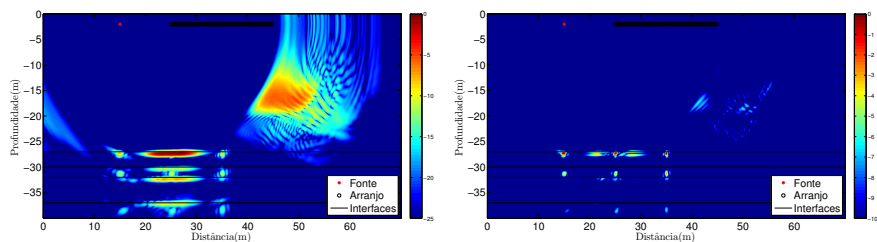


Figura A.24.: Configuração 28#.

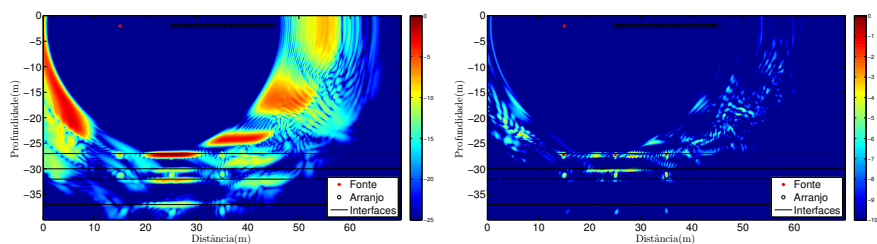


Figura A.25.: Configuração 29#.

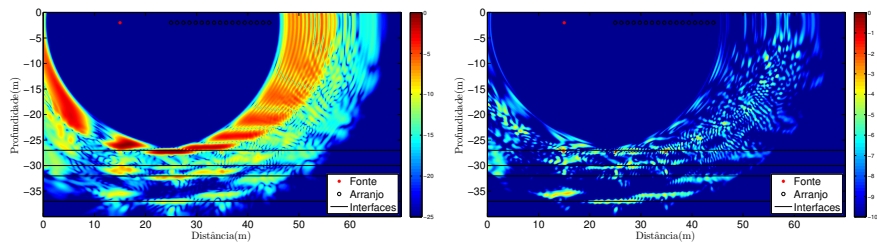


Figura A.26.: Configuração 30#.

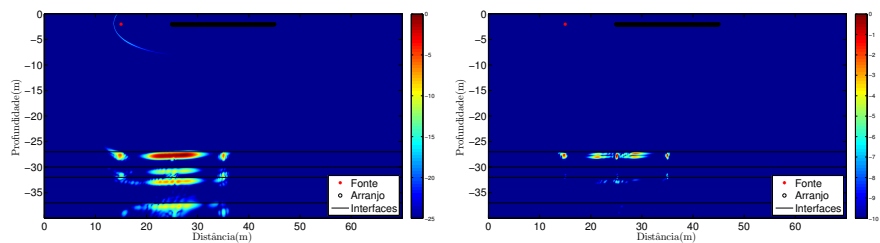


Figura A.27.: Configuração 31#.

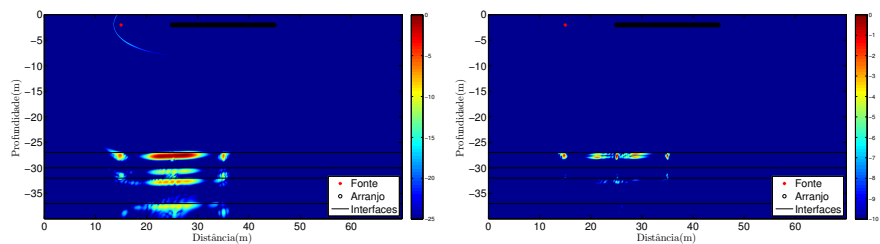


Figura A.28.: Configuração 32#.

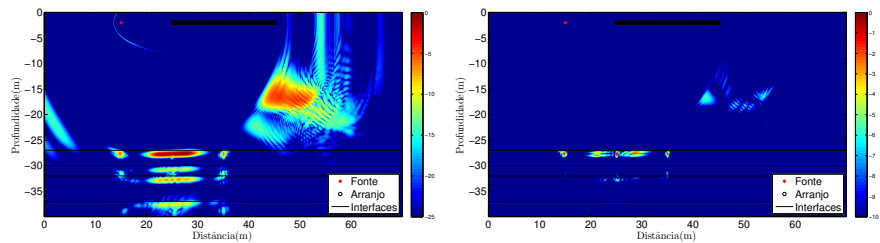


Figura A.29.: Configuração 33#.

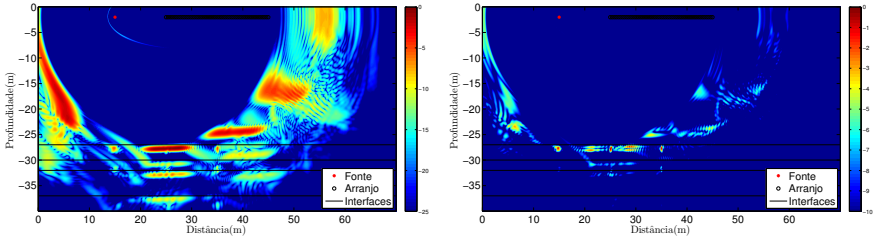


Figura A.30.: Configuração 34#.

