

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
UNICAMP

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE IMAGEM POR
QUADRADOS MÍNIMOS ESTABILIZADOS PARA
MIGRAÇÃO USANDO A EQUAÇÃO DA ONDA
ACÚSTICA

Autor: **Bruno Dias Amaro**

Orientador: **Prof. Dr. Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher**

Co-orientador: **Profa. Dra. Maria Amélia Novais Schleicher**

CAMPINAS
2011

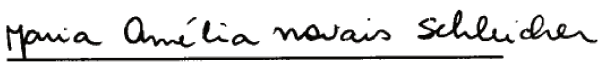
ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE IMAGEM POR QUADRADOS MÍNIMOS ESTABILIZADOS PARA MIGRAÇÃO USANDO A EQUAÇÃO DA ONDA ACÚSTICA

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação devidamente corrigida e defendida por **Bruno Dias Amaro** e aprovada pela comissão julgadora.

Campinas, 10 de Novembro de 2011.



Prof. Dr. Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher
Orientador



Profa. Dra. Maria Amélia Novais Schleicher
Co-Orientador

Banca Examinadora:

1. Prof. Dr. Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher.
2. Prof. Dr. Lúcio Tunes dos Santos.
3. Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa.

Dissertação apresentada ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, UNICAMP, como requisito para obtenção parcial do Título de MESTRE em **Matemática Aplicada**.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR ANA REGINA MACHADO – CRB8/5467
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E
COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA – UNICAMP

Am13a	Amaro, Bruno Dias, 1984- Análise de condições de imagem por quadrados mínimos estabilizados para migração usando a equação da onda acústica / Bruno Dias Amaro. – Campinas, SP : [s.n.], 2011. Orientador: Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher. Coorientador: Maria Amélia Novais Schleicher. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. 1. Equação de onda. 2. Método sísmico de reflexão. 3. Geofísica. 4. Análise de imagem. I. Schleicher, Joerg Dietrich Wilhelm, 1964-. II. Schleicher, Maria Amélia Novais, 1967-. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. IV. Título.
-------	---

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: A comparison of stabilized least-squares imaging conditions for acoustic wave-equation migration

Palavras-chave em inglês:

Wave equation

Seismic reflection method

Geophysics

Image analysis

Área de concentração: Matemática Aplicada

Titulação: Mestre em Matemática Aplicada

Banca examinadora:

Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher [Orientador]

Lúcio Tunes dos Santos

Jessé Carvalho Costa

Data da defesa: 13-09-2011

Programa de Pós-Graduação: Matemática Aplicada

Dissertação de Mestrado defendida em 13 de setembro de 2011 e aprovada

Pela Banca Examinadora composta pelos Profs. Drs.



Prof.(a). Dr(a). JOERG DIETRICH WILHELM SCHLEICHER



Prof.(a). Dr(a). LÚCIO TUNES DOS SANTOS



Prof.(a). Dr(a). JESSE CARVALHO COSTA

Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus, por ter me capacitado a vencer mais esse desafio, por ter suprido cada uma das minhas necessidades e ter me auxiliado e ser sempre o meu refúgio em momentos de angústia. Sem Ele tudo o que foi feito ainda estaria por fazer.

Aos meus pais pela formação moral que me proporcionaram, por terem abdicado na maioria das vezes de seus sonhos em favor dos meus, por todo amor e toda dedicação que sempre puseram e confiaram a mim, por todas orações, noites em claro e principalmente por terem me incentivado na busca de meus sonhos, por mais distantes que eles parecem estar. Se hoje sou o que sou e conquistei tudo o que tenho é porque eles sempre me instruíram de forma precisa e correta.

A minha querida e amada Juliéte, dona do olhar mais puro e de um sorriso impar que sempre me apoiou em todos os momentos, principalmente nos de fraqueza, me dando ânimo e força em tudo. Saiba que o seu amor e principalmente sua paciência é parte fundamental disso tudo.

Aos meus professores do IMECC, em especial aos meus orientadores Prof. Dr. Joerg Schleicher e Profa. Dra. Maria Amélia Novais Schleicher que depositaram sua confiança em mim, fazendo com que esse trabalho se tornasse uma realidade em minha vida. Com certeza os nossos encontros e discussões sobre o trabalho fizeram com que eu aprendesse muito e, além de se mostrarem grandes mestres, terem se tornado grandes amigos.

Ao Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa, que foi uma pessoa fundamental para a realização deste trabalho e que me acolheu, juntamente com as secretárias de Pós-graduação Benildes e Bela, de uma forma toda especial na cidade de Bélem do Pará. Aos amigos que fiz por lá: Raiza, Adriano e, de uma forma toda especial, aos grandes amigos Raquel, Alexandre e Francisco Oliveira, que me acolheram de uma forma toda especial os 2 meses

que permaneci por lá. Saibam que vocês também fazem parte desta conquista.

Aos meus professores da UNESP por terem me proporcionado uma formação básica sólida, tornando possível essa empreitada, em especial ao Prof. Dr. Luis Antônio e a Profa. Roseli Arbach, meus orientadores e grandes amigos durante os 4 anos de minha graduação e os inesquecíveis Prof. Dr. Jaime Rodrigues e Prof. Dr. Edson Donizete. Agradeço por terem me incentivado e colocado em mim a vontade de prosseguir.

Aos grandes e inesquecíveis amigos que conheci durante a graduação em Ilha Solteira que, mesmo longe, estiveram sempre tão perto: Felipe Fidalgo, Carlos, Thiago, Everton, Luiz Ferreira, Maria Flávia, Amanda, Solange, Vanessa, dentre outros e em especial as minhas "irmãs" Adriana, Thalita, Vânia, Dani, Andréia, Elen, Fernanda, Aldine e aos meus "irmãos" Felipe Pimenta, Renato, Rafael Heleno, Rafael Rossato e Fernando, que sempre estiveram próximos a mim. Aos amigos de Andradina, Fabricio e Jhonatas Vinicius por termos conseguido manter nossa amizade ao longo de tantos anos, obrigado por tudo. A todos os amigos que fiz em Campinas, seja dentro ou fora da Universidade, meu muito obrigado. Aos amigos e companheiros de pesquisa do Laboratório de Geofísica Computacional, em especial ao Jadsom, Thiago e Daniel que foram peças fundamentais em diversos momentos desse trabalho. Saibam que vocês também fizeram toda a diferença para o término deste trabalho.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-graduação: Tânia, Edinaldo e Livia que sempre se mostraram tão solícitos e prestativos em todas as vezes que precisei, e que não foram poucas.

Por fim, mas de forma alguma menos importante, agradeço a CAPES pelo apoio financeiro.

"Todo conhecimento inicia-se na imaginação, no sonho; só depois desce à realidade material e terrena por meio da lógica"

Albert Einstein

Resumo

Em uma migração sísmica, após o processo de propagação da onda, um importante passo para se obter uma imagem migrada é a aplicação de uma condição de imagem, que distingue entre pontos refletores e não refletores. A condição de imagem teórica desenvolvida por Claerbout usa uma deconvolução entre os campos de ondas descendente e ascendente (ou uma divisão no domínio da frequência). Uma vez que não conhecemos a posição real do refletor, esta divisão precisa ser executada em todos os pontos da imagem, causando uma certa instabilidade no processo, já que o campo de onda descendente é igual a zero em determinados pontos do meio. Pensando em tentar solucionar esse problema, diferentes técnicas de estabilização foram propostas, sendo a primeira uma correlação ao invés da deconvolução teoricamente exigida. Entretanto este processo destrói as informações de amplitude contidas nos dados. Como fica cada vez mais importante fornecer compensação de iluminação e preservação de amplitudes, particularmente, se o objetivo é recuperar com sucesso uma refletividade do meio, uma condição de imagem que destrói amplitudes é inaceitável. Por esta razão, várias formas alternativas de condições de imagem têm surgido nos últimos anos, que são avaliadas pela qualidade das amplitudes e artefatos produzidos. Neste trabalho estudamos uma série de condições de imagem com compensação de iluminação. Apresentamos também novas condições de imagem por quadrados mínimos estabilizados e as comparamos com as condições de imagem anteriormente propostas. Nossos experimentos numéricos em um simples modelo horizontal que utiliza um modelo de velocidade vertical não homogêneo e no dado Marmousi mostram que tais condições produzem resultados satisfatórios. Uma observação geral sobre todas as comparações feitas é que a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados que zera os pontos da imagem onde o denominador é de baixo valor produziu a melhor imagem com o mínimo de artefatos de migração e o mínimo de amplitudes de migração afetados. A qualidade desta imagem chega muito próximo da simples condição de imagem por correlação.

Abstract

In a seismic migration, after the wave propagation process, an important step to obtain a migrated image is the application of an image condition, that distinguishes between reflector and non reflector points. The theoretical imaging condition addressed by Claerbout uses a deconvolution between downgoing and upcoming wavefields (or a division in the frequency domain). Since we do not know the actual position of the reflector, this division must be performed at all points of the image, causing instability in the process, since the downgoing wavefield is zero at certain points. Trying to remedy this problem, different stabilization techniques have been proposed, being the first a crosscorrelation rather than the theoretically required deconvolution. However, this process destroys the information contained in the data amplitudes. As it becomes increasingly important to provide compensation for illumination and amplitude recovery, particularly, if the goal is to successfully recover a reflectivity of the medium, a condition that destroys the image amplitude is unacceptable. For this reason, several alternative forms of imaging conditions have emerged in the recent past that are evaluated by the quality of the output amplitudes and artifacts produced. In this work we study a set of imaging conditions with illumination compensation. We also present new stabilized least-squares image conditions and compare them to previously proposed forms. Our numerical experiments on a simple horizontal interface model using a vertically inhomogeneous velocity model and on the Marmousi data set show that they produce satisfactory results. The general observation from the overall comparison is that the stabilized total least-squares imaging condition produced the best image with the least migration artifacts and the least affected migration amplitudes. Its image quality comes very close to the one of the simple crosscorrelation imaging condition, however with correctly preserved amplitudes.

Lista de Figuras

1.1	Processo de reflexão e transmissão do campo de onda (YILMAZ, 2008). . .	2
1.2	Princípio da formação do traço sísmico (YILMAZ, 2008).	3
2.1	Fluxograma para o método de migração <i>Phase-Shift</i> (YILMAZ, 2008). . .	9
2.2	Fluxograma para o método de migração <i>PSPI</i> (BAGAINI et al., 1995). .	12
3.1	Modelo da formação do traço sísmico pela convolução da <i>wavelet</i> com a função refletividade (KEAREY et al., 2002).	14
3.2	Ondas descendentes e ascendentes observadas com receptores enterrados. O receptor G_3 registra ambas as ondas ascendente e descendente em tempo coincidente e os demais receptores em tempo distinto. (adaptado de CLAERBOUT, 1985).	16
3.3	Geometria de reflexão em uma subsuperfície horizontal plana (adapato de CLAERBOUT, 1971).	17
4.1	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)).	30
4.2	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_c . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	30
4.3	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável amortecida R_d (equação (3.16)).	31

4.4	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_d . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	31
4.5	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável zerada R_z (equação (3.18)).	32
4.6	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_z . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	32
4.7	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por suavização R_s (equação (3.20)).	33
4.8	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_s . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	33
4.9	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_d . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta). A escolha do parâmetro λ (equação (3.17)) influencia diretamente sobre as amplitudes ao longo dos refletores.	34
4.10	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_s . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta). A escolha do tamanho da janela n_x influencia diretamente sobre as amplitudes ao longo dos refletores.	34
4.11	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação R_{da} (equação (3.22)).	36
4.12	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{da} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	36
4.13	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação amortecida R_{dad} (equação (3.25)).	37

4.14	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{dad} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	37
4.15	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação zerada R_{daz} (equação (3.26)).	38
4.16	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{daz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	38
4.17	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação suavizada R_{das} (equação (3.29)).	39
4.18	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{das} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	39
4.19	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais R_{tls} (equação (3.30)).	41
4.20	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	41
4.21	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais amortecida R_{tlsa} (equação (3.33)).	42
4.22	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlsa} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	42
4.23	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais zerada R_{tlsz} (equação (3.34)).	43
4.24	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	43

4.25	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais suavizada R_{tlss} (equação (3.36)).	44
4.26	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlss} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	44
4.27	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos R_{ls} (equação (3.40)).	46
4.28	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{ls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	46
4.29	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados R_{sls} (equação (3.40)) com $N_x = 275$ e $\beta = 1$	47
4.30	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 175$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	47
4.31	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 225$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	48
4.32	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 275$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	48
4.33	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 325$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	49
4.34	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados zerada R_{lsz} (equação (3.41)).	52

4.35	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{lsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	52
4.36	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados suavizado R_{lss} (equação (3.42)) para $n_x = 100$. . .	53
4.37	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{lss} com $n_x = 100$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	53
4.38	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{lss} com $n_x = 300$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	54
4.39	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados R_{stls} (equação (3.43)).	55
4.40	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	55
4.41	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados amortecida R_{stlsa} (equação (3.44)).	56
4.42	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlsa} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	56
4.43	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados zerada R_{stlsz} (equação (3.45)).	57
4.44	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	57
4.45	Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados suavizada R_{stlss} (equação (3.46)).	58

4.46	Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlss} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).	58
4.47	Modelo de velocidade do modelo Marmousi	60
4.48	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)).	60
4.49	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável R_d (equação (3.16)) com $\varepsilon = 10^{-4}$	62
4.50	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por suavização R_s (equação (3.20)) com janela de tamanho $n_x = 75$	63
4.51	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação R_{daz} (equação (3.26)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$	64
4.52	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por autocorrelação R_{das} (equação (3.29)) com janela de tamanho $n_x = 100$	64
4.53	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por quadrados mínimos totais zerada R_{tlasz} (equação (3.34)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$	66
4.54	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais suavizada R_{tlss} (equação (3.36)) com janela de tamanho $n_x = 100$	66
4.55	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos R_{ls} (equação (3.37)).	67
4.56	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados R_{sls} (equação (3.40)) com $N_x = 275$ e $\beta = 1$	68
4.57	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados zerada R_{lsz} (equação (3.41)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$	70
4.58	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados suavizada R_{lss} (equação (3.42)) com $n_x = 100$	70
4.59	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados R_{stls} (equação (3.43)).	71

4.60	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados zerada R_{stlsz} (equação (3.45)) $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$.	71
4.61	Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados suavizada R_{stlss} (equação (3.46)) com $n_x = 25$.	72

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
1 Introdução	1
2 Métodos de Migração com a Equação da Onda	5
2.1 Equação da onda unidirecional	5
2.2 Migração <i>Phase-Shift</i>	7
2.3 Migração <i>PSPI</i>	9
3 Condições de Imagem	13
3.1 O modelo convolucional	13
3.2 Tipos de condição de imagem	18
3.2.1 Condição de imagem por correlação	19
3.2.2 Condição de imagem por divisão estável	19
3.2.3 Condição de imagem por suavização	20

3.2.4	Condição de imagem de divisão por autocorrelação	21
3.2.5	Condição de imagem por quadrados mínimos totais	23
3.2.6	Condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados	24
3.2.7	Novas condições de quadrados mínimos estabilizados	25
4	Testes Numéricos	27
4.1	Modelo sem variação lateral	27
4.1.1	Correlação	28
4.1.2	Divisão Estável	28
4.1.3	Suavização	29
4.1.4	Divisão por autocorrelação	35
4.1.5	Quadrados mínimos totais	40
4.1.6	Quadrados mínimos estabilizados	45
4.1.7	Novas condições de quadrados mínimos estabilizados	49
4.2	Modelo Marmousi	59
4.2.1	Correlação	59
4.2.2	Divisão estável	61
4.2.3	Suavização	61
4.2.4	Divisão por Autocorrelação	62
4.2.5	Quadrados Mínimos Totais	65
4.2.6	Quadrados mínimos estabilizados	67
4.2.7	Novas condições de quadrados mínimos estabilizados	68
	Conclusões	73
	Referências Bibliográficas	75

Capítulo 1

Introdução

A Geofísica é a ciência que se dedica à determinação do interior da Terra por meios físicos aplicados a sua superfície. Entre os vários métodos físicos empregados para este objetivo, a sismica tem um papel fundamental.

O método sísmico pode ser dividido basicamente em duas técnicas: a Sísmica de Reflexão e a Sísmica de Refração, sendo a primeira a mais largamente utilizada na indústria do Petróleo. Trata-se de um método geofísico de investigação da subsuperfície que se baseia na emissão e recepção de ondas a partir da geração de energia por uma fonte (explosiva e/ou vibratória), que pode estar na superfície ou enterrada a uma pequena profundidade. A excitação dessas fontes de energia geram ondas que se propagam no meio geológico e, após serem refratadas, difratadas e refletidas nas interfaces do meio retornam a superfície onde são captadas por receptores como os geofones, na aquisição terrestre, e os hidrofones na aquisição marítima. Parte da energia incidente é transmitida para camadas subjacentes onde novamente sofre reflexões, refrações e difrações ao atingir as interfaces do meio, como mostra a Figura 1.1.

Em um levantamento de sismica de reflexão são realizadas medidas da amplitude da vibração em pontos específicos do terreno através dos receptores por um período de tempo chamado tempo de registro. O tempo de registro corresponde ao tempo gasto pela onda no percurso desde sua saída da fonte até sofrer reflexão em uma determinada interface do meio e retornar novamente à superfície, onde é captada pelo receptor. Quando essas medidas de amplitude são representadas em um gráfico $2D$ do tempo de registro (tempo

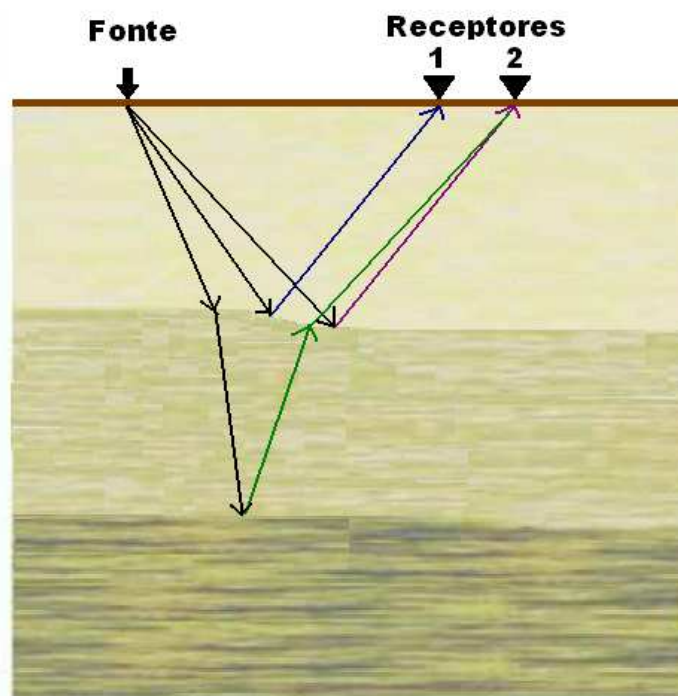


Figura 1.1. Processo de reflexão e transmissão do campo de onda (YILMAZ, 2008).

duplo de trânsito) pelas diversas posições dos receptores, compõe-se o que se chama de sismograma. Cada evento de ida e volta associada a um par fonte-receptor e representada no sismograma é denominada de traço sísmico (ou apenas traço). A Figura 1.2 mostra-nos um exemplo de traço sísmico.