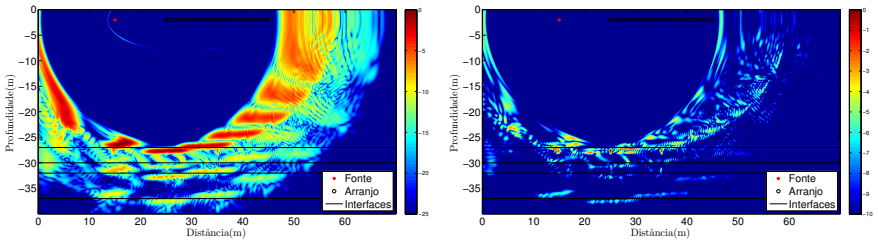


Figura A.31.: Configuração 35#.

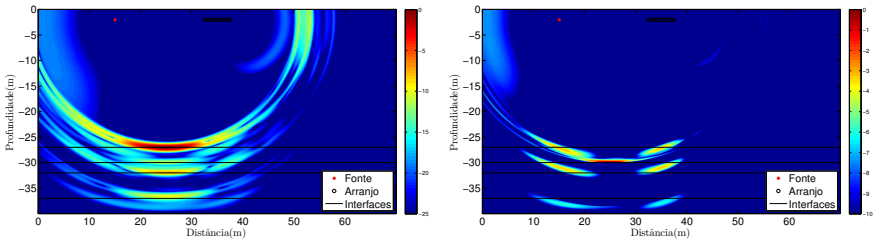


Figura A.32.: Configuração 36#.

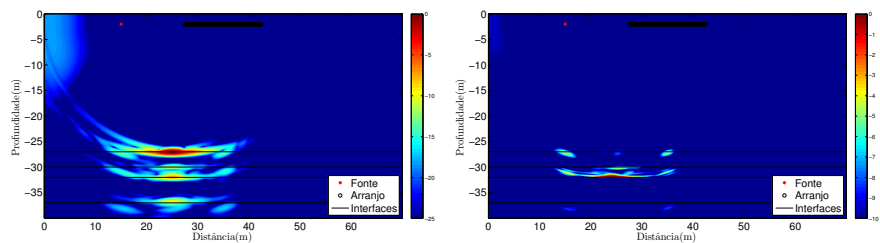


Figura A.33.: Configuração 37#.

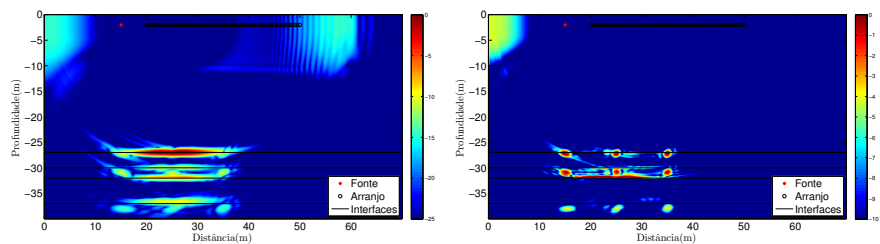


Figura A.34.: Configuração 38#.

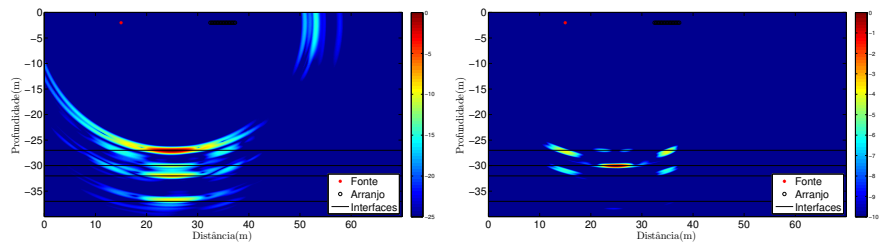


Figura A.35.: Configuração 39#.

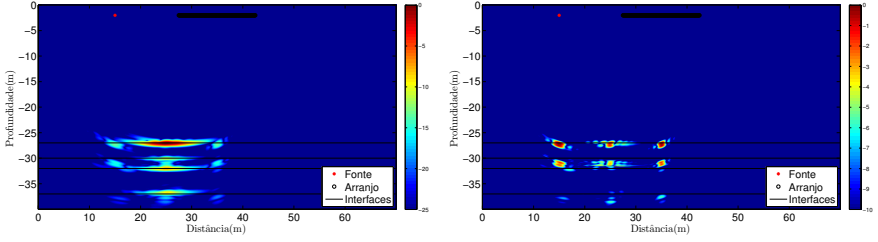


Figura A.36.: Configuração 40#.

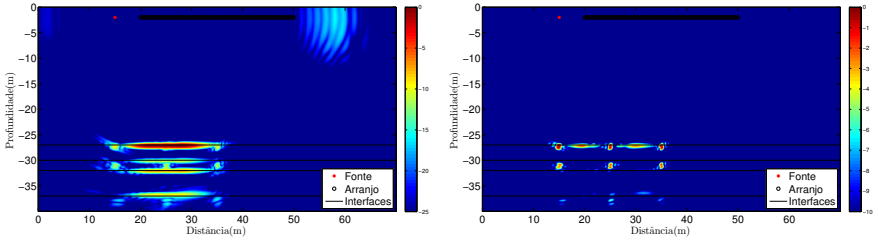


Figura A.37.: Configuração 41#.

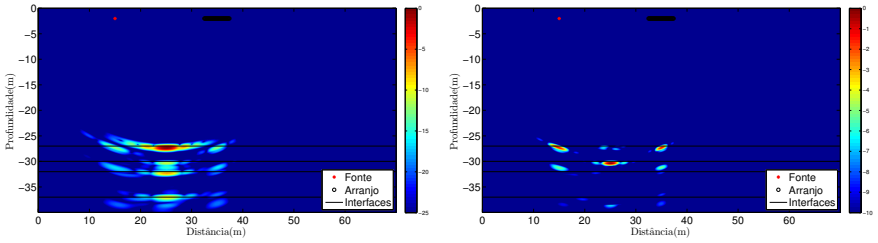


Figura A.38.: Configuração 42#.

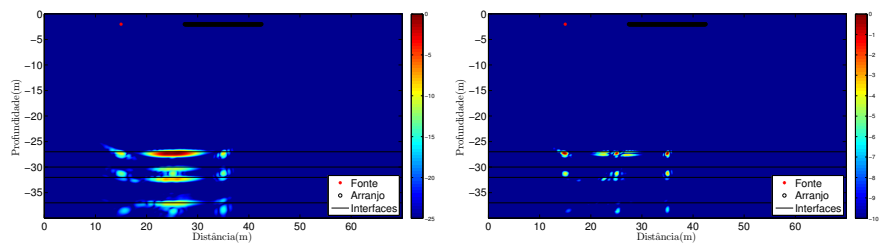


Figura A.39.: Configuração 43#.

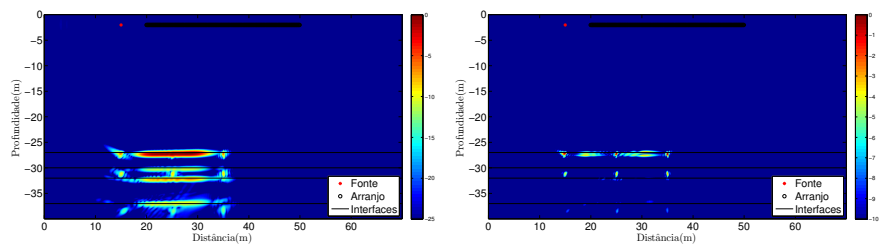


Figura A.40.: Configuração 44#.

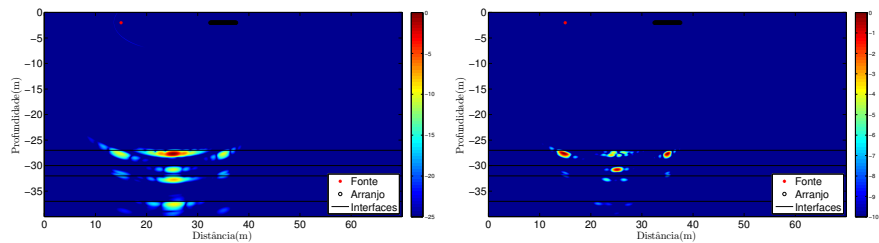


Figura A.41.: Configuração 45#.

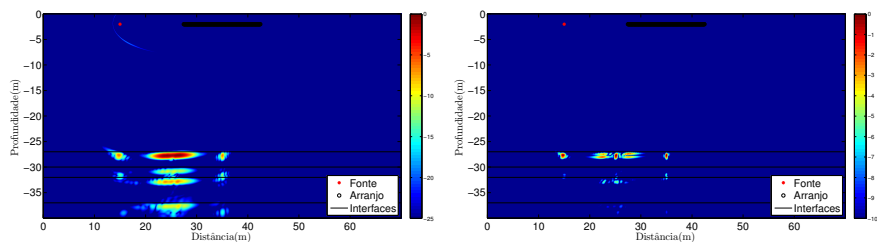


Figura A.42.: Configuração 46#.

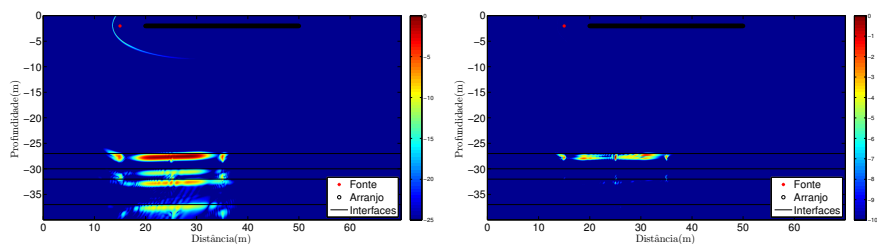


Figura A.43.: Configuração 47#.

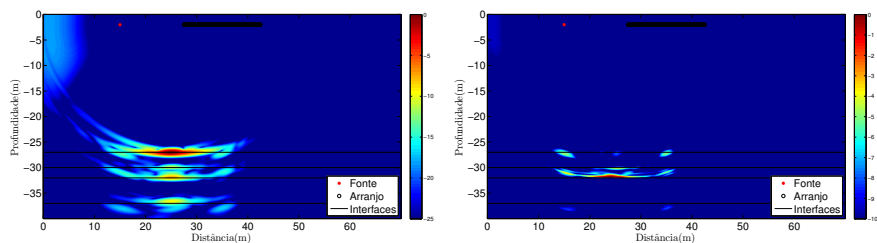


Figura A.44.: Configuração 48#.

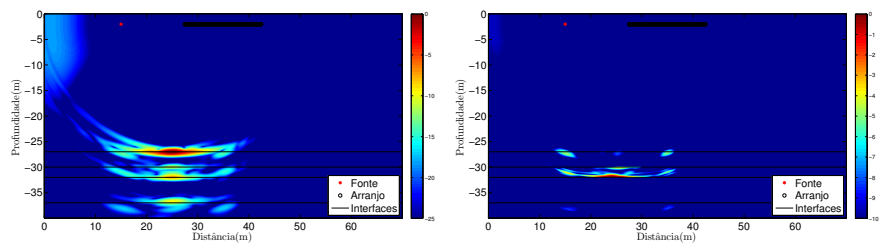


Figura A.45.: Configuração 49#.