A partir do sismograma encontrado, para se conseguir "observar" as feições geológicas em suas verdadeiras posições em subsuperfície, é necessário realizar um processo chamado de migração sísmica. Nesse processo, através de uma condição de imagem e da extrapolação em subsuperfície do campo de onda registrado pelos receptores, realiza-se o posicionamento dos refletores em suas verdadeiras posições.

A condição de imagem teórica elaborada por CLAERBOUT (1971) consiste em dividir o campo de onda ascendente pelo campo de onda descendente e somá-los sobre todas as frequências e fontes utilizadas. Uma vez que não conhecemos a posição real do refletor, esta divisão precisa ser executada em todos os pontos da imagem, causando uma certa instabilidade no processo, já que o campo de onda descendente é igual a zero em determinados pontos do meio.

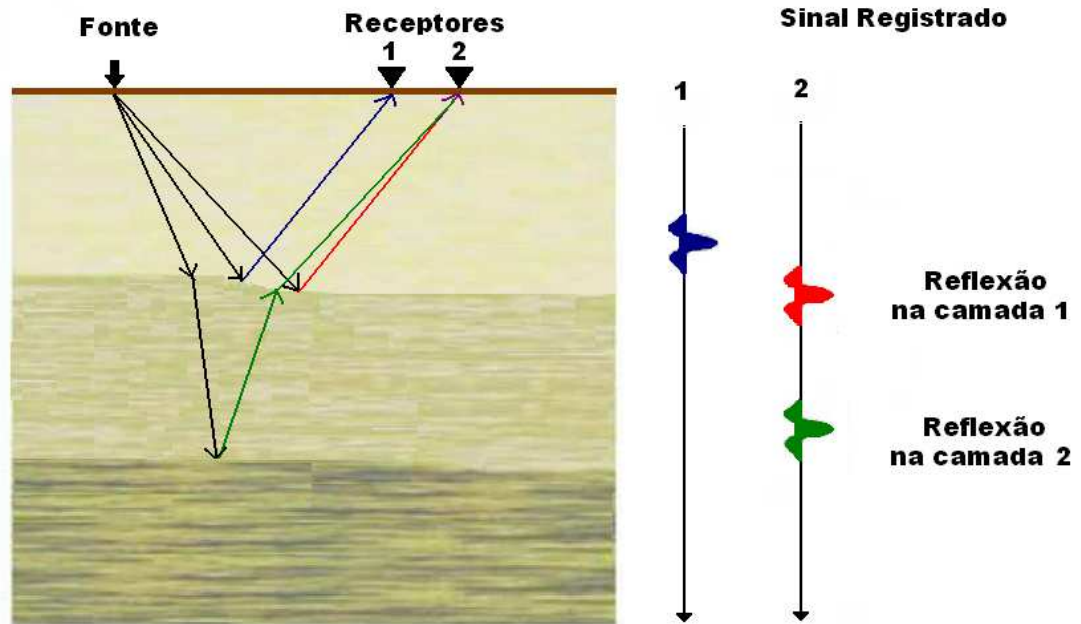


Figura 1.2. Princípio da formação do traço sísmico (YILMAZ, 2008).

Pensando em tentar solucionar esse problema, diferentes técnicas de estabilização foram propostas, sendo a primeira uma correlação ao invés da deconvolução teoricamente exigida (CLAERBOUT, 1971). Entretanto este processo destrói as informações de amplitude contidas nos dados. Tentativas mais recentes de aproximar a condição de imagem deconvolucional tenta evitar isto e recuperar o coeficiente de reflexão no ponto da imagem (VALENCIANO e BIONDI, 2003; GUITTON et al., 2007; SCHLEICHER et al., 2008; VIVAS et al., 2009).

O coeficiente de reflexão pode ser estimado através de um problema de quadrados mínimos (ARIENTI et al., 2002). Sua solução consiste em dividir a correlação dos campos de onda ascendentes e descendentes pela autocorrelação do campo de onda descendente. Para estabilizar esta solução, SCHLEICHER et al. (2008) propuseram três possíveis modificações: adicionar uma pequena constante à autocorrelação ao campo de onda descendente no denominador, usar a solução do problema de quadrados mínimos sempre que a energia do campo de onda descendente é inferior a esta pequena constante e suavizar o denominador antes da divisão, modificando a idéia original de GUITTON et al. (2007) de suavização do valor absoluto do campo de onda descendente deste denominador.

Partindo do mesmo princípio, VIVAS et al. (2009) propuseram uma condição de

Introdução

quadrados mínimos estabilizados que, diferente das demais condições supracitadas, usava como ponto de partida uma condição de imagem por quadrados mínimos que somava as fontes utilizadas no processo antes da divisão dos campos de ondas. Para estabilizar a divisão, VIVAS et al. (2009) substituíram o denominador em pontos de baixo valor por uma proporção de seu valor médio.

Neste trabalho combinamos as idéias da condição de quadrados mínimos com soma de fontes antes da divisão adotada por VIVAS et al. (2009) com as técnicas de estabilização de SCHLEICHER et al. (2008). Inicialmente é feita, no Capítulo 2, uma revisão sobre métodos de migração com a onda acústica e posteriormente, no Capítulo 3, abordamos diversos tipos de condições de imagem, enfoque principal deste trabalho. No Capítulo 4 apresentam-se os testes das novas condições de imagem por quadrados mínimos estabilizados em um modelo sintético com quatro refletores horizontais, que utiliza um modelo de velocidade vertical não homogêneo, bem como a análise da amplitude ao longo de cada refletor e no modelo Marmousi com algumas discussões, comparando estas com as demais imagens adotadas na literatura, seguido das devidas conclusões e referências bibliográficas.

Capítulo 2

Métodos de Migração com a Equação da Onda

Neste capítulo apresentamos o conceito de equação de onda unidirecional e uma revisão dos métodos de migração *Phase Shift* e *Phase Shift Plus Interpolation* utilizadas nesta dissertação.

2.1 Equação da onda unidirecional

A migração da equação da onda tenta desfazer os efeitos que a propagação de onda realizou nos dados $Q(x_r, y_r, \omega)$ registrados na superfície na posição do receptor $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, z = 0)$. Estes efeitos são, na maioria das vezes, descritos aproximadamente pela equação da onda acústica com uma fonte pontual e densidade constante que, em uma abordagem 3D é dada por

$$\frac{\partial^2 P(\mathbf{x}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(\mathbf{x}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P(\mathbf{x}, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2(\mathbf{x})} \frac{\partial^2 P(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) \delta(t), \quad (2.1)$$

onde $P(\mathbf{x}, t)$ é o campo de onda a ser propagado, $v(\mathbf{x})$ é a velocidade de propagação da onda, $\mathbf{x}_s$ denota a posição da fonte e $\mathbf{x} = (x, y, z)$ denota a posição espacial.

Representando o campo de onda no domínio da frequência angular ω , temos que a equação (2.1) é dada por

$$\frac{\omega^2}{v^2(\mathbf{x})}\widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$$

e, portanto, têm-se

$$\left(\frac{\omega^2}{v^2(\mathbf{x})} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \Delta \right) \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) = -\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s), \quad (2.2)$$

onde $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$. A solução desta equação em $\mathbf{x}_r$ deve ser igual ao dado registrado $Q(x_r, y_r; \omega)$, isto é, o campo $\widehat{p}(x_r, y_r, z = 0, \omega)$ deve satisfazer a condição de contorno

$$\widehat{p}(x_r, y_r, z = 0, \omega) = Q(x_r, y_r, \omega). \quad (2.3)$$

Migrar o dado registrado $Q(x_r, y_r, \omega)$ significa mapear a solução desta equação para a profundidade. Para isto, decompõe-se a equação (2.2) em duas equações de onda unidirecionais, que são obtidas da seguinte forma: dada a equação da onda acústica homogênea no domínio $\omega - \mathbf{x}$

$$\frac{\omega^2}{v^2(\mathbf{x})}\widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) = 0, \quad (2.4)$$

que pode ser escrita na forma

$$\frac{\partial^2 \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega)}{\partial z^2} - \frac{(i\omega)^2}{v^2(\mathbf{x})} \left(1 - \frac{v^2(\mathbf{x})}{(i\omega)^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right) \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) = 0. \quad (2.5)$$

Fatorando a equação (2.5) e negligenciando as derivadas da velocidade obtêm-se

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \frac{(i\omega)}{v(\mathbf{x})} \sqrt{1 - \frac{v^2(\mathbf{x})}{(i\omega)^2} \Delta} \right] \left[\frac{\partial}{\partial z} + \frac{(i\omega)}{v(\mathbf{x})} \sqrt{1 - \frac{v^2(\mathbf{x})}{(i\omega)^2} \Delta} \right] \widehat{p}(\mathbf{x}, \omega) = 0. \quad (2.6)$$

Da equação (2.6) pode-se representar as duas ondas unidirecionais

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - i \frac{\omega}{v(\mathbf{x})} \sqrt{1 + \frac{v^2(\mathbf{x})}{\omega^2} \Delta} \right) P_U(\mathbf{x}, \omega) = 0 \quad (2.7)$$

com condição inicial $P_U(x, y, z = 0, \omega) = Q(x, y, \omega)$ e

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + i \frac{\omega}{v(\mathbf{x})} \sqrt{1 + \frac{v^2(\mathbf{x})}{\omega^2} \Delta} \right) P_D(\mathbf{x}, \omega) = 0 \quad (2.8)$$

com condição inicial $P_D(x, y, z = 0, \omega) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$, onde P_D e P_U representam as ondas descendente e ascendente, respectivamente.

Usa-se estas equações unidirecionais para simular a propagação das ondas a partir das condições iniciais indicadas em $z = 0$ para dentro da subsuperfície, sendo que as ondas descendente na direção avançada em tempo a partir de $t = 0$ e as ondas ascendente na direção retrógrada em tempo a partir do tempo máximo de registro $t = T$.

Para meios sem variação lateral de velocidade, estes operadores podem ser representados exatamente no domínio de Fourier (GAZDAG, 1978). Para meios com variação lateral de velocidade estes operadores admitem certas aproximações (STOFFA et al., 1990 ; RISTOW e RÜHL, 1994), a qual descrevemos com mais detalhes nas seções a seguir.

2.2 Migração *Phase-Shift*

Se a velocidade variar apenas com a profundidade, isto é, $v(\mathbf{x}) = v(z)$, os operadores das equações (2.7) e (2.8) admitem solução exata (GAZDAG, 1978). Representando o campo de onda da forma

$$P(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_{\mathbb{R}^2} \int_{\mathbb{R}} \hat{p}(K_x, z, \omega) e^{i(\omega t - k_x x - k_y y)} d\omega dK_x \quad (2.9)$$

com $K_x = (k_x, k_y)$ as componentes da transformada de Fourier de $\mathbf{x} = (x, y)$, e substituindo esta equação na equação (2.4) obtêm-se

$$\frac{\partial^2 \widehat{p}(K_x, z, \omega)}{\partial z^2} - \left(k_x^2 + k_y^2 - \frac{\omega^2}{v^2(z)} \right) \widehat{p}(K_x, z, \omega) = 0, \quad (2.10)$$

que é a equação da onda acústica no domínio $\omega - K_x$.

Introduzindo a notação

$$k_z^2 = -k_x^2 - k_y^2 + \frac{\omega^2}{v^2(z)}, \quad (2.11)$$

substituindo (2.11) em (2.10), obtêm-se

$$\frac{\partial^2 \widehat{p}(K_x, z, \omega)}{\partial z^2} + k_z^2 \widehat{p}(K_x, z, \omega) = 0. \quad (2.12)$$

Essa equação diferencial homogênea possui uma solução geral analítica simples se k_z for uma constante. Para tal $v(z)$ também deverá ser constante, ou seja, a equação (2.12) admite solução exata para um domínio homogêneo.

Considerando, portanto, a velocidade constante em todo o domínio, esta equação é resolvida analiticamente e possui soluções do tipo

$$\widehat{p}(K_x, z, \omega) = e^{\pm i k_z z} \widehat{p}(K_x, z = 0, \omega), \quad (2.13)$$

onde a solução com $+i k_z z$ refere-se às ondas ascendentes e com $-i k_z z$ as ondas descendentes.

No caso da velocidade variar apenas com a profundidade deve-se, segundo o método *Phase-Shift*, realizar a extrapolação em profundidade recursivamente em intervalos Δz , supondo a velocidade constante em cada intervalo. Sendo assim, a equação (2.13) pode ser reescrita como

$$\widehat{p}(K_x, z + \Delta z, \omega) = e^{\pm i k_z \Delta z} \widehat{p}(K_x, z, \omega), \quad (2.14)$$

que é conhecido como operador *phase-shift*. Como na migração extrapola-se apenas o campo de onda descendente, somente o termo referente a ela será levado em conta.

Para se obter o dado migrado na profundidade $z + \Delta z$ deve-se retornar o dado ao domínio $\omega - \mathbf{x}$ e fazer uso de alguma condição de imagem, abordadas no Capítulo 3. Sendo assim retornando agora ao domínio $t - \mathbf{x}$ e usando a solução referente as ondas

descendentes na equação (2.14), obtêm-se a imagem final migrada. A Figura 2.1 mostra esquematicamente o processo da migração *Phase-Shift*.

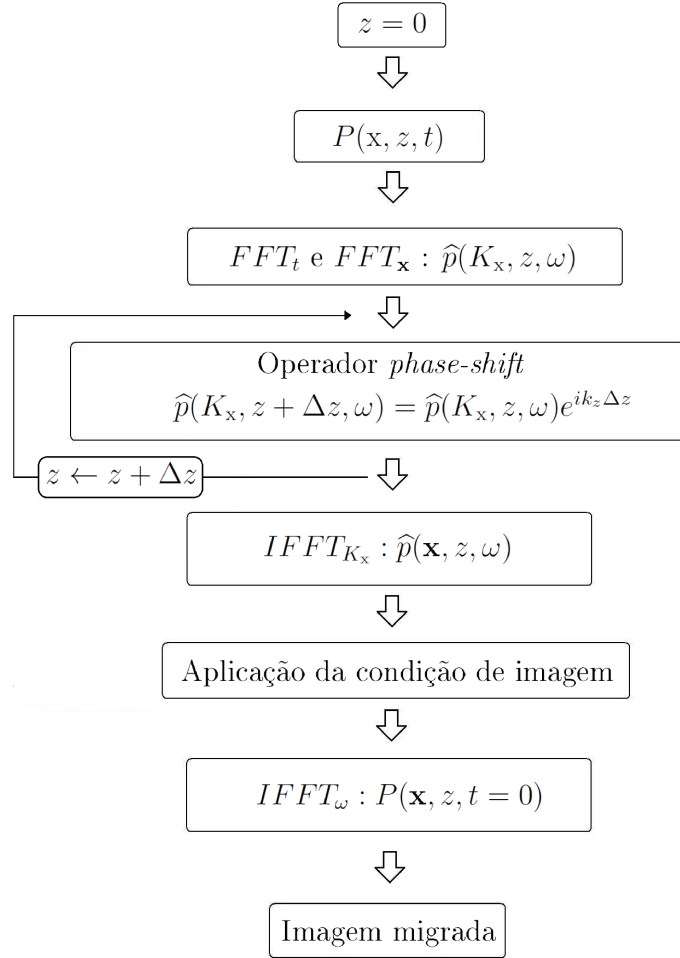


Figura 2.1. Fluxograma para o método de migração *Phase-Shift* (YILMAZ, 2008).

2.3 Migração PSPI

Quando o modelo de velocidades apresenta variação lateral ($v(x, z)$) o método *Phase-Shift* já não é mais recomendável, pois não aborda este tipo de complexidade. Com esse intuito, GAZDAG e SGUAZERO (1984) desenvolveram o método de migração *PSPI* - (*Phase Shift Plus Interpolation*).

O método trabalha alternadamente nos domínios $\mathbf{x} - t$ e $\omega - K_{\mathbf{x}}$ realizando a extra-polação em profundidade dos campos de ondas registrados pelos receptores com o auxílio do operador *Phase-Shift*, admitindo agora variações laterais de velocidade, realizando extrapolações baseadas nas chamadas velocidades de referência. No método, calcula-se em cada profundidade z vários campos de referência, baseados nessas velocidades que são escolhidas dentre as velocidades existentes naquela profundidade e fazendo no final a interpolação dos dados para gerar o campo de cada posição $\mathbf{x}$.

Temos, portanto, depois de realizado a transformada tripla de Fourier no campo $P(\mathbf{x}, t)$ não apenas um campo $P(K_{\mathbf{x}}, z, \omega)$ mas sim n campos $P_1(K_{\mathbf{x}}, z, \omega)$, $P_2(K_{\mathbf{x}}, z, \omega)$, ..., $P_n(K_{\mathbf{x}}, z, \omega)$ calculados a partir de n velocidades de referência que estão restritas a um domínio $[v_{min}, v_{max}]$. BAGAINI et al. (1995) propuseram um método para selecionar as velocidades de referência.

Esquemáticamente temos

$$P(\mathbf{x}, z = 0, t) \xrightarrow{FFT_t} P(\mathbf{x}, z = 0, \omega) \xrightarrow{FFT_x} P(K_{\mathbf{x}}, z = 0, \omega). \quad (2.15)$$

Extrapolam-se então, em profundidade, os campos para cada velocidade de referência dando origem aos campos de referência, isto é,

$$P(K_{\mathbf{x}}, z = 0, \omega) \xrightarrow{e^{ik_z \Delta z}} \left\{ \begin{array}{l} \xrightarrow{vel \ v_1} P_1(K_{\mathbf{x}}, z + \Delta z, \omega) \\ \xrightarrow{vel \ v_2} P_2(K_{\mathbf{x}}, z + \Delta z, \omega) \\ \xrightarrow{vel \ v_3} P_3(K_{\mathbf{x}}, z + \Delta z, \omega) \\ \vdots \\ \xrightarrow{vel \ v_n} P_n(K_{\mathbf{x}}, z + \Delta z, \omega). \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Em seguida cada um dos n campos acima passam por uma transformada de Fourier inversa em $\mathbf{x}$ e realiza-se a interpolação dos mesmos, resultando um novo campo interpolado

$P(x, z + \Delta z, \omega)$, para cada posição (x, z) :

$$\left. \begin{array}{c} P_1(K_x, z + \Delta z, \omega) \\ P_2(K_x, z + \Delta z, \omega) \\ P_3(K_x, z + \Delta z, \omega) \\ \vdots \\ P_n(K_x, z + \Delta z, \omega) \end{array} \right\} \xrightarrow{FFT_x^{-1}} \left. \begin{array}{c} P_1(x, z + \Delta z, \omega) \\ P_2(x, z + \Delta z, \omega) \\ P_3(x, z + \Delta z, \omega) \\ \vdots \\ P_n(x, z + \Delta z, \omega) \end{array} \right\} \xrightarrow{Interp} P(x, z + \Delta z, \omega). \quad (2.17)$$

Feita a interpolação, faz-se o uso de alguma condição de imagem, aplica-se no dado interpolado a transformada inversa de Fourier em ω e obtêm-se a imagem final migrada. A Figura 2.2 mostra esquematicamente o processo de migração *Phase Shift Plus Interpolation*.