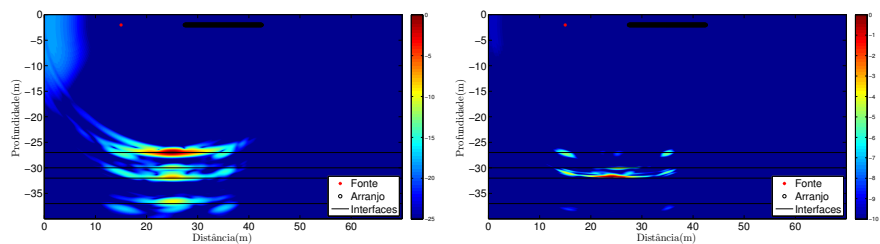


Figura A.46.: Configuração 50#.

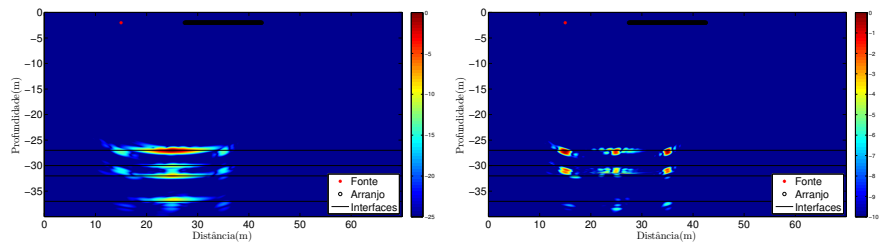


Figura A.47.: Configuração 51#.

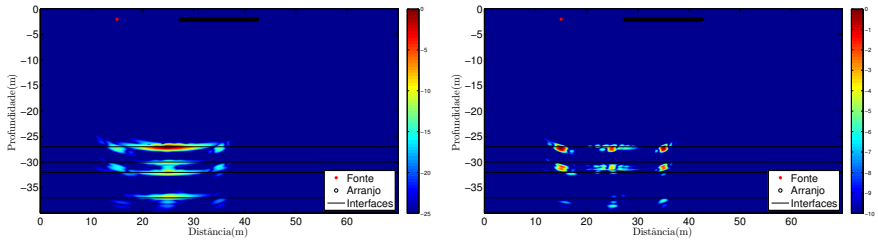


Figura A.48.: Configuração 52#.

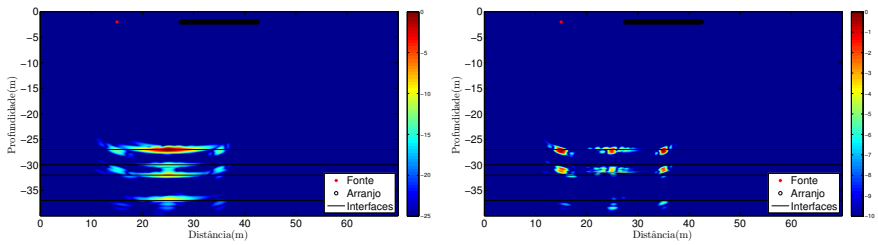


Figura A.49.: Configuração 53#.

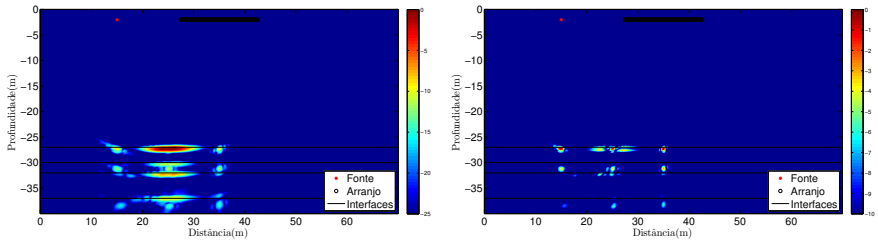


Figura A.50.: Configuração 54#.

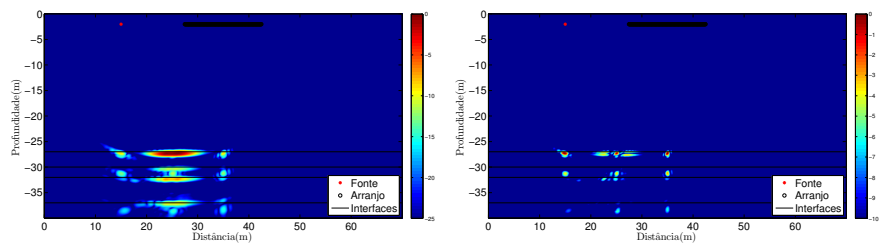


Figura A.51.: Configuração 55#.

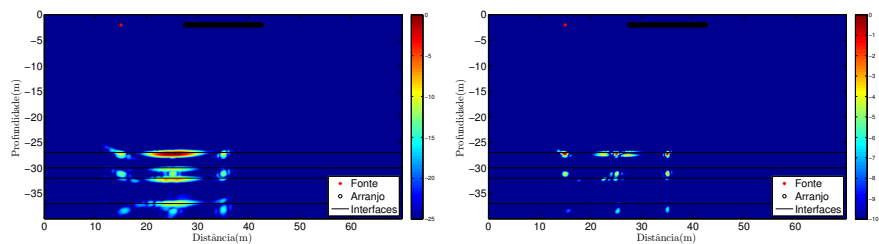


Figura A.52.: Configuração 56#.