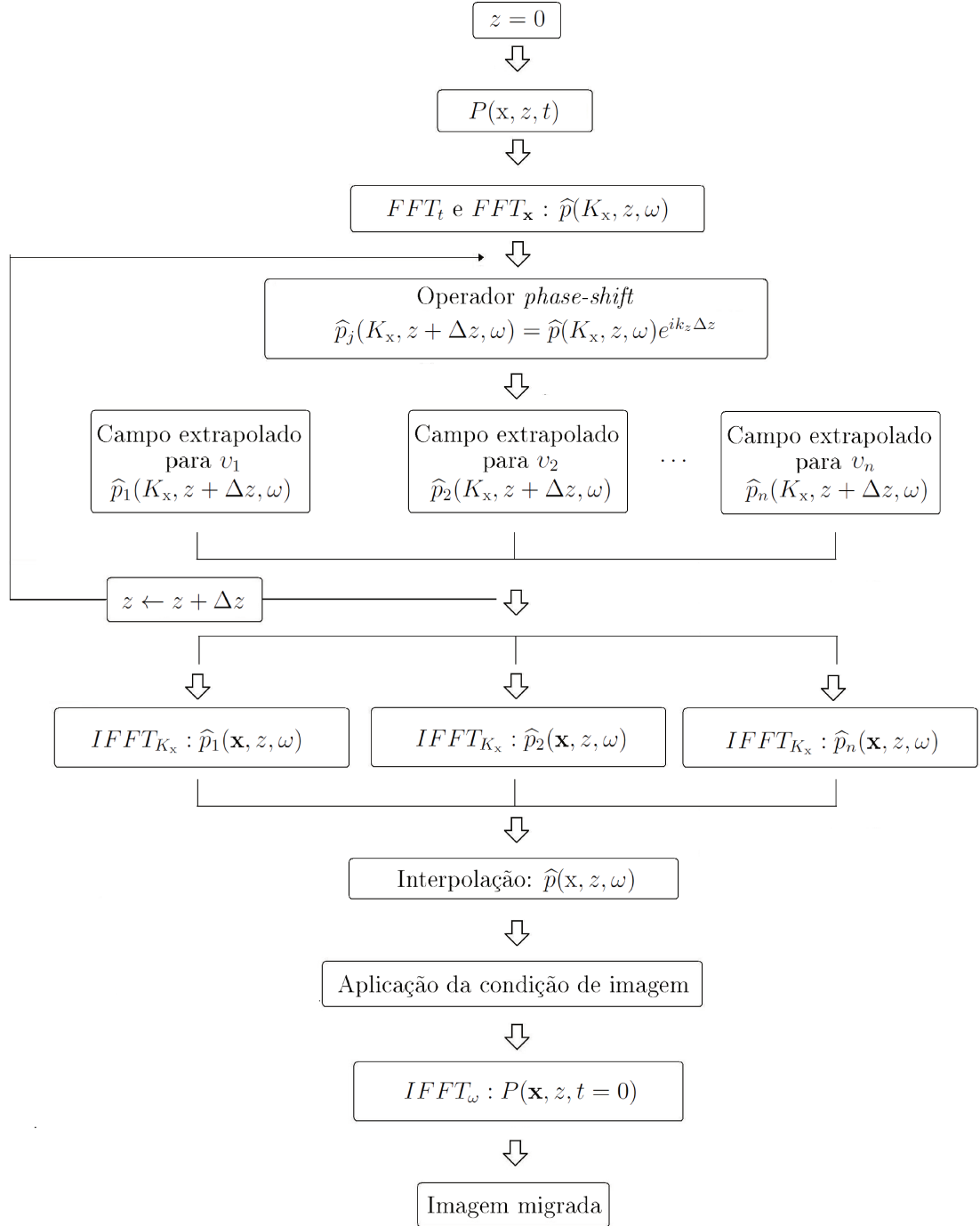


Figura 2.2. Fluxograma para o método de migração *PSPI* (BAGAINI et al., 1995).

Capítulo 3

Condições de Imagem

Após a etapa de propagação de ondas, abordada na Seção 2.1, é necessário a aplicação de uma condição de imagem para se obter a imagem final migrada. Neste capítulo abordamos diversos tipos de condições de imagem, bem como alguns pré-requisitos para a obtenção das mesmas.

3.1 O modelo convolucional

O traço sísmico registrado pode ser entendido como o resultado da interação entre o meio geológico e a *wavelet*, desde o instante em que ela é gerada pela excitação da fonte até o momento em que as reflexões são registradas nos receptores. Essa interação é descrita analiticamente através de um processo de convolução. Para ajudar a fixar esse conceito utilizamos um modelo geológico simplificado e consideramos que o raio sísmico incide verticalmente nas interfaces do meio.

Considere uma sucessão de camadas horizontais superpostas com suas respectivas impedâncias acústicas e seus correspondentes coeficientes de reflexão e transmissão, como na Figura 3.1.

Suponha que se queira registrar um traço sísmico em uma situação equivalente à do mesmo modelo, admitindo que a fonte de energia e o receptor são coincidentes (incidência vertical). De forma simplificada, os processos envolvidos na geração desse traço sísmico

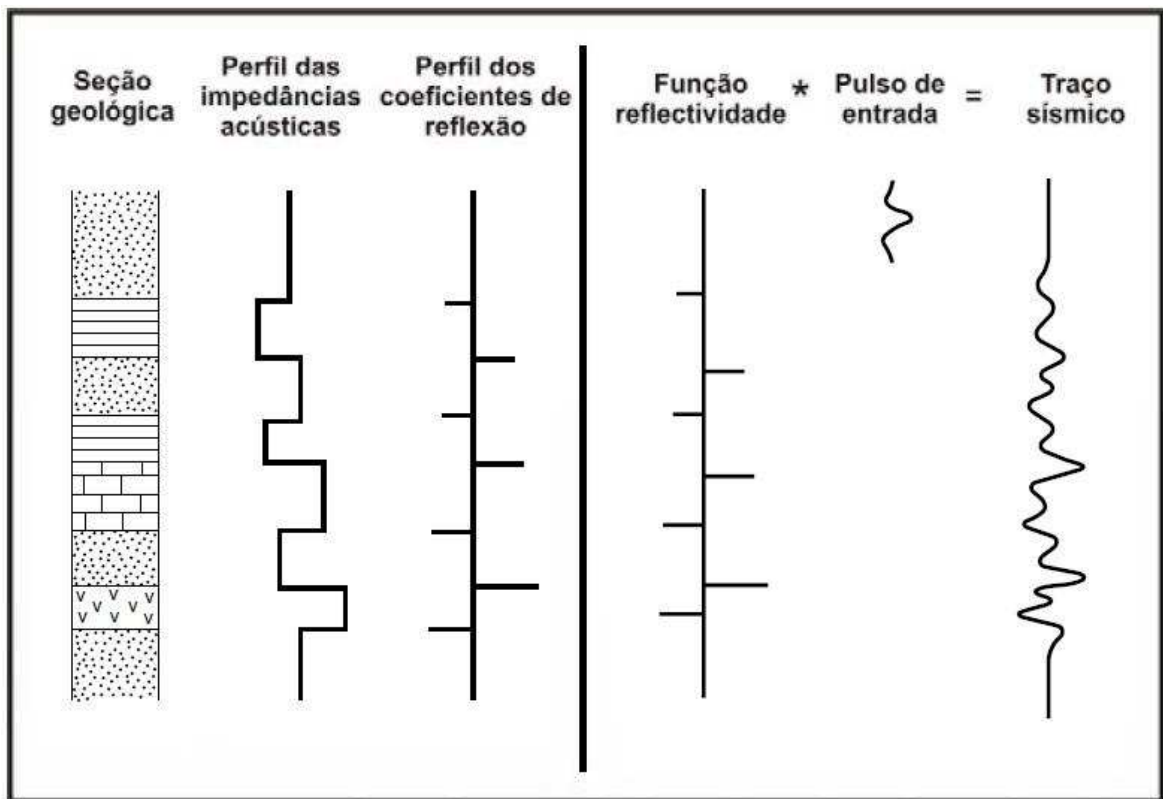


Figura 3.1. Modelo da formação do traço sísmico pela convolução da *wavelet* com a função refletividade (KEAREY et al., 2002).

podem ser descritos a partir da seguinte sequência de efeitos:

1. A fonte emite um pulso sísmico que propaga para baixo, penetrando no meio geológico;
2. Ao atingir a primeira interface, a amplitude de cada uma das amostras do pulso sísmico é multiplicada pelo coeficiente de reflexão e a forma de onda resultante retorna à superfície, onde é registrada;
3. Na mesma interface, parte da energia do pulso, representada pelo produto entre suas amplitudes e o coeficiente de transmissão, atravessa a interface e continua a descer;
4. A fração de energia transmitida atinge sucessivamente as interfaces subseqüentes, repetindo-se em cada uma delas o que ocorreu na primeira;

5. No trajeto ascendente, repetem-se, no sentido inverso, os fenômenos descritos nas etapas 2 e 3;
6. O sinal que viaja pra cima é registrado na superfície, com cada reflexão sendo definida em função do tempo decorrido a partir da emissão do pulso na fonte.

Sendo assim, tomando as equações (2.7) e (2.8), através da teoria da aproximação de raios definimos:

$$P_D(\mathbf{x}, t) = A_d(\mathbf{x})\delta(t - \tau_d(\mathbf{x})), \quad (3.1)$$

$$P_U(\mathbf{x}, t) = A_u(\mathbf{x})\delta(t - \tau_u(\mathbf{x})), \quad (3.2)$$

com $A_d(\mathbf{x})$ e $A_u(\mathbf{x})$ as amplitudes do pulso sísmico das ondas descendentes e ascendentes, respectivamente.

Em um ponto do refletor, $\mathbf{x}_r$, coeficiente de reflexão R é calculado através da razão da amplitude $A_u(\mathbf{x}_r)$ do raio refletido pela amplitude $A_d(\mathbf{x}_r)$ do raio incidente, isto é,

$$R(\mathbf{x}_r) = \frac{A_u(\mathbf{x}_r)}{A_d(\mathbf{x}_r)}. \quad (3.3)$$

Tomando agora as equações (3.1) e (3.2) no domínio da frequência

$$P_D(\mathbf{x}, \omega) = A_d(\mathbf{x})e^{-i\omega\tau_d(\mathbf{x})}, \quad (3.4)$$

$$P_U(\mathbf{x}, \omega) = A_u(\mathbf{x})e^{-i\omega\tau_u(\mathbf{x})}, \quad (3.5)$$

a partir destas e da equação (3.3) temos, em um ponto $\mathbf{x}_r$ do refletor

$$\frac{P_U(\mathbf{x}_r, \omega)}{P_D(\mathbf{x}_r, \omega)} = \frac{A_u(\mathbf{x}_r)e^{-i\omega\tau_u(\mathbf{x}_r)}}{A_d(\mathbf{x}_r)e^{-i\omega\tau_d(\mathbf{x}_r)}} = \frac{A_u(\mathbf{x}_r)}{A_d(\mathbf{x}_r)}e^{-i\omega(\tau_u(\mathbf{x}_r) - \tau_d(\mathbf{x}_r))} = R(\mathbf{x}_r)e^{-i\omega(\tau_u(\mathbf{x}_r) - \tau_d(\mathbf{x}_r))}. \quad (3.6)$$

Como em um ponto $\mathbf{x}_r$ no refletor, $\tau_u(\mathbf{x}_r) = \tau_d(\mathbf{x}_r)$, a equação (3.6) se torna

$$\frac{P_U(\mathbf{x}_r, \omega)}{P_D(\mathbf{x}_r, \omega)} = R(\mathbf{x}_r). \quad (3.7)$$

Definimos então, em um ponto $\mathbf{x}$ qualquer, a quantidade

$$R(\mathbf{x}, \omega) = \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega)}{P_D(\mathbf{x}, \omega)} = \frac{A_u(\mathbf{x})}{A_d(\mathbf{x})} e^{-i\omega(\tau_u(\mathbf{x}) - \tau_d(\mathbf{x}))} \quad (3.8)$$

e observamos que, no ponto $\mathbf{x}_r$ do refletor, $R(\mathbf{x}_r, \omega) = R(\mathbf{x}_r)$.

O conceito de imageamento nos diz que o refletor existe nos pontos da subsuperfície onde a primeira chegada da onda descendente coincide em tempo com a onda ascendente (CLAERBOUT, 1971). Entretanto, para localizá-lo, utilizamos as ondas descendentes na direção avançada em tempo a partir de $t = 0$ e as ondas ascendentes na direção retrógrada em tempo a partir do tempo de registro T . A Figura 3.2 ilustra esse conceito.

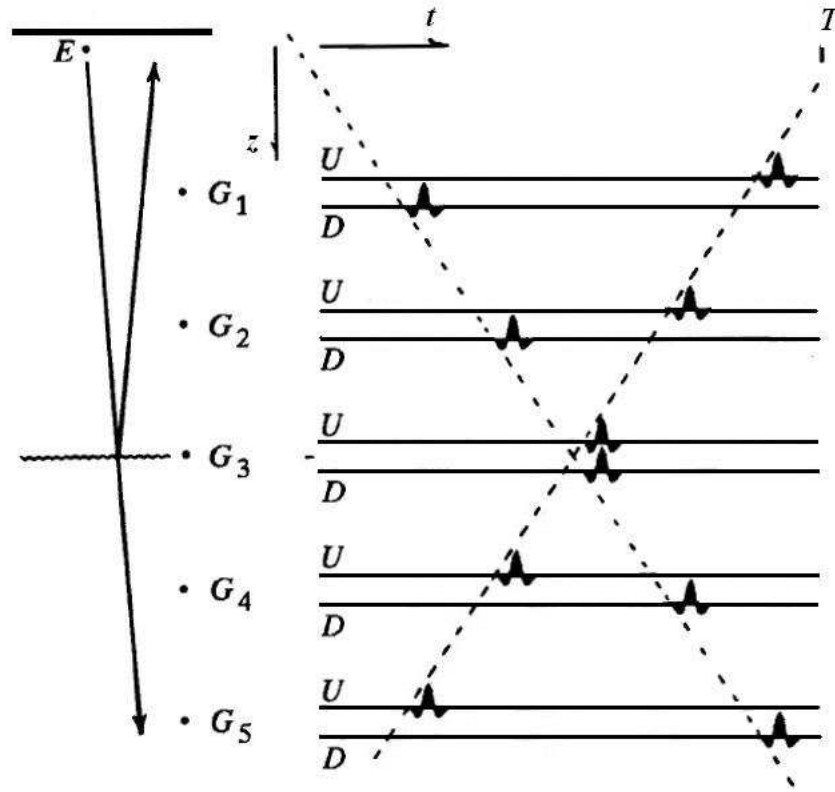


Figura 3.2. Ondas descendentes e ascendentes observadas com receptores enterrados. O receptor G_3 registra ambas as ondas ascendente e descendente em tempo coincidente e os demais receptores em tempo distinto. (adaptado de CLAERBOUT, 1985).

Assim, se t_1 for o tempo de propagação da onda partindo da fonte até a subsuperfície refletora e t_2 o tempo que parte da subsuperfície e retorna a superfície de origem, um

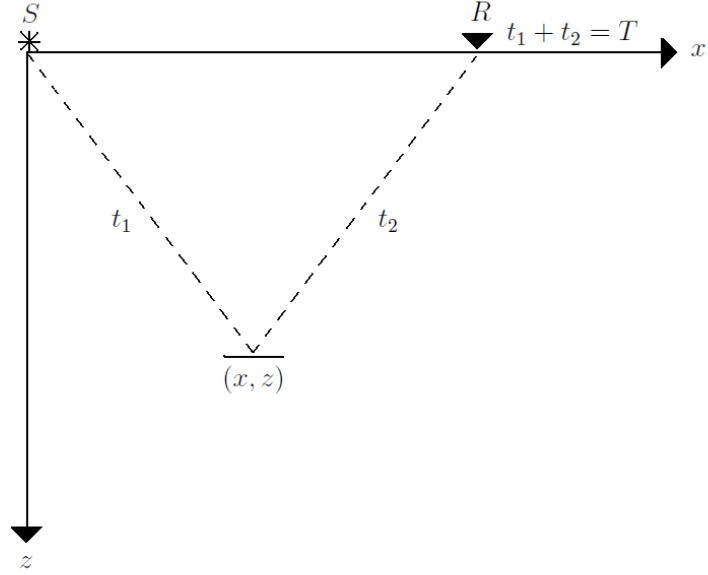


Figura 3.3. Geometria de reflexão em uma subsuperfície horizontal plana (adaptado de CLAERBOUT, 1971).

ponto do meio geológico é um ponto de reflexão quando

$$t_1 + t_2 = T. \quad (3.9)$$

Se a onda reflete em uma interface planar horizontal no ponto $\mathbf{x} = (x, y)$ do meio geológico (veja Figura 3.3), identificamos $\tau_d(\mathbf{x}) = t_1$ e $\tau_u(\mathbf{x}) = T - t_2$. Portanto, teremos na equação (3.8), $\tau_u = \tau_d$.

Então representando a equação (3.8) no domínio do tempo

$$R(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\mathbf{x}, \omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (3.10)$$

obtem-se, substituindo (3.10) em (3.8),

$$R(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega)}{P_D(\mathbf{x}, \omega)} e^{i\omega t} d\omega, \quad (3.11)$$

e, adotando $R(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x}, t = 0)$, temos que o coeficiente de reflexão pode ser calculado através da equação

$$R(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega)}{P_D(\mathbf{x}, \omega)} d\omega, \quad (3.12)$$

o que podemos concluir que, em dados discretizados,

$$R(\mathbf{x}) \approx \frac{1}{N_\omega \Delta t} \sum_{j=1}^{N_\omega} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega_j)}{P_D(\mathbf{x}, \omega_j)}. \quad (3.13)$$

onde N_ω é o número de frequências utilizada no processo.

Assim, a condição de imagem teoricamente correta é a deconvolução (divisão no domínio da frequência) dos dois campos de onda da profundidade do refletor para recuperar o coeficiente de reflexão como amplitude da imagem obtida.

Uma vez que a posição do refletor não é conhecida antes da migração, esta divisão precisa ser executada em todos os pontos da imagem. Isso implica uma certa instabilidade do processo, uma vez que o campo de onda descendente que aparece no denominador da equação (3.13) será zero em determinados pontos do meio. Por esta razão necessita-se de alguma forma de estabilização do processo de imageamento, a qual passaremos a descrever nas seções a seguir.

3.2 Tipos de condição de imagem

Nesta seção apresentamos os variados tipos de condições de imagem abordadas por CLAERBOUT (1971), VALENCIANO e BIONDI (2003) GUITTON et al. (2007), SCHLEICHER et al. (2008) e VIVAS et al. (2009) bem como as nossas novas condições de imagem propostas. Por simplicidade, omitiremos a constante que aparece na equação (3.13) no desenvolvimento das condições de imagem a seguir.

3.2.1 Condição de imagem por correlação

A condição de imagem mais simples e mais estável é aquela originalmente proposta por CLAERBOUT (1971). Ela usa uma simples correlação dos campos de onda ascendente e descendente, isto é,

$$R_c(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j), \quad (3.14)$$

onde o asterisco denota o complexo conjugado.

Esta condição de imagem é obtida como simplificação da expressão

$$R(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}, \quad (3.15)$$

que se obtém a partir da equação (3.13) por multiplicação do numerador e do denominador de $P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)$, operação esta que torna o denominador real.

A equação (3.15) não resolve o problema da divisão por zero. A vantagem desta forma é o fato de que o denominador agora somente é um fator de escala que não contém nenhuma informação sobre a fase, isto é, sobre a localização do refletor. Portanto, se o nosso interesse é localizar o refletor sem a preservação da amplitude, o denominador pode ser desprezado, obtendo, portanto, a condição de imagem (3.14).

Nota-se que a condição de imagem (3.14) não necessita de nenhuma divisão. Desta forma os problemas de instabilidade não ocorrem. Esta característica, junto com o fato de que não se tem dado muita importância à informação das amplitudes na aplicação da migração sísmica, fez com que esta condição de imagem tenha-se tornado a mais utilizada na prática.

3.2.2 Condição de imagem por divisão estável

Com o intuito de evitar o problema de zerar o denominador na equação (3.15), uma nova condição de imagem é dada somando um parâmetro ε ao denominador da mesma, isto é,

$$R_d(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) + \varepsilon}. \quad (3.16)$$

Entretanto a escolha de tal parâmetro influencia diretamente no resultado final da migração. SCHLEICHER et al. (2008) , por exemplo, utilizaram como parâmetro

$$\varepsilon = \varepsilon(\omega, z) = \lambda [\max_{x,y} (|P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2)], \quad 0 < \lambda < 1, \quad (3.17)$$

como também introduziram a condição de imagem

$$R_z(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} F(\mathbf{x}, \omega_j), \quad (3.18)$$

onde

$$F(\mathbf{x}, \omega) = \begin{cases} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega) P_D^*(\mathbf{x}, \omega)}{P_D(\mathbf{x}, \omega) P_D^*(\mathbf{x}, \omega)} & \text{se } |P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \varepsilon, \\ 0 & \text{se } |P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3.19)$$

de forma que ε é definido pela equação (3.17). Em outras palavras a equação (3.19) nos diz que a estabilidade é atingida zerando todos os valores de $F(\mathbf{x}, \omega)$ onde o denominador é menor que uma fração do valor máximo do campo de onda descendente no referido nível de profundidade.

3.2.3 Condição de imagem por suavização

Com o intuito de melhorar o problema encontrado na escolha do parâmetro ε da Seção 3.2.2, GUITTON et al. (2007) propuseram uma nova condição de imagem, denominada de condição de imagem por suavização, dada por

$$R_s(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\ll P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) \gg}, \quad (3.20)$$

onde o operador de suavização " $\ll \gg$ " é dado por

$$\ll Q(x_i, y_k, z, \omega) \gg = \frac{1}{(2n_x + 1)(2n_y + 1)} \sum_{l=i-n_x}^{i+n_x} \sum_{m=k-n_y}^{k+n_y} Q(x_l, y_m, z, \omega) \quad (3.21)$$

onde n_x e n_y representam o tamanho da janela de suavização nas direções x e y , respectivamente.

3.2.4 Condição de imagem de divisão por autocorrelação

SCHLEICHER et al. (2008) propuseram uma nova condição de imagem dada por

$$R_{da}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}. \quad (3.22)$$

Esta condição de imagem pode ser interpretada como o resultado de uma inversão de quadrados mínimos da equação $P_U(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x})P_D(\mathbf{x})$ (ARIENTI et al., 2002). Além disso, ela é aproximadamente equivalente a condição de imagem (3.15). O motivo é que da equação (3.4) têm-se

$$P_D(\mathbf{x}, \omega) P_D^*(\mathbf{x}, \omega) = A_d(\mathbf{x}) e^{-i\omega\tau_d(\mathbf{x})} A_d^*(\mathbf{x}) e^{i\omega\tau_d(\mathbf{x})} = |A_d(\mathbf{x})|^2 \quad (3.23)$$

donde a equação (3.15) pode ser interpretada como

$$R(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} \frac{P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)} \approx \frac{1}{|A_d|^2} \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j). \quad (3.24)$$

Com isso a condição de imagem (3.22) representa $|A_d|^2$ como sendo $\sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)$.

A partir da equação (3.22), outras formas alternativas testadas por SCHLEICHER et

al. (2008) foram

$$R_{dad}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) + \varepsilon}, \quad (3.25)$$

$$R_{daz}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)} & \text{se } |D(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \varepsilon, \\ 0 & \text{se } |D(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3.26)$$

onde

$$D(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{j=1}^{N_\omega} P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) \quad (3.27)$$

e

$$\varepsilon = \varepsilon(z) = \max\{\alpha, \lambda \max_{x,y}(|D(\mathbf{x}, \omega)|)\} \quad (3.28)$$

com α um parâmetro que mantém ε pequeno e

$$R_{das}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\ll \sum_{j=1}^{N_\omega} P_D(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) \gg}, \quad (3.29)$$

onde " $\ll \gg$ " está definido na equação (3.21).

3.2.5 Condição de imagem por quadrados mínimos totais

A partir da idéia proposta por ARIENTI et al. (2002), que obtém a condição de imagem R_{da} (equação (3.22)), propomos nesta dissertação uma nova condição de imagem denominada condição de imagem por quadrados mínimos totais dada pela expressão

$$R_{tls}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\langle P_U, P_D \rangle}{|\langle P_U, P_D \rangle|} \cdot \frac{\|P_U\|}{\|P_D\|}, \quad (3.30)$$

onde

$$\langle P_U, P_D \rangle = \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j) \quad (3.31)$$

e

$$\|P_L\| = (\langle P_L, P_L \rangle)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.32)$$

com $L = U, D$.

A partir da equação (3.30), criamos três formas alternativas de condição de imagem, utilizando as mesmas técnicas de estabilização testadas por SCHLEICHER et al. (2008):

$$R_{tlsa}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\langle P_U, P_D \rangle \|P_U\|}{|\langle P_U, P_D \rangle| \|P_D\| + \varepsilon}, \quad (3.33)$$

$$R_{tlsz}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\langle P_U, P_D \rangle \|P_U\|}{|\langle P_U, P_D \rangle| \|P_D\|} & \text{se } |\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \varepsilon, \\ 0 & \text{se } |\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3.34)$$

onde

$$\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega) = |\langle P_U, P_D \rangle| \|P_D\| \quad (3.35)$$

e

$$R_{tless}(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{x}_s} \frac{\langle P_U, P_D \rangle \|P_U\|}{\ll |\langle P_U, P_D \rangle| \|P_D\| \gg}, \quad (3.36)$$

onde a constante ε é dada pela equação (3.28) e " $\ll \gg$ " indica a suavização utilizada na equação (3.20).

3.2.6 Condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados

Diferente das condições de imagem propostas anteriormente, VIVAS et al. (2009) propuseram uma condição de imagem que para cada fonte, frequência e nível de profundidade, a média, sobre as coordenadas horizontais da energia do campo descendente, é computada. Sempre que a energia do campo descendente é inferior a um certo limite, dada por uma fração do valor médio, ela é substituída por esse valor limite. O valor estabilizado é obtido somando todas as frequências e fontes, para cada posição espacial. Matematicamente, na nossa formulação, partimos da seguinte condição de imagem

$$R_{ls}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} |P_D(\mathbf{x}, \omega_j)|^2}. \quad (3.37)$$

A média da energia do campo descendente é dada por

$$|P_D(\mathbf{x}, \omega)|_{av}^2 = \frac{1}{N_x} \frac{1}{N_y} \sum_x \sum_y |P_D(x, y, z, \omega)|^2, \quad (3.38)$$

onde N_x e N_y são os números de pontos da imagem nas direções x e y .

A partir da equação (3.38), calcula-se o valor estabilizado do fluxo de energia do campo

de onda descendente, dado pela expressão

$$|P_D(\mathbf{x}, \omega)|_{st}^2 = \begin{cases} |P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2, & \text{se } |P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \beta |P_D(\mathbf{x}, \omega)|_{av}^2, \\ \beta |P_D(\mathbf{x}, \omega)|_{av}^2, & \text{se } |P_D(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \beta |P_D(\mathbf{x}, \omega)|_{av}^2, \end{cases} \quad (3.39)$$

com β uma constante positiva arbitrária e obtém-se a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados dada por

$$R_{sls}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} |P_D(\mathbf{x}, \omega_j)|_{st}^2}. \quad (3.40)$$

A diferença principal desta última condição está no fato de que as posições das fontes são somadas antes da divisão dos campos de ondas. Nas condições de imagens propostas anteriormente, a soma sobre todas as fontes era realizada apenas no final do processo, isto é, após a divisão dos mesmos.

3.2.7 Novas condições de quadrados mínimos estabilizados

Combinando as idéias de estabilização abordadas na seções anterior com as condições de imagem dadas pelas equações (3.37) e (3.30), propomos algumas alternativas condições de imagem dadas por

$$R_{lsz}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j)}{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} |P_D(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j)|^2} & \text{se } |D(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \varepsilon, \\ 0 & \text{se } |D(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (3.41)$$

e

$$R_{lss}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} P_U(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j) P_D^*(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j)}{\ll \sum_{\mathbf{x}_s} \sum_{j=1}^{N_\omega} |P_D(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}, \omega_j)|^2 \gg}, \quad (3.42)$$

onde a constante aditiva ε , o campo de onda $D(\mathbf{x}, \omega)$ e o operador de suavização ” $\ll \gg$ ” são dados pelas equações (3.28), (3.27) e (3.21), respectivamente,

$$R_{stls}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \langle P_U, P_D \rangle ||P_U||}{\sum_{\mathbf{x}_s} |\langle P_U, P_D \rangle| ||P_D||}, \quad (3.43)$$

$$R_{stlsa}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \langle P_U, P_D \rangle ||P_U||}{\sum_{\mathbf{x}_s} |\langle P_U, P_D \rangle| ||P_D|| + \varepsilon}, \quad (3.44)$$

$$R_{stlsz}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \langle P_U, P_D \rangle ||P_U||}{\sum_{\mathbf{x}_s} |\langle P_U, P_D \rangle| ||P_D||} & \text{se } |\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega)|^2 > \varepsilon, \\ 0 & \text{se } |\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega)|^2 \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (3.45)$$

e

$$R_{tslss}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_s} \langle P_U, P_D \rangle ||P_U||}{\ll \sum_{\mathbf{x}_s} |\langle P_U, P_D \rangle| ||P_D|| \gg}, \quad (3.46)$$

onde a constante aditiva ε e o operador de suavização ” $\ll \gg$ ” são os mesmos utilizados acima, $\langle P_U, P_D \rangle$, $||P_U||$ e $||P_D||$ dados pelas equações (3.31) e (3.32) e o campo de onda $\tilde{D}(\mathbf{x}, \omega)$ dado pela equação (3.35).

Capítulo 4

Testes Numéricos

Neste capítulo testamos a qualidade das variadas condições de imagens propostas no capítulo anterior em um modelo sem variação lateral de velocidade com 4 refletores horizontais e no dado Marmousi (VERSTEEG, 1994). O método de migração utilizado, em ambos os casos, foi a migração *Phase Shift Plus Interpolation* - *PSPI* (abordada na Seção 2.3) com 10 referências de velocidade escolhidas de acordo com o critério máximo de entropia de BAGAINI et al. (1995). Por simplicidade, todos os testes numéricos foram realizados em duas dimensões. Em todos os casos utilizamos a mesma técnica de migração e a real distribuição de velocidade tanto para o modelo de camadas horizontais quanto o modelo Marmousi. Sendo assim, todas as diferenças entre as imagens exibidas em todo o capítulo dependem exclusivamente das condições de imagem utilizadas.

4.1 Modelo sem variação lateral

Para controlar a qualidade da amplitude nos experimentos numéricos, os primeiros testes foram efetuados utilizando dados modelados pela integral de Kirchhoff em um meio com um gradiente vertical constante de 0.3/s, com valor inicial na superfície de 2000 m/s. O modelo contém quatro refletores horizontais, modelados por contrastes de densidade, de modo a produzir um coeficiente de reflexão constante de 0.2. Devido a um problema de escala não resolvido, o processo gerou um fator de 20, que foi removido posteriormente das amplitudes migradas. As amplitudes ao longo dos primeiro, segundo, terceiro e quarto

refletores estão representadas pelas curvas sólida (azul), tracejada (verde), tracejada-pontilhada (vermelha) e pontilhada (preta), respectivamente.

4.1.1 Correlação

A Figura 4.1 mostra o resultado para a condição de imagem R_c (equação (3.14)). Imediatamente notamos na Figura 4.2 as diferentes amplitudes ao longo de diferentes refletores. Isto é uma consequência direta da omissão do denominador. Como veremos posteriormente, as outras condições de imagem testadas fornecem uma melhor calibração entre os refletores em diferentes níveis de profundidade. Uma vantagem desta simples condição de imagem é a supressão nos artefatos de migração. A imagem limpa e livre de artefatos da Figura 4.1 é a referência para qualquer condição de imagem que inclui compensação de iluminação.

4.1.2 Divisão Estável

Condições de imagem que apresentam divisão tendem a criar artefatos de migração. Isto torna-se imediatamente claro quando comparamos a Figura 4.1 com a Figura 4.3 que apresenta o resultado da migração correspondente a condição de imagem R_d (equação (3.16)). Na equação (3.17) escolhemos $\lambda = 10^{-3}$. Entretanto, essa escolha não foi uma escolha aleatória. Como mencionado na Seção 3.2.2, a escolha do parâmetro ε (que depende da escolha de um λ adequado) influencia diretamente no resultado final da migração. Assim, esse valor não pode ser muito pequeno, de modo que não estaríamos realizando nenhum tipo de estabilização, como também não pode ser muito grande, ao ponto de mudarmos a expressão matemática em si. Na equação (3.16), por exemplo, ao se atribuir $\lambda = 0.05$, as amplitudes sobre o primeiro e segundo refletores não foram preservadas, como mostra a Figura 4.9. Isto nos mostra que a escolha de tal parâmetro λ foi maior do que o adequado, deteriorando as amplitudes ao longo dos refletores.

Apesar das imagens dos refletores estarem melhor equalizadas, os artefatos de migração estão fortemente reforçados. Este é um problema geral sofrido por todas as condições de imagem que dependem de uma divisão, embora o grau de aprimoramento varie.

Na Figura 4.4, já percebemos a preservação das amplitudes ao longo dos refletores.

Note a diferente escala das amplitudes de migração se comparadas com a Figura 4.2. Esta escala é alcançada pela divisão do campo de onda descendente.

Resultados da condição de imagem R_z (equação (3.18)) está descrito na Figura 4.5. A presença de artefatos próximos à superfície é claramente vista, deterioramento a qualidade da imagem nesta região. Mais abaixo, o comportamento é praticamente idêntico a imagem da Figura 4.3, obtida através da condição de imagem R_d (equação (3.16)). A utilização desta condição de imagem nos mostra claramente a recuperação das amplitudes, que, em um certo afastamento, permanecem constantes ao longo dos quatro refletores, sendo o primeiro de menor intensidade nessa região em relação aos demais (Figura 4.6). Isto nos mostra que diferentes condições de imagem e suas regularizações podem ter diferentes efeitos sobre as amplitudes.

4.1.3 Suavização

A Figura 4.7 mostra o resultado para a condição de imagem R_s (equação (3.20)), que suaviza o denominador com uma janela de suavização de tamanho $n_x = 20$. Esta imagem se assemelha muito àquela apresentada na Figura 4.5. Analogamente vemos a semelhança das amplitudes ao longo dos quatro refletores (veja Figura 4.8), com uma pequena diferença apenas no primeiro se comparadas com as Figuras 4.4 e 4.6.

Aqui, assim como no caso da escolha do parâmetro λ da equação (3.17), a escolha de uma janela muito grande também altera as amplitudes ao longo dos refletores, como mostra a Figura 4.10, testada com uma janela de suavização de tamanho $n_x = 100$.

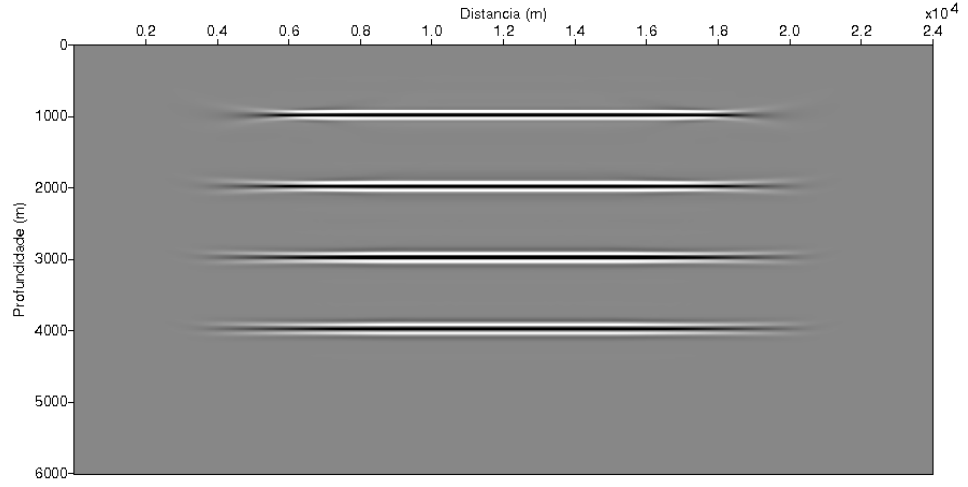


Figura 4.1. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)).