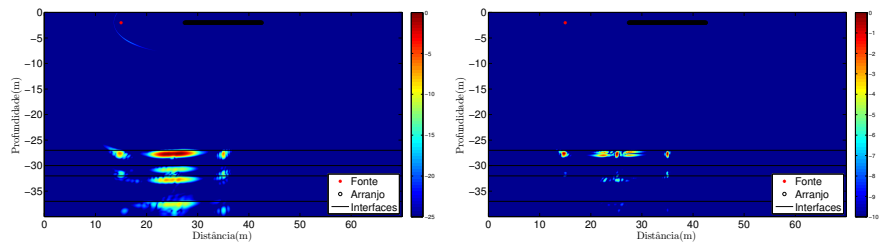


Figura A.53.: Configuração 57#.

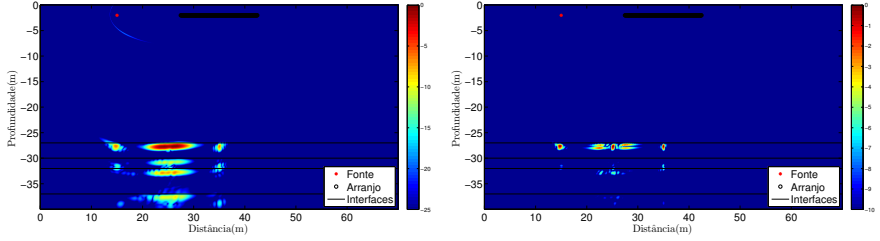


Figura A.54.: Configuração 58#.

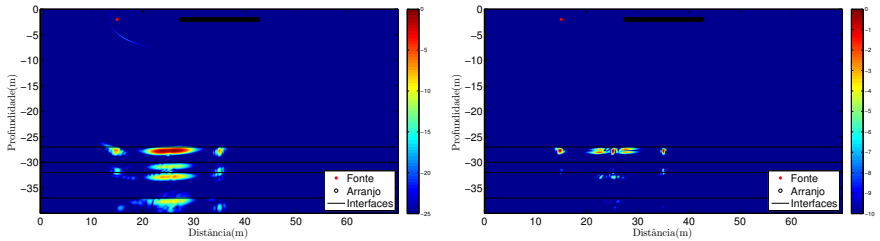


Figura A.55.: Configuração 59#.

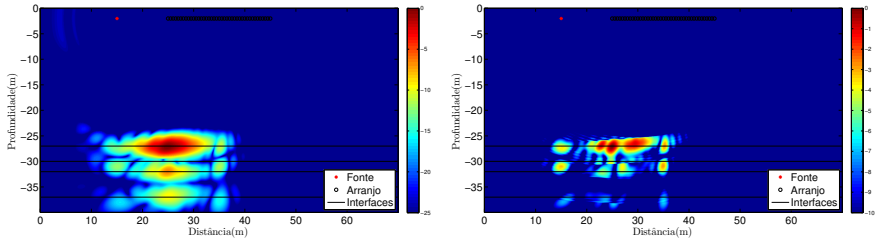


Figura A.56.: Configuração 60#.

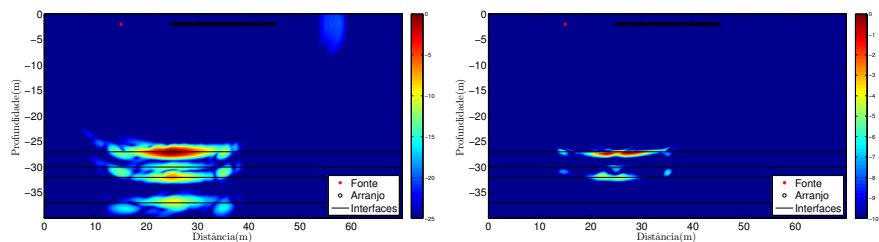


Figura A.57.: Configuração 61#.

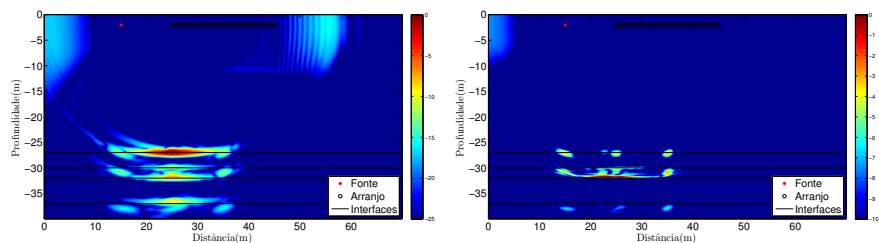


Figura A.58.: Configuração 62#.

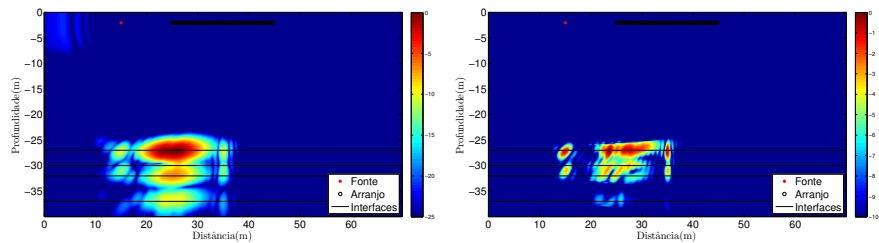


Figura A.59.: Configuração 63#.

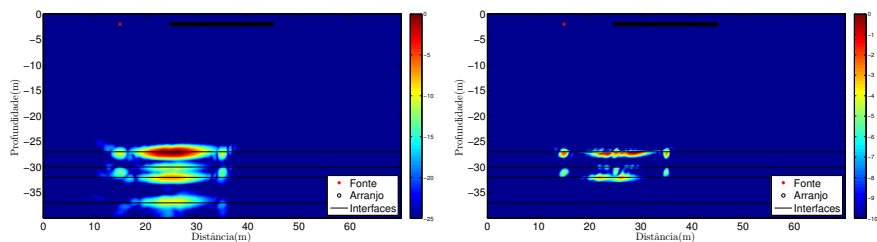


Figura A.60.: Configuração 64#.

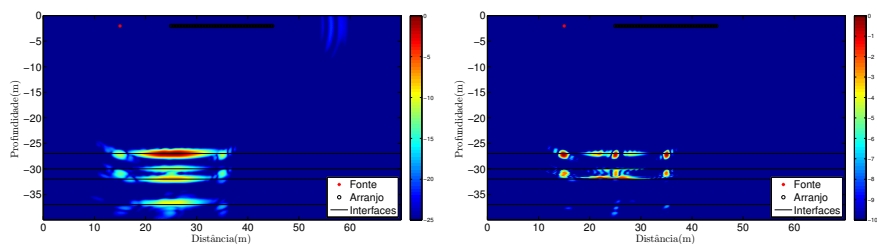


Figura A.61.: Configuração 65#.

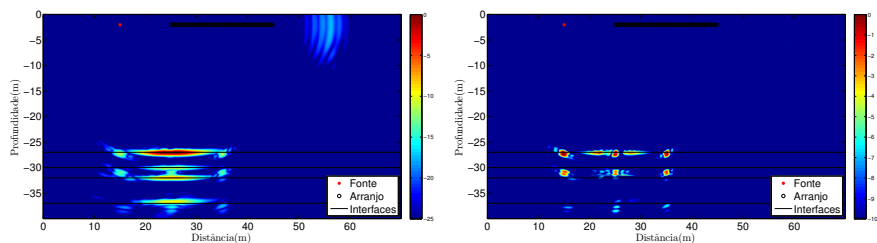


Figura A.62.: Configuração 66#.

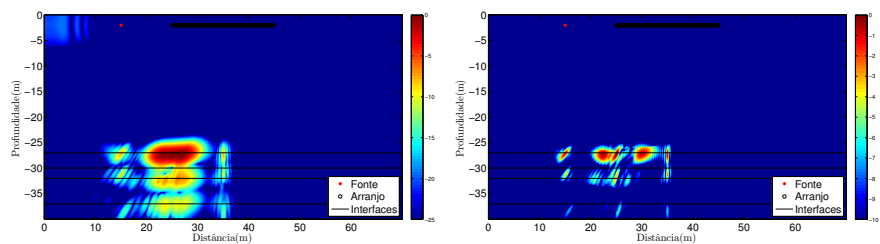


Figura A.63.: Configuração 67#.

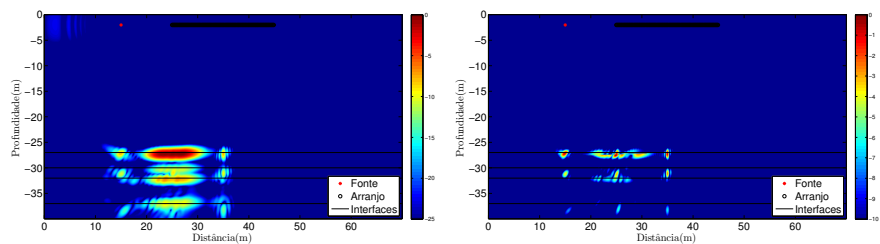


Figura A.64.: Configuração 68#.

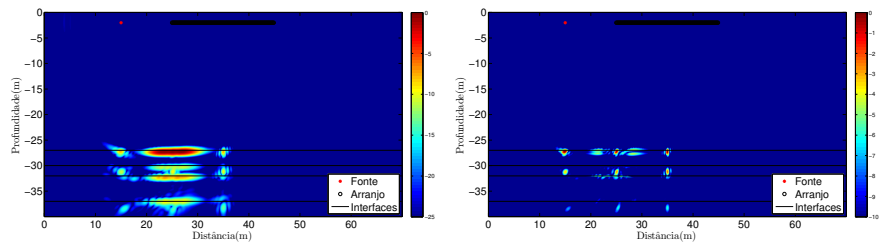


Figura A.65.: Configuração 69#.

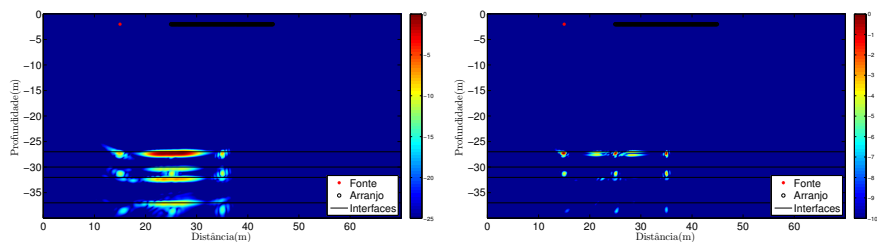


Figura A.66.: Configuração 70#.

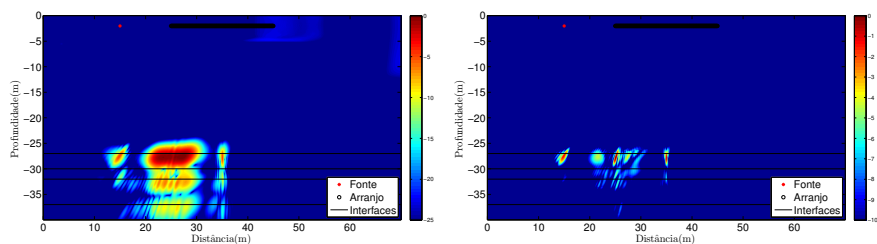


Figura A.67.: Configuração 71#.