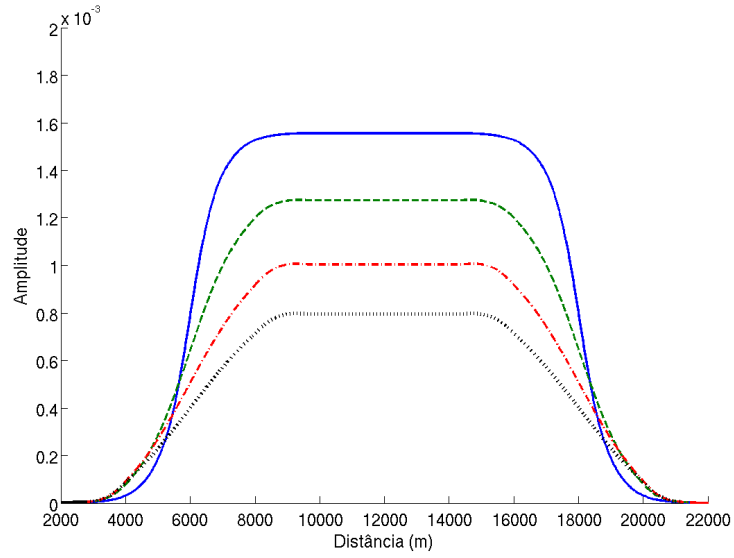


Figura 4.2. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_c . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

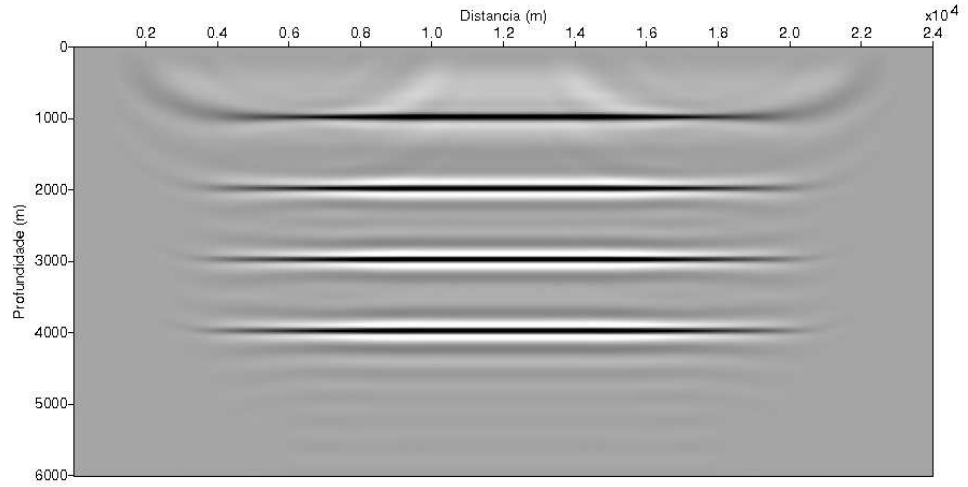


Figura 4.3. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável amortecida R_d (equação (3.16)).

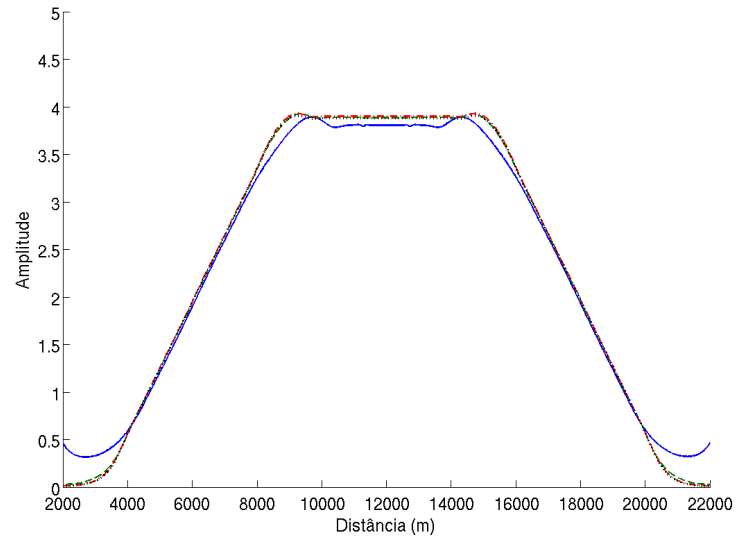


Figura 4.4. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_d . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

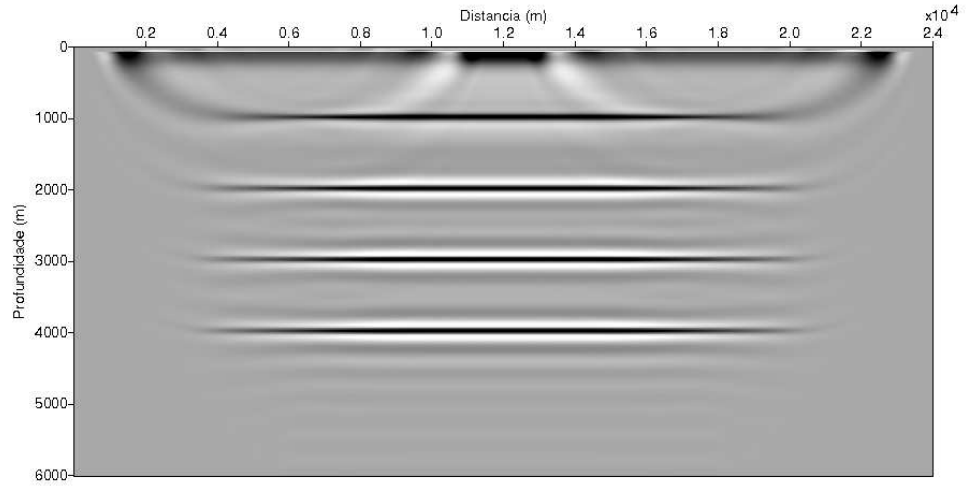


Figura 4.5. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável zerada R_z (equação (3.18)).

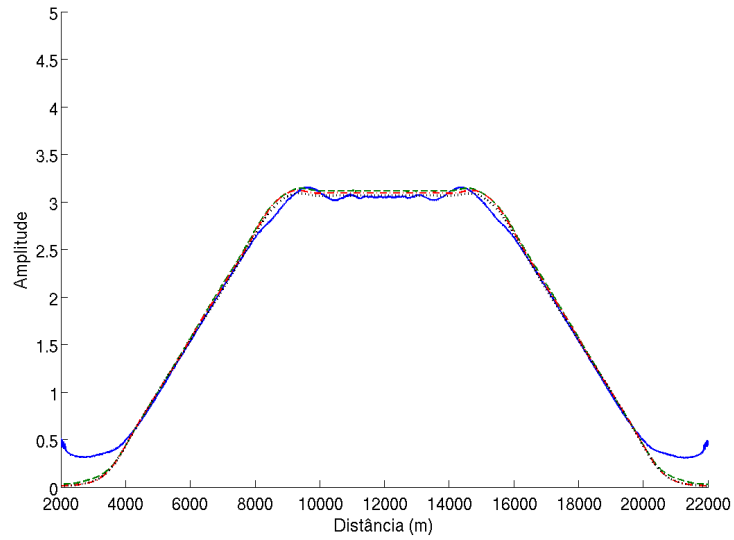


Figura 4.6. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_z . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

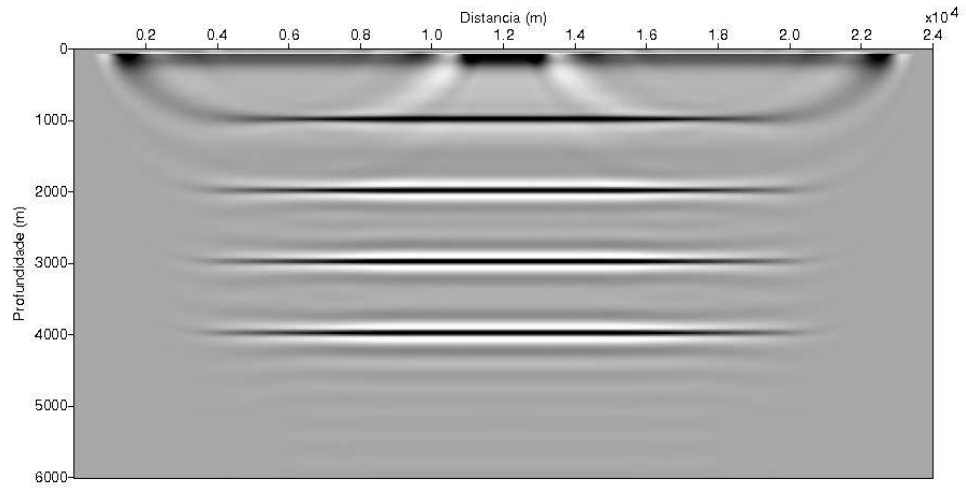


Figura 4.7. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por suavização R_s (equação (3.20)).

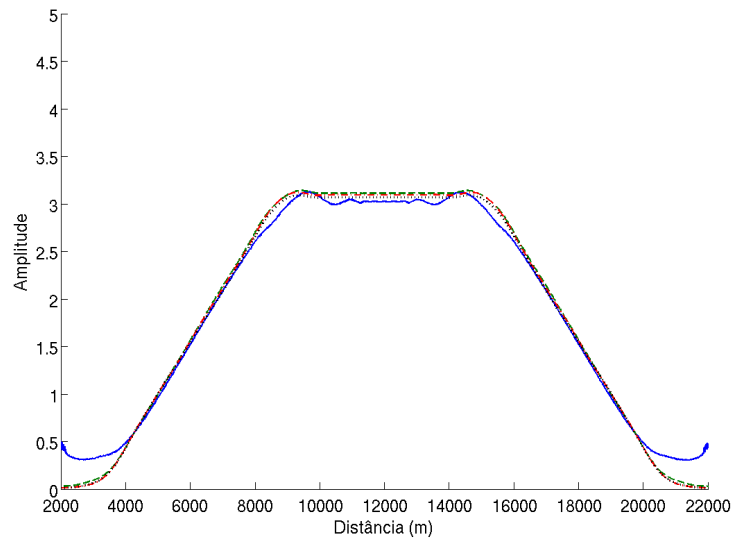


Figura 4.8. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_s . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

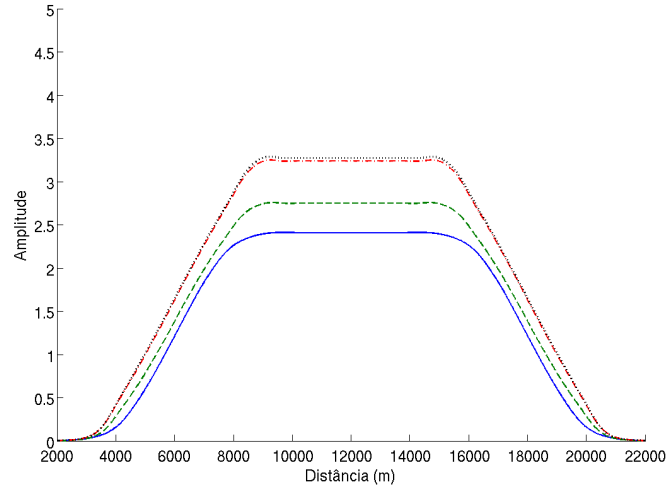


Figura 4.9. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_d . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta). A escolha do parâmetro λ (equação (3.17)) influencia diretamente sobre as amplitudes ao longo dos refletores.

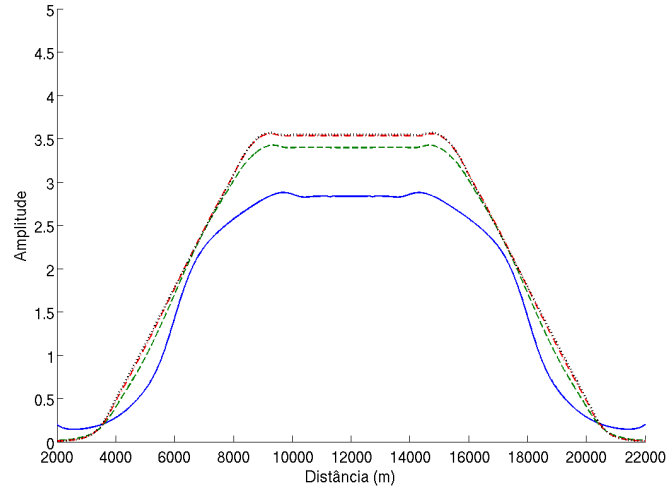


Figura 4.10. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_s . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta). A escolha do tamanho da janela n_x influencia diretamente sobre as amplitudes ao longo dos refletores.

4.1.4 Divisão por autocorrelação

As Figuras 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17 mostram o resultado das condições de imagem R_{da} , R_{dad} , R_{daz} e R_{das} (equações (3.22), (3.25), (3.26) e (3.29), respectivamente). Para as condições R_{dad} e R_{daz} escolhemos $\lambda = 10^{-3}$ e $\alpha = 10^{-6}$ na equação (3.28). A imagem na Figura 4.11 é muito mais clara que as anteriores, embora os artefatos perto da superfície persistam. Porém, eles aparecem apenas na região de fronteira da imagem onde os dados, de qualquer forma, são insuficientes. Alguns artefatos são visíveis acima da parte central do primeiro refletor. As amplitudes são claras, livres de ruídos e praticamente constantes.

Para tentar reduzir os artefatos próximo a superfície, nós testamos as condições de imagem R_{dad} , R_{daz} e R_{das} exibidas nas Figuras 4.13, 4.15 e 4.17. As imagens nas Figuras 4.13 e 4.15 são melhores e mais claras, com artefatos fora da região de iluminação removidos. Na região interna onde os dados realmente são avaliados, há uma considerável melhora nos artefatos de migração que aparecem acima do primeiro refletor. Para os demais as imagens são praticamente idênticas.

O gráfico das amplitudes 4.12 e 4.14 das Figuras 4.11 e 4.13 mostram que a adição do parâmetro ε reduz levemente as amplitudes, afetando levemente apenas o refletor superior. Por outro lado, a mesma comparação entre as Figuras 4.12 e 4.16 mostram que, neste caso, as amplitudes são idênticas dentro da imagem migrada (região central da imagem). Fixar o valor zero sempre que o campo de onda descendente é muito pequeno nos fornece um anulamento de efeitos indesejados fora da atual imagem.

Finalmente comparando as amplitudes das condições de imagem R_{da} e R_{das} (Figuras 4.12 e 4.18) vemos que a condição R_{das} diminuiu a qualidade das amplitudes do refletor superior. Note que apesar das condições de imagem R_{da} , R_{dad} , R_{daz} e R_{das} (equações (3.22), (3.25), (3.26) e (3.29), respectivamente) realizarem compensação de iluminação na divisão do campo de onda descendente, os artefatos de migração nas Figuras 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17 são muito similares àqueles da simples condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)) exibida na Figura 4.1. Na Figura 4.13, mesmo com os efeitos de borda das condições de imagem R_{da} , R_{dad} , R_{daz} e R_{das} as imagens em questão são praticamente a mesma.

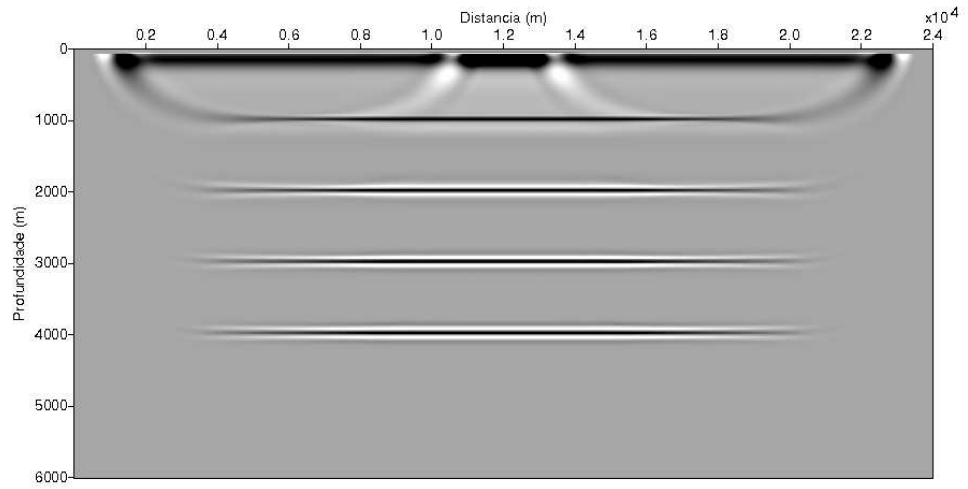


Figura 4.11. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação R_{da} (equação (3.22)).

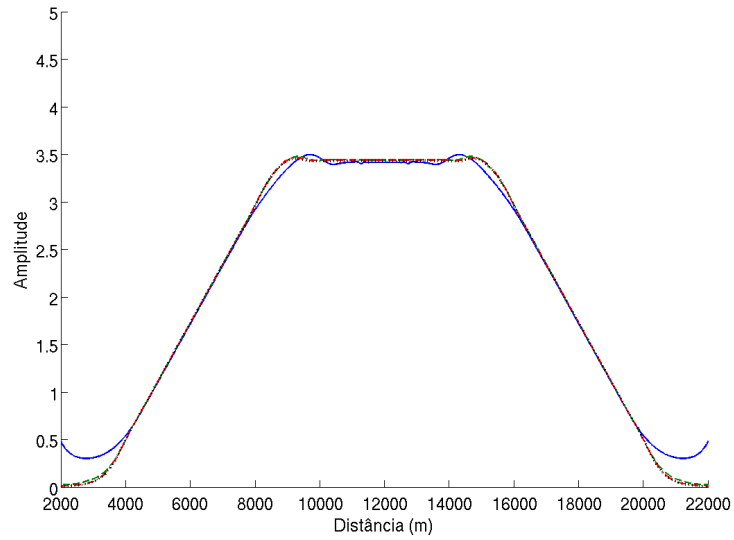


Figura 4.12. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{da} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

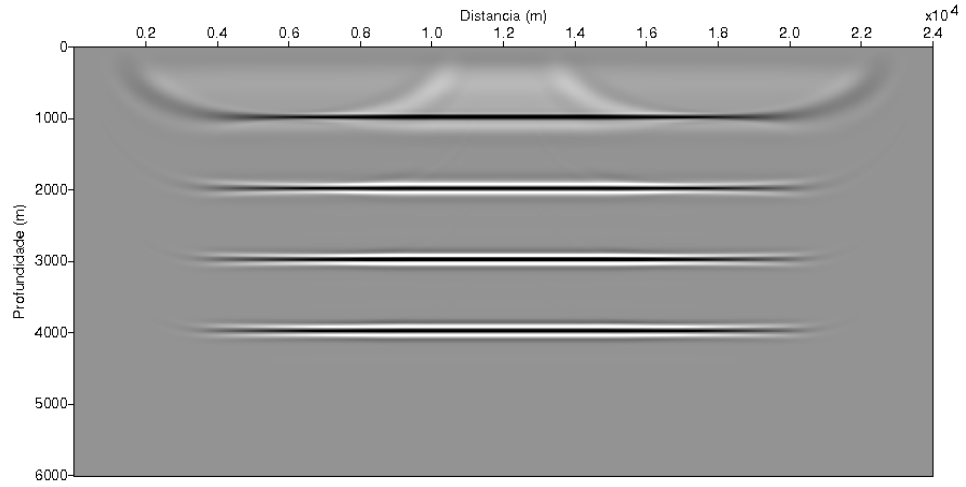


Figura 4.13. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação amortecida R_{dad} (equação (3.25)).