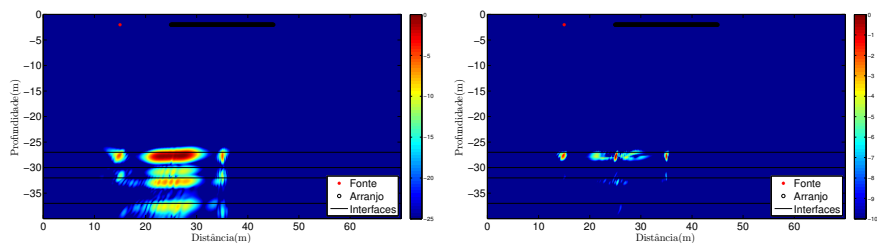


Figura A.68.: Configuração 72#.

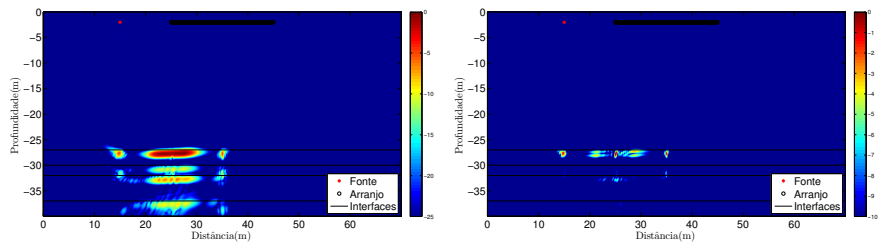


Figura A.69.: Configuração 73#.

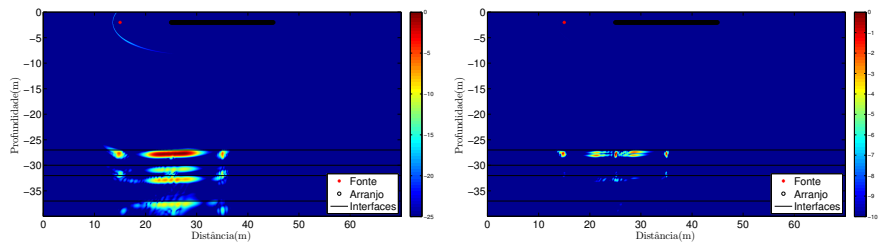


Figura A.70.: Configuração 74#.

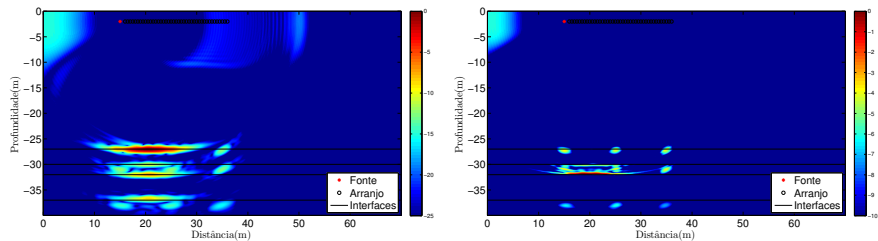


Figura A.71.: Configuração 75#.

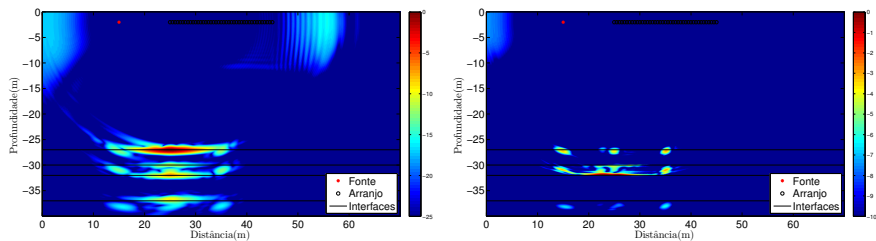


Figura A.72.: Configuração 76#.

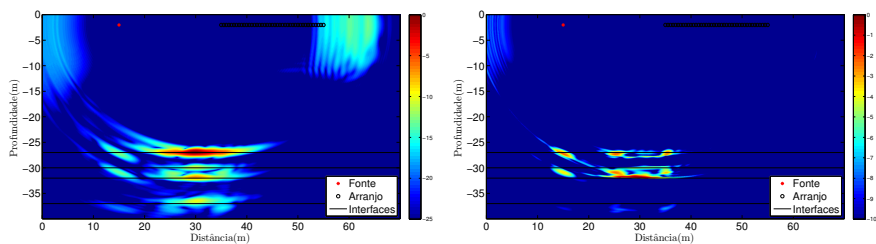


Figura A.73.: Configuração 77#.

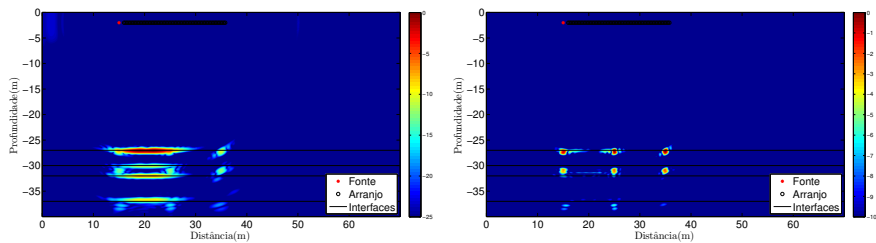


Figura A.74.: Configuração 78#.

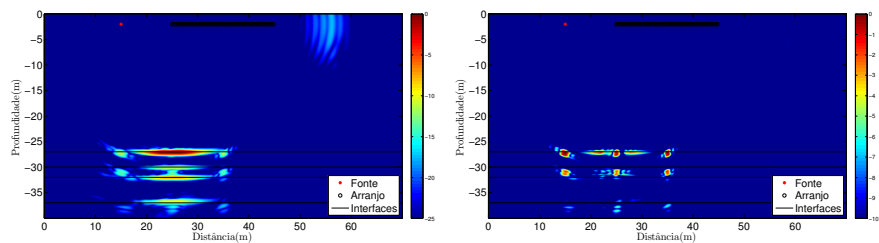


Figura A.75.: Configuração 79#.