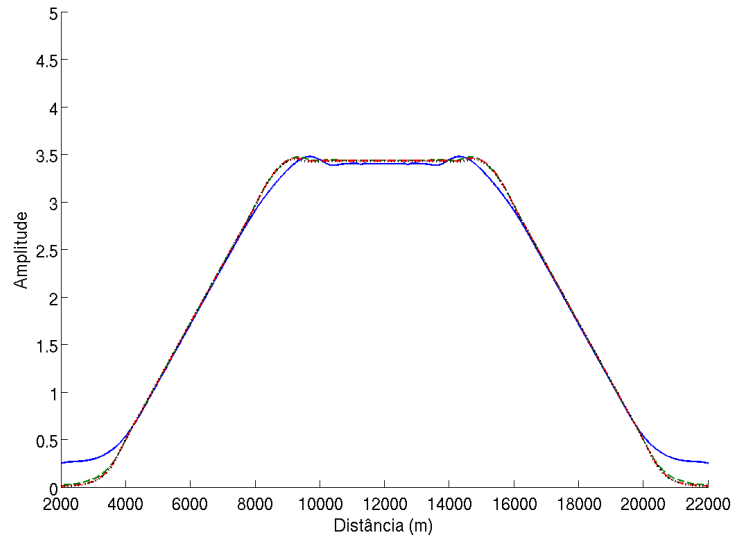


Figura 4.14. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{dad} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

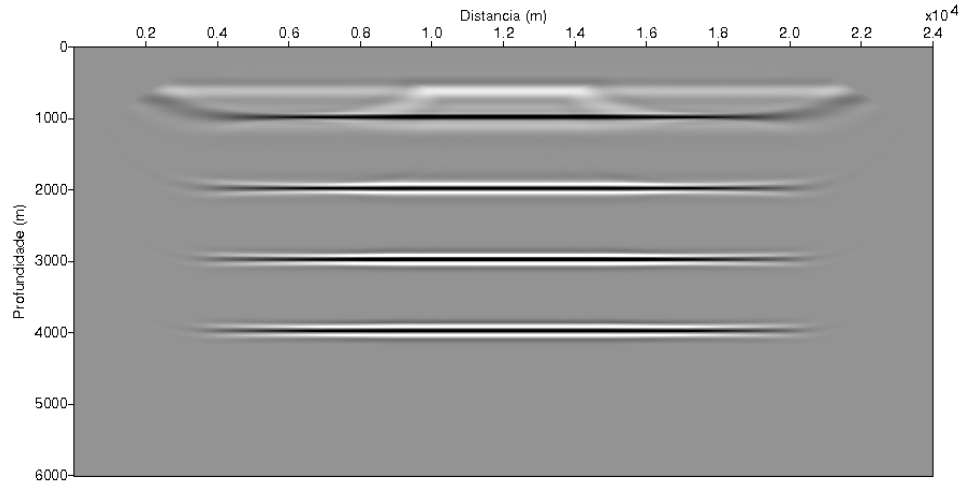


Figura 4.15. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação zerada R_{daz} (equação (3.26)).

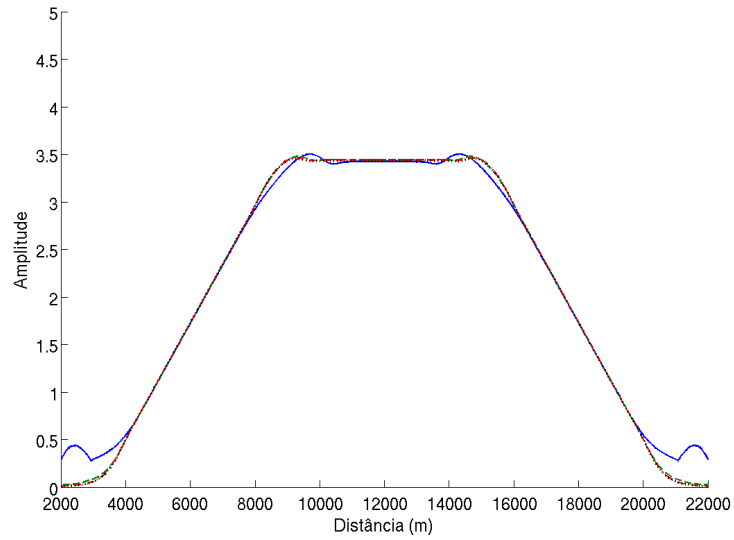


Figura 4.16. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{daz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

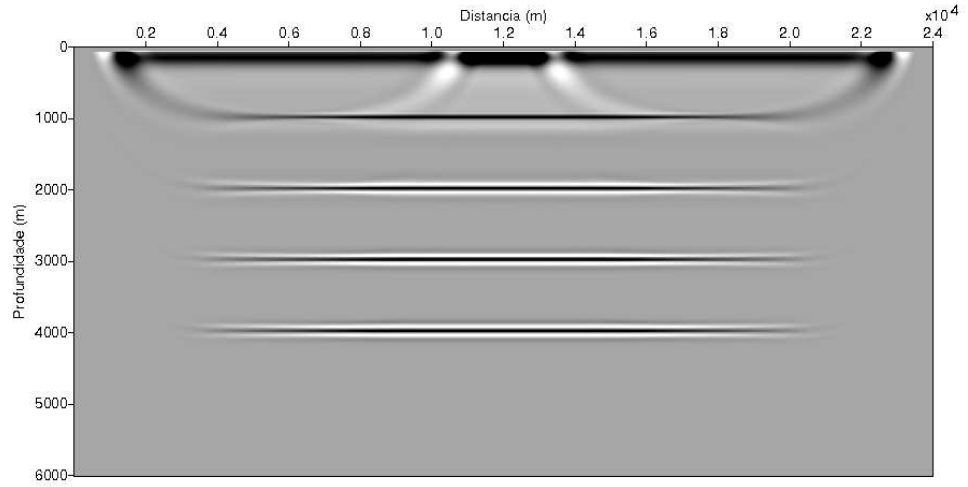


Figura 4.17. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação suavizada R_{das} (equação (3.29)).

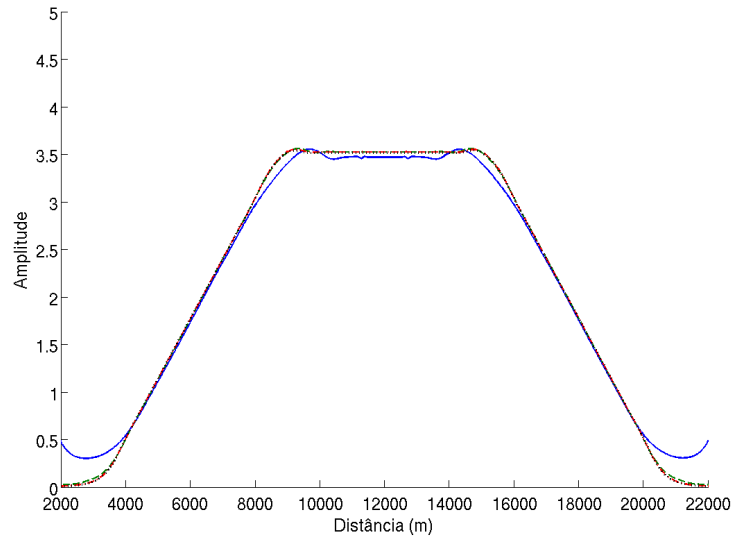


Figura 4.18. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{das} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

4.1.5 Quadrados mínimos totais

As Figuras 4.19, 4.21, 4.23 e 4.25 mostram o resultado das condições de imagem R_{tls} , R_{tlsa} , R_{tlss} e R_{tlss} (equações (3.30), (3.33), (3.34) e (3.36), respectivamente). Novamente, após uma série de testes numéricos, para as condições R_{tlsa} e R_{tlss} escolhemos $\lambda = 10^{-3}$ e $\alpha = 10^{-6}$ na equação (3.28). A imagem na Figura 4.19 é muito semelhante àquela apresentada pela condição de imagem R_{da} (equação (3.22)) e exibida na Figura 4.11. Da mesma forma, não há diferença significativa entre as amplitudes ao longo dos quatro refletores (Figuras 4.12 e 4.20).

Para as condições de imagem por quadrados mínimos totais R_{tlsa} , R_{tlss} e R_{tlss} , percebemos uma leve perda na preservação da amplitude ao longo do primeiro refletor (Figuras 4.22, 4.24 e 4.26) se comparadas as condições de imagem R_{dad} , R_{daz} e R_{das} (quadrados mínimos convencional), respectivamente, que utilizam a mesma técnica de estabilização (Figuras 4.14, 4.16 e 4.18). Para os demais refletores, em todos os casos, as amplitudes são totalmente preservadas, assemelhando-se àquelas exibidas na seção anterior.

De modo análogo, as imagens das Figuras 4.21, 4.23 e 4.25 não apresentam diferenças significativas quando comparadas as Figuras 4.13, 4.15 e 4.17. Apenas as condições R_{tlsa} e R_{tlss} (equações (3.33) e (3.34)) mostram uma pequena diferença quando comparadas com as condições R_{dad} e R_{daz} (equação (3.25) e (3.26)). Para a condição R_{tlsa} há uma leve melhora nos artefatos de migração próximos à superfície (Figura 4.21) enquanto que a condição R_{tlss} tais artefatos estão mais acentuados (Figura 4.23).

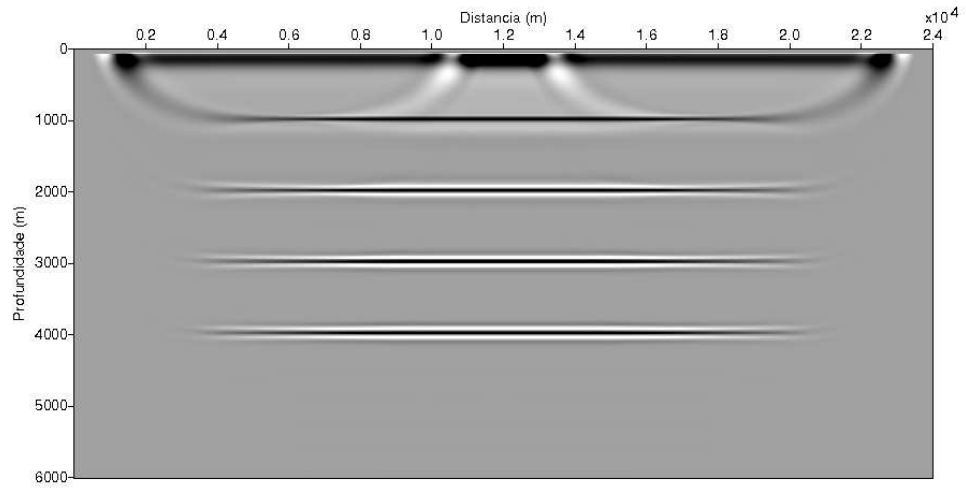


Figura 4.19. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais R_{tls} (equação (3.30)).

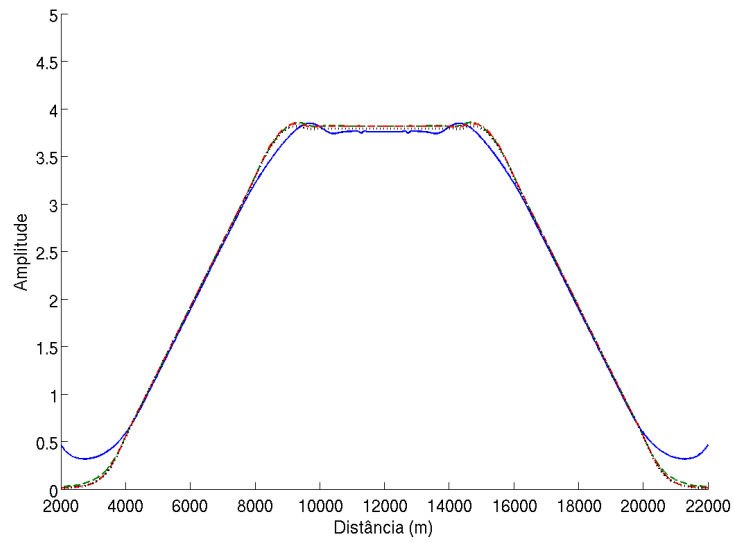


Figura 4.20. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

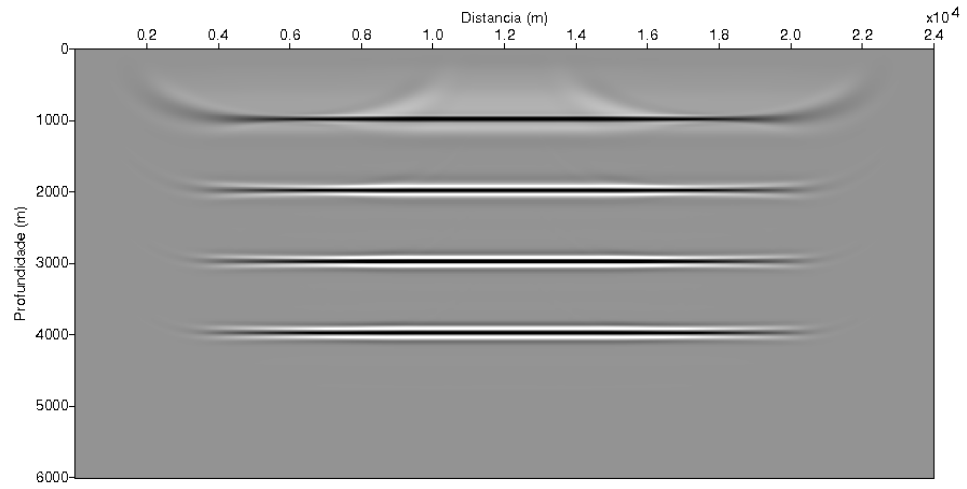


Figura 4.21. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais amortecida R_{tlsa} (equação (3.33)).

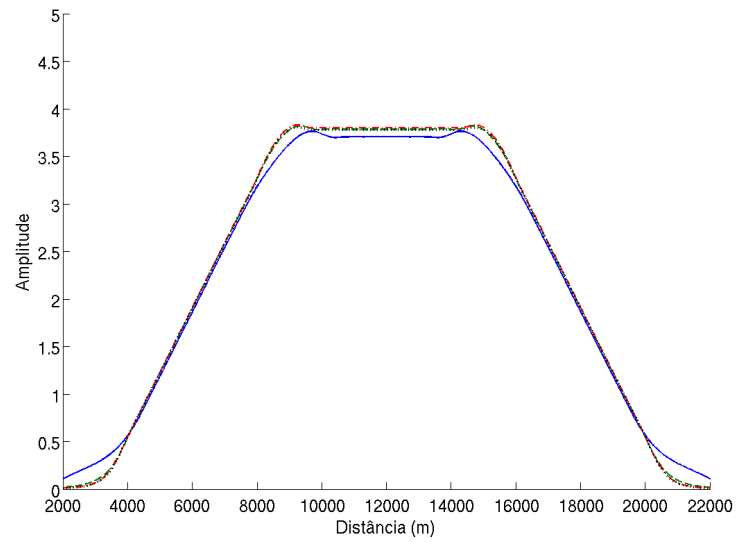


Figura 4.22. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlsa} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

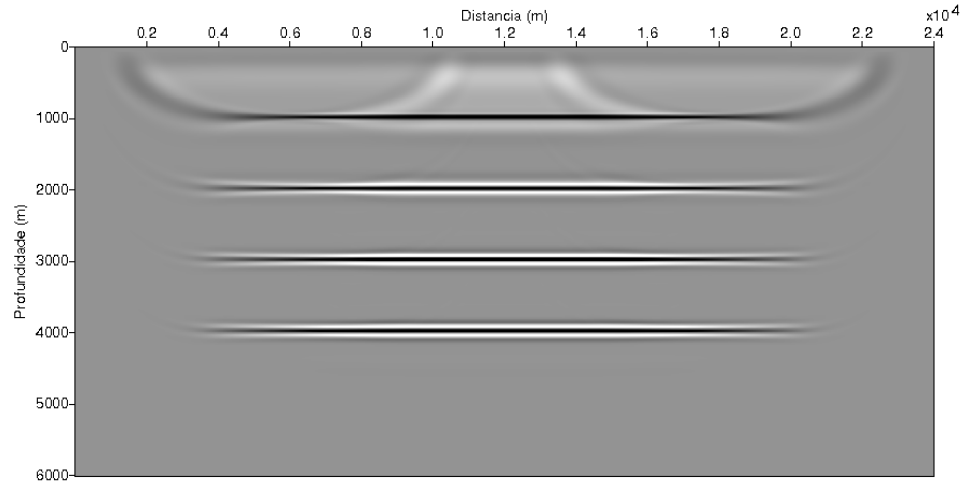


Figura 4.23. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais zerada R_{tlsz} (equação (3.34)).

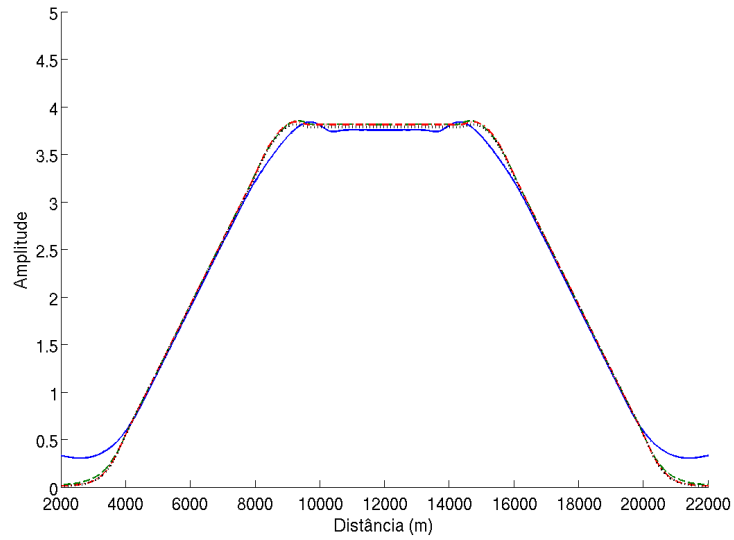


Figura 4.24. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

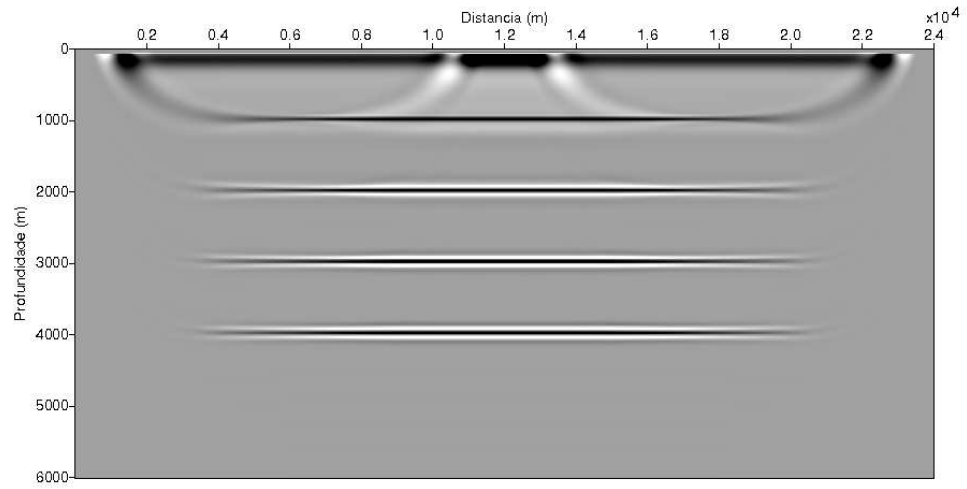


Figura 4.25. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais suavizada R_{tlss} (equação (3.36)).