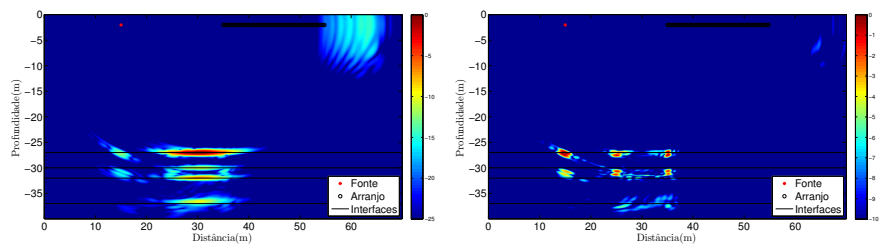


Figura A.76.: Configuração 80#.

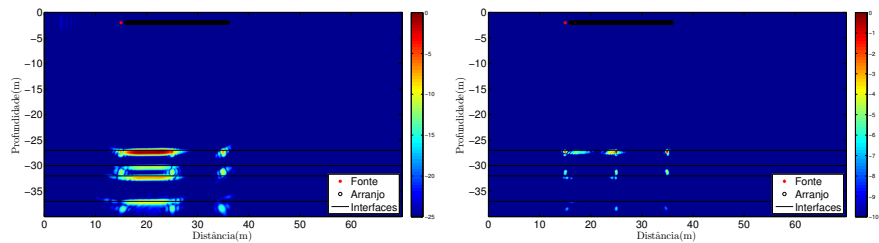


Figura A.77.: Configuração 81#.

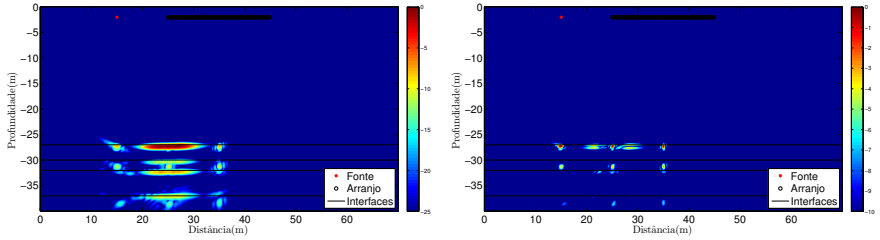


Figura A.78.: Configuração 82#.

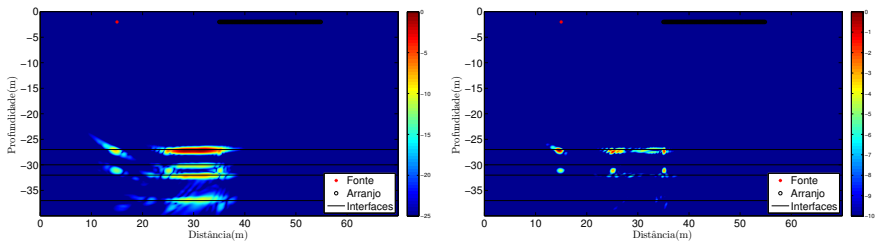


Figura A.79.: Configuração 83#.

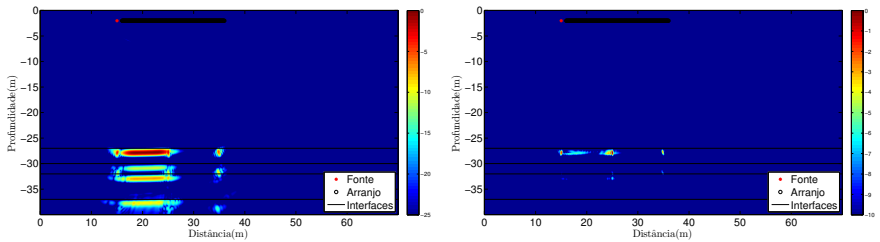


Figura A.80.: Configuração 84#.

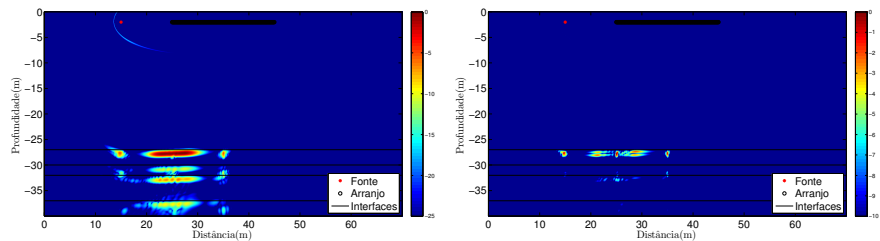


Figura A.81.: Configuração 85#.

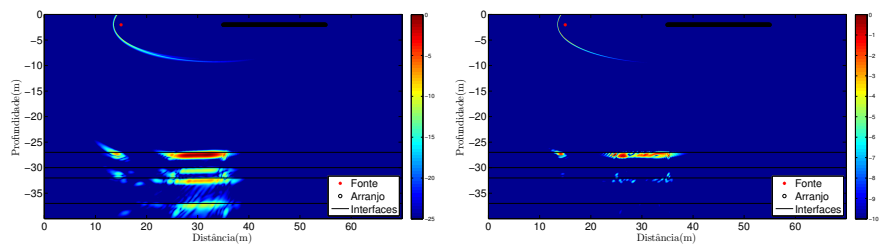


Figura A.82.: Configuração 86#.