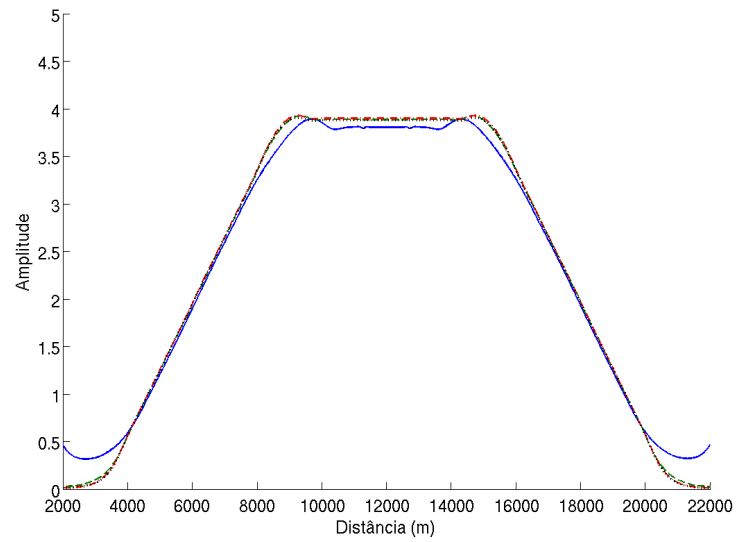


Figura 4.26. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{tlss} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

4.1.6 Quadrados mínimos estabilizados

As Figuras 4.27 e 4.29 exibem os resultados das condições de imagem R_{ls} e R_{sls} (equação (3.37) e (3.40)). Para a condição de imagem R_{sls} realizamos vários testes com diferentes valores de N_x (equação (3.38)) e β (equação (3.39)). Os melhores resultados foram obtidos para $N_x = 275$ e $\beta = 1$. Comparando as imagens das Figura 4.27 e 4.29 vemos que estas, em um aspecto global, são praticamente idênticas, diferenciando apenas nos artefatos produzidos perto da superfície mas que, mais uma vez, aparecem apenas nas regiões de fronteira da imagem. Os artefatos de migração que aparecem na região central das condições de imagem R_d , R_z , R_s , R_{da} , R_{dad} , R_{daz} e R_{daz} (Figuras 4.3, 4.5, 4.7, 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17, respectivamente) são eliminados pelas condições R_{ls} e R_{sls} . Essas, a menos de efeito de borda, se assemelham muito a simples condição de imagem R_c (equação (3.14)) exibida na Figura 4.1.

Na Figura 4.28, mesmo com a divisão da autocorrelação do campo de onda descendente, vemos que as amplitudes ao longo dos refletores não podem ser preservadas. Se comparada com a Figura 4.2 percebemos apenas uma maior aproximação entre as curvas, isto é, há um certo ganho nas amplitudes com a divisão mas que não é suficiente para preservá-las totalmente.

Nas Figuras 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 apresentamos os variados gráficos das amplitudes ao longo dos refletores para diferentes valores de N_x da condição de imagem R_{sls} (equação (3.40)). Vemos que a escolha da quantidade N_x de pontos da imagem para calcular a média da energia do campo descendente influencia diretamente nas amplitudes ao longo dos quatro refletores. Estas também, por sua vez, não preservam totalmente a amplitude, mas já exibem uma considerável melhora se comparada a condição R_{ls} (equação (3.37)). Para o caso de $N_x = 275$, por exemplo, os segundo e terceiro refletores (curvas verde e vermelha, respectivamente) mostram uma boa preservação da amplitude. Mais uma vez há uma diferença de escala das amplitudes de migração. Essa, se comparada com a escala das demais propostas anteriormente (exceto para a condição de imagem por correlação R_c , dada pela equação (3.14)) diminui. Isso se deve ao fato de que agora a soma das fontes utilizadas no processo é realizada antes da divisão dos campos de ondas.

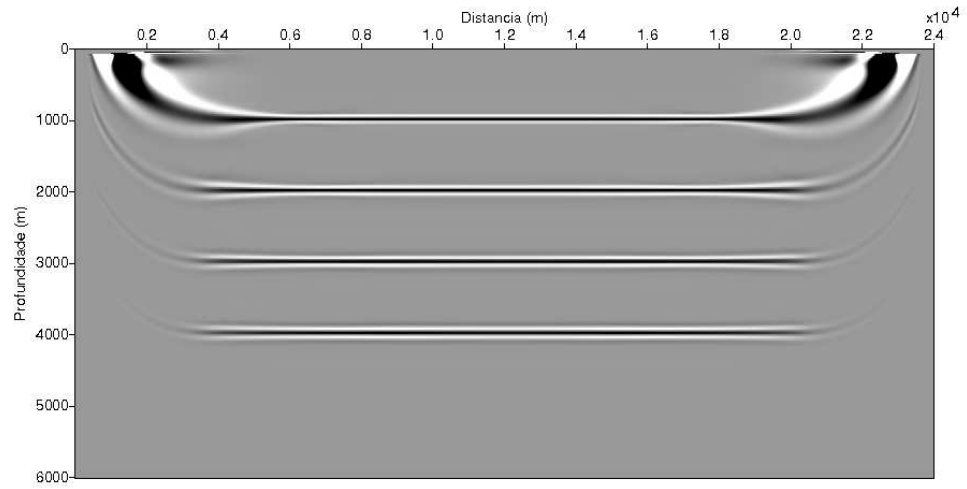


Figura 4.27. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos R_{ls} (equação (3.40)).

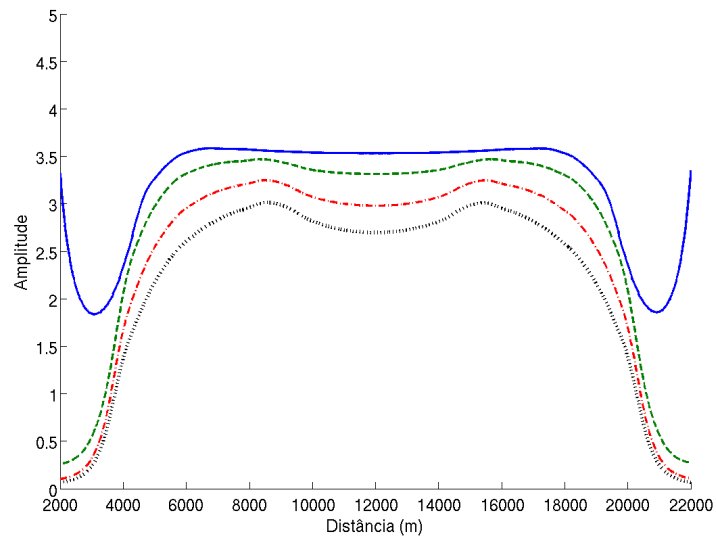


Figura 4.28. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{ls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

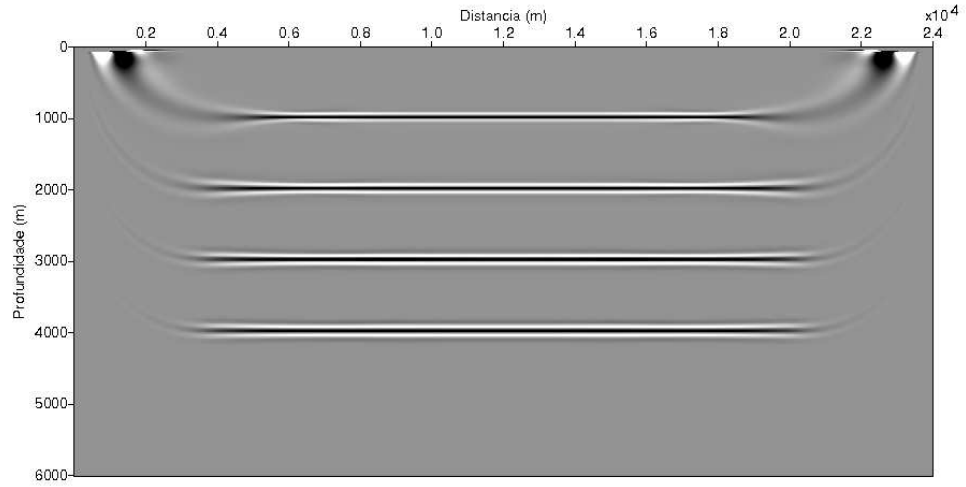


Figura 4.29. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados R_{sls} (equação (3.40)) com $N_x = 275$ e $\beta = 1$.

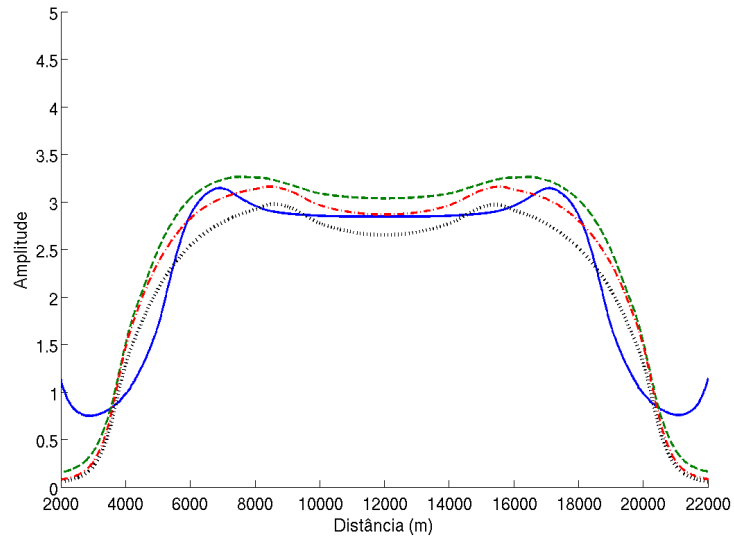


Figura 4.30. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 175$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

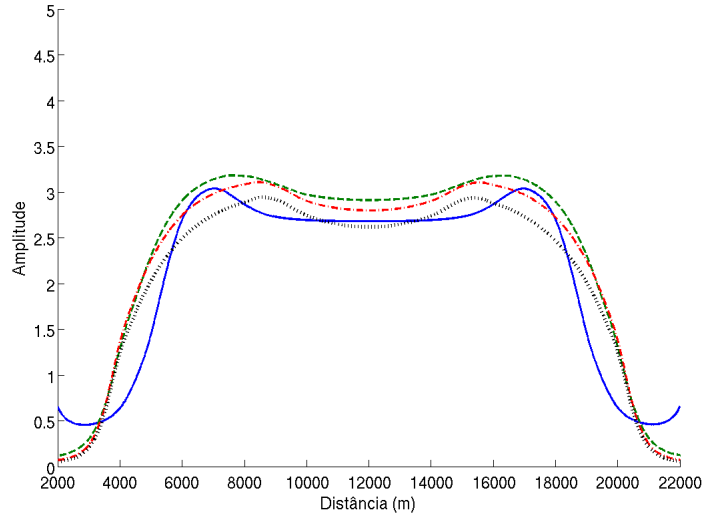


Figura 4.31. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 225$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

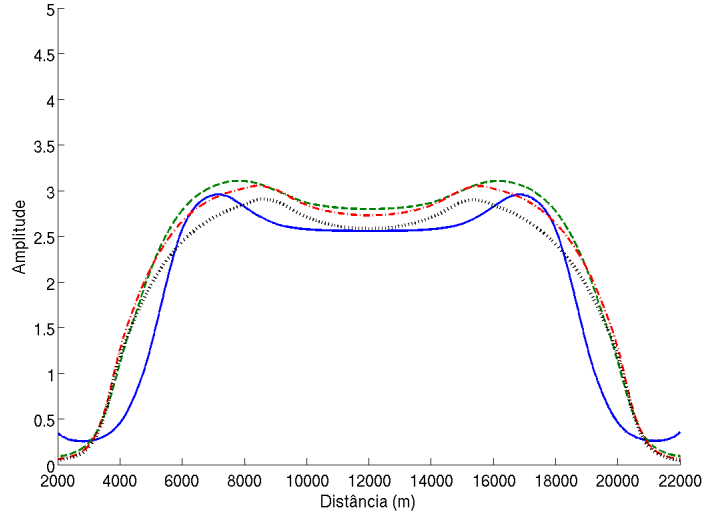


Figura 4.32. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 275$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

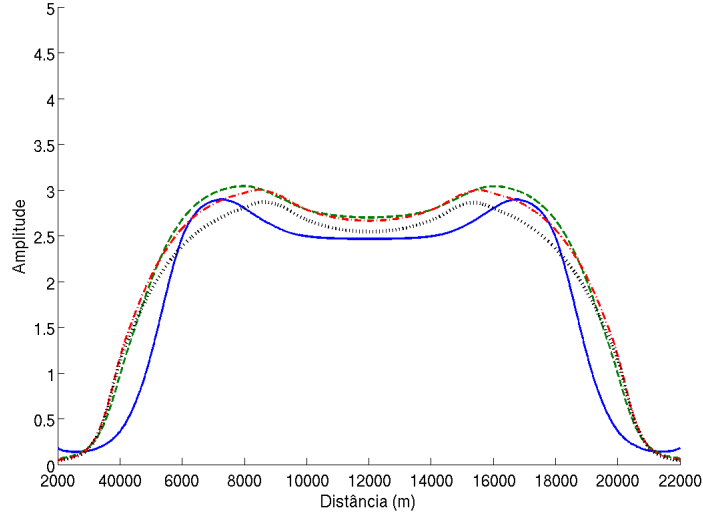


Figura 4.33. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{sls} com $N_x = 325$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

4.1.7 Novas condições de quadrados mínimos estabilizados

As Figuras 4.34, 4.36, 4.39, 4.41, 4.43 e 4.45 apresentam as imagens migradas das propostas condições de imagem $R_{l_{sz}}$, $R_{l_{ss}}$, R_{stls} , R_{stlsa} , R_{stlsz} e R_{stlss} , (equações (3.41), (3.42), (3.43), (3.44), (3.45) e (3.46), respectivamente).

Para a condição $R_{l_{ss}}$ (equação (3.42)), assim como no caso da condição R_{sls} , várias janelas de suavização foram testadas. Na Figura 4.36 apresentamos o resultado com $n_x = 100$. Esta imagem se assemelha muito com a Figura 4.27 da condição de imagem R_{ls} (equação (3.40)).

Diferente da condição de imagem R_{sls} , independente do tamanho da janela de suavização, as amplitudes ao longo dos refletores não foram preservadas (mesmo que parcialmente). Através das Figuras 4.37 e 4.38, que mostram dois casos com janela de suavização $n_x = 100$ e $n_x = 300$, respectivamente, pode-se verificar com clareza que diferentes refletores apresentam diferentes amplitudes e que, por mais que a janela de suavização varie, ainda assim as amplitudes não são preservadas. No caso em que $n_x = 100$ (Figura 4.37) percebemos uma certa semelhança dos três últimos refletores em relação a Figura 4.28 da condição de imagem R_{ls} (equação (3.37)). Esta semelhança explica o porquê das imagens das Figuras 4.27 e 4.36 serem praticamente idênticas.

Analisando a Figura 4.39 vemos que está se assemelha fortemente à Figura 4.27 da condição de imagem R_{ls} (equação (3.40)), com apenas alguns artefatos de migração na região de fronteira da imagem e em sua parte mais profunda. Diferente das condições de imagem R_{ls} , R_{lsz} e R_{lss} , a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados R_{stls} já apresenta uma certa melhoria na preservação das amplitudes ao longo dos 3 últimos refletores (Figuras 4.40, 4.28, 4.35 e 4.37).

Diante desta melhoria é que resolvemos unir as técnicas de estabilização propostas por SCHLEICHER et al. (2008) com a referida condição de imagem R_{stls} , esperando que as amplitudes ao longo dos quatro refletores (e não apenas dos três últimos) fossem preservadas. Os resultados das amplitudes das novas condições de quadrados mínimos totais estão exibidos nas Figuras 4.42, 4.44 e 4.46. Claramente, ao compararmos tais condições com as amplitudes das condições de imagem R_{lsz} e R_{lss} (equações (3.41) e (3.42)) e exibidas nas Figuras (4.35) e (4.37), vemos que as condições de quadrados mínimos totais estabilizados preservaram as amplitudes ao longo dos quatro refletores, enquanto que as anteriores não.

No caso da condição R_{stlss} , a janela de suavização utilizada foi $n_x = 25$, menor que àquela da condição de imagem R_{lss} (equação (3.42)). Ainda, vale ressaltar que, neste caso, com uma pequena janela já conseguimos preservar a amplitude ao longo dos quatro refletores, situação esta não atingida para a condição R_{lss} , independente do tamanho da janela de suavização utilizada.

Para as condições R_{lsz} e R_{stlsz} , como mostram as Figuras 4.34 e 4.43, atribuir o valor zero a imagem onde o campo de onda descendente é muito pequeno fornece um cancelamento dos efeitos indesejados fora da imagem. Na região central, em ambos os casos, poucos artefatos de migração são visíveis.

Se compararmos as condições de imagem R_{stls} , R_{stlsa} , R_{stlsz} e R_{stlss} com as condições propostas nas Seções 4.1.2 a 4.1.5, que preservam as amplitudes ao longo dos quatro refletores (com excessão da condição de imagem por correlação R_c), vemos que as condições por quadrados mínimos totais estabilizados conseguiu recuperar uma quantidade maior de amplitude verdadeira ao longo dos quatro refletores em relação ao afastamento realizado. Nas condições anteriores, a região de melhor estabilidade estendia-se de 8000 m a 15000 m aproximadamente, perdendo informações de amplitude de uma parcela significativa dos refletores, enquanto que as novas condições de imagem variam aproximadamente

de 6000 m a 18000 m. Esse comportamento se deve ao fato de efetuarmos a soma das fontes antes da divisão dos campos de ondas, fazendo com que a região migrada com amplitude verdadeira seja maior que as apresentadas anteriormente.

Por fim, se o nosso modelo foi construído de modo a produzir um coeficiente de reflexão constante de 0.2 mas com um problema de escala de fator 20 não identificado, era de se esperar que todas as condições de imagem apresentassem as amplitudes ao longo dos quatro relfetores próximas de 4 ($0.2 \cdot 20$). Entretanto, o que vemos em todas as condições de imagem testadas é que apenas as condições de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados é que atingiram tal valor. As demais ficaram próximas, mas sempre abaixo do valor 4 esperado.

Portanto, de todas as condições de imagem testadas e apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.46, temos que as condições de quadrados mínimos totais estabilizados apresentam os melhores resultados pois, além de obtermos uma preservação das amplitudes ao longo dos quatro relfetores, temos um aumento na região que apresenta uma melhor estabilidade com amplitude verdadeira e atingida no valor esperado.

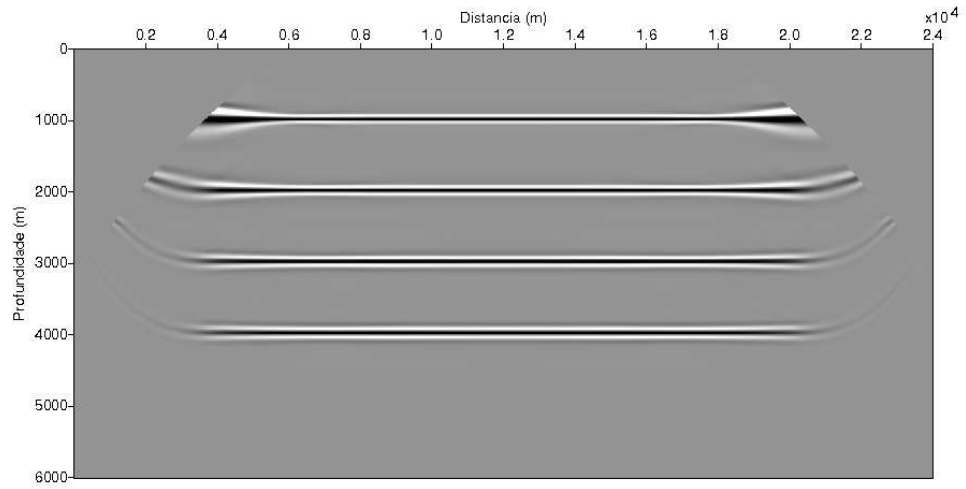


Figura 4.34. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados zerada R_{lsz} (equação (3.41)).

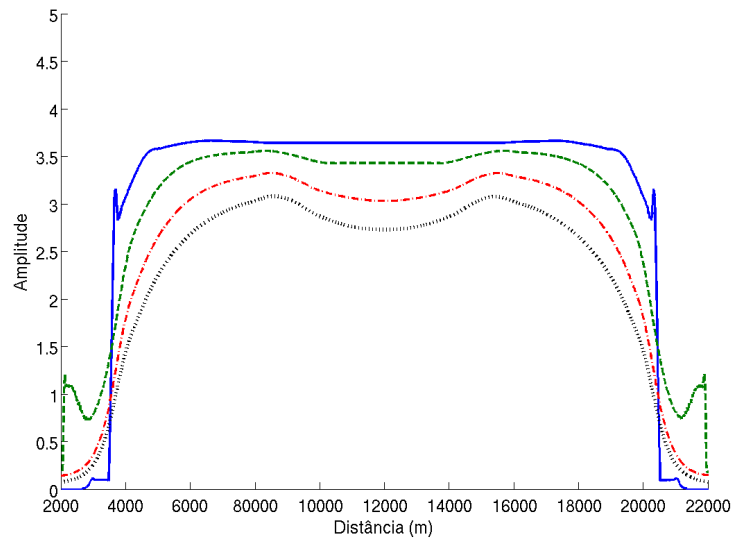


Figura 4.35. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{lsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

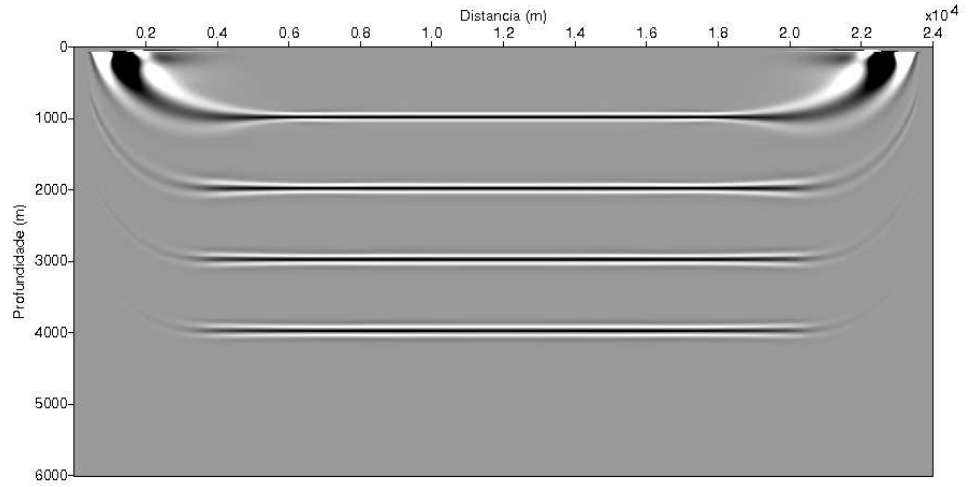


Figura 4.36. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados suavizado R_{lss} (equação (3.42)) para $n_x = 100$.

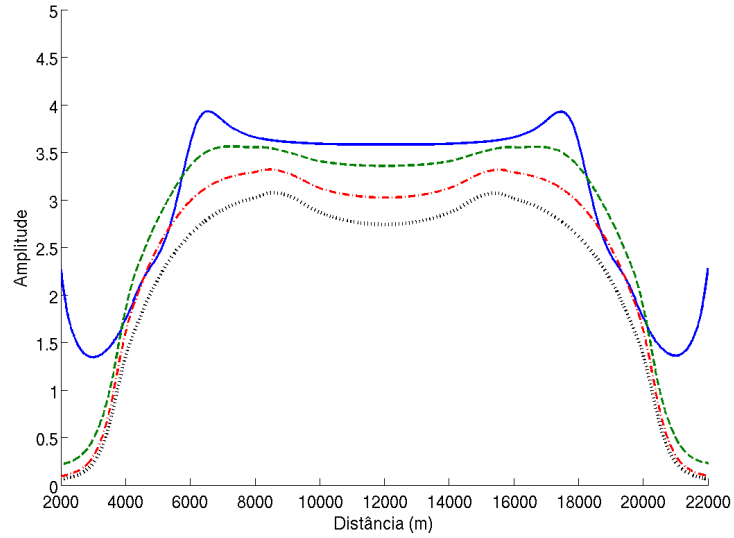


Figura 4.37. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{lss} com $n_x = 100$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

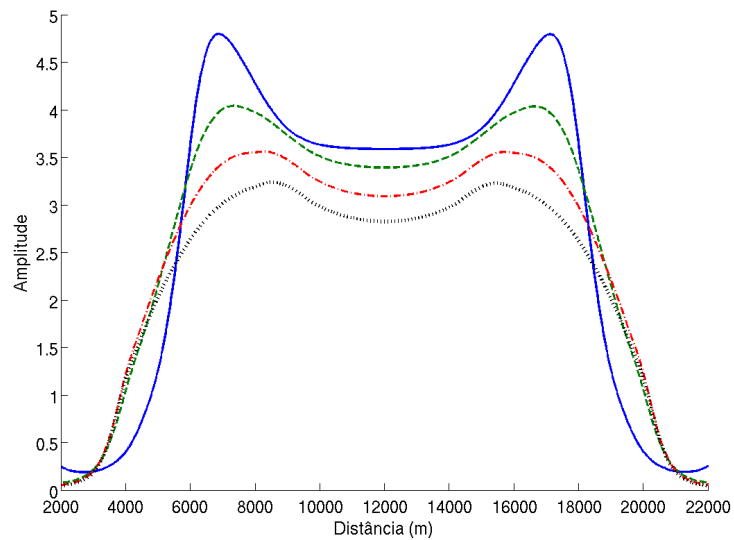


Figura 4.38. Amplitude ao longo dos refletor para a condição de imagem R_{lss} com $n_x = 300$. Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

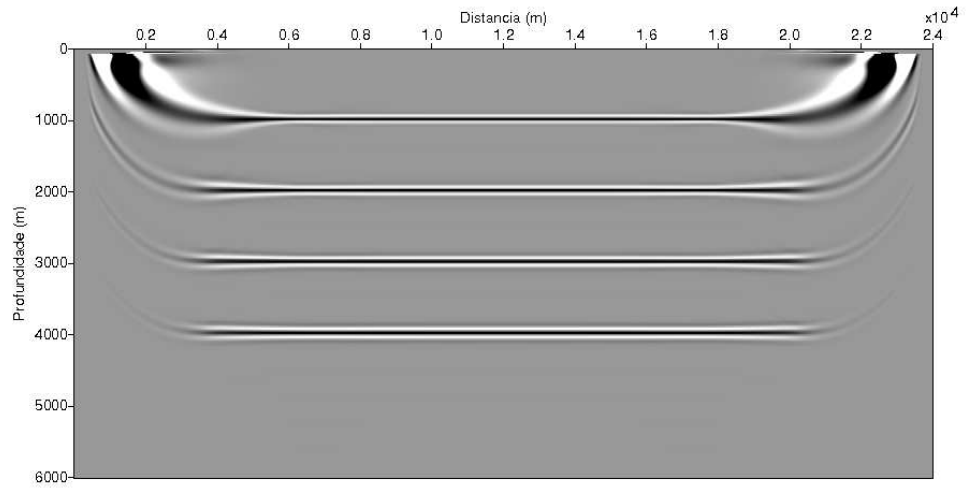


Figura 4.39. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados R_{stls} (equação (3.43)).

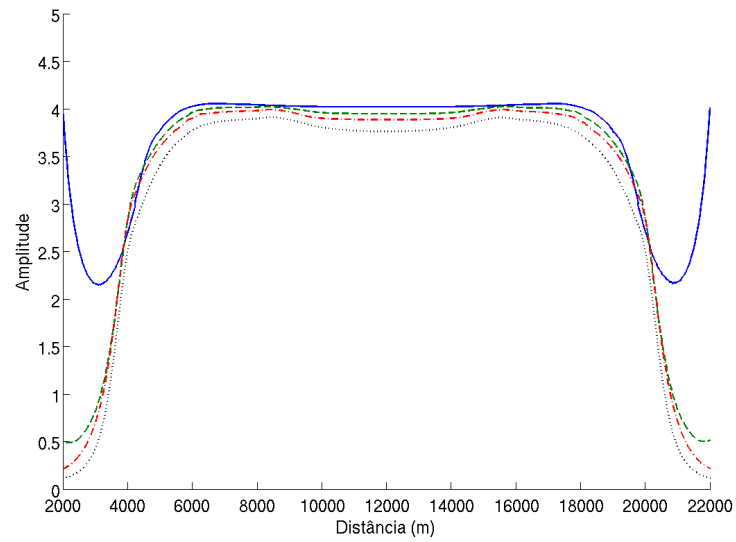


Figura 4.40. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stls} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

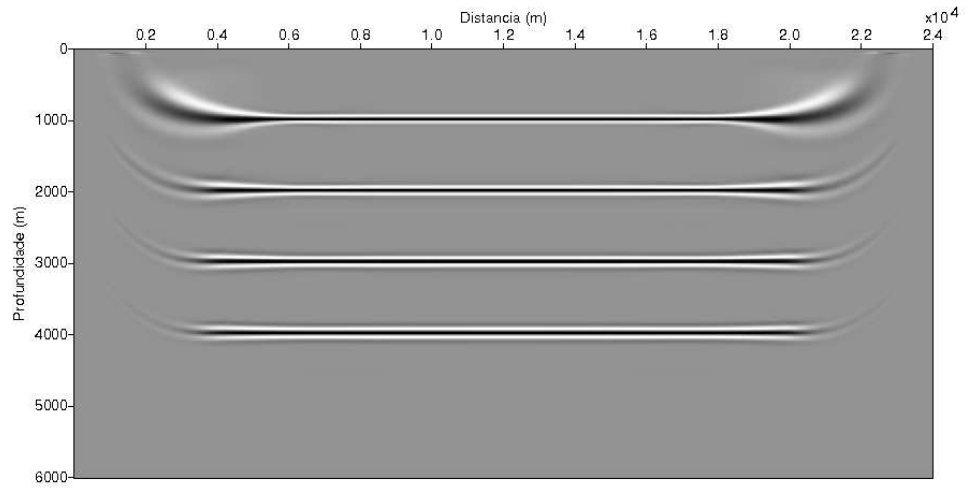


Figura 4.41. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados amortecida R_{stlsa} (equação (3.44)).

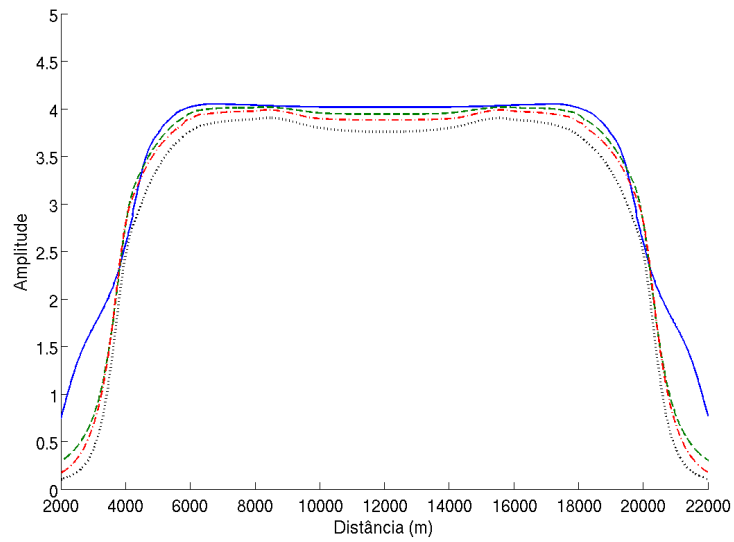


Figura 4.42. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlsa} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

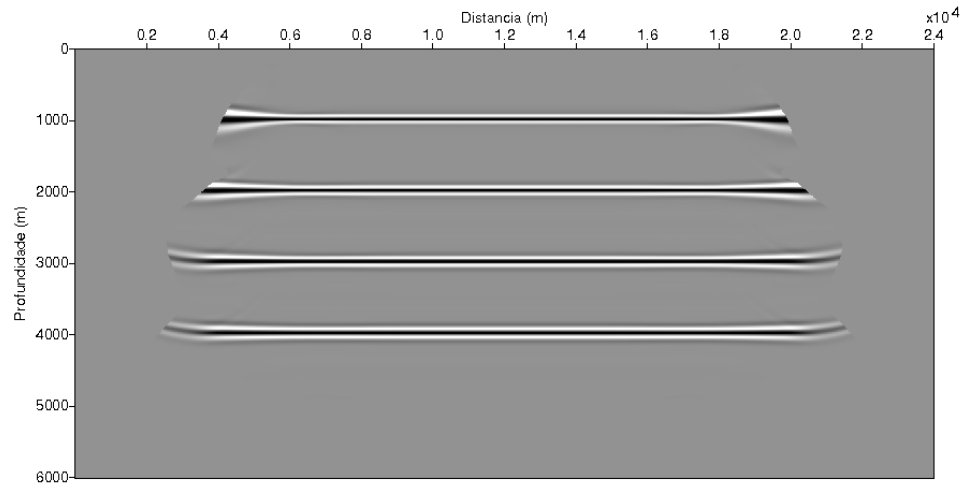


Figura 4.43. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados zerada R_{stlsz} (equação (3.45)).

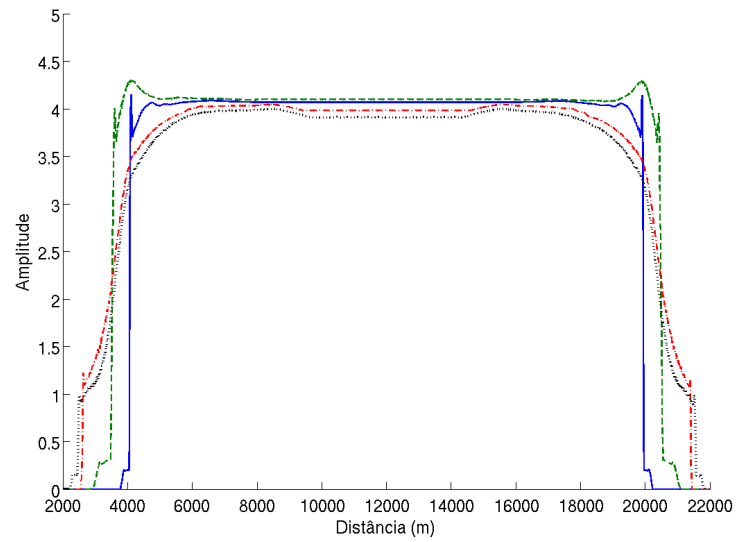


Figura 4.44. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlsz} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

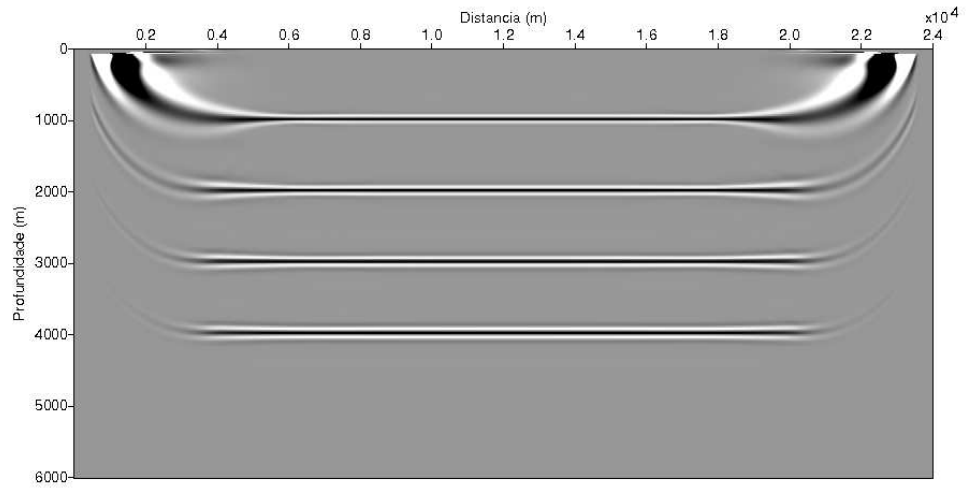


Figura 4.45. Modelo horizontal migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados suavizada R_{stlss} (equação (3.46)).

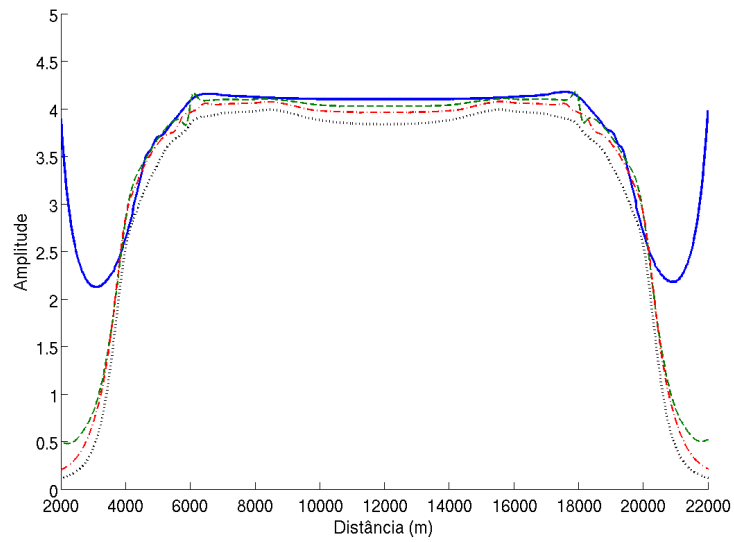


Figura 4.46. Amplitude ao longo dos refletores para a condição de imagem R_{stlss} . Primeiro refletor linha sólida (azul). Segundo refletor linha tracejada (verde). Terceiro refletor linha tracejada-pontilhada (vermelha). Quarto refletor linha pontilhada (preta).

4.2 Modelo Marmousi

Para estudar a qualidade das abordadas condições de imagem em um modelo mais realístico, aplicamos as mesmas no modelo Marmousi (VERSTEEG, 1994). Em todos os casos, como já dito anteriormente, utilizamos a mesma técnica de migração e a real distribuição de velocidade do modelo Marmousi (Figura 4.47), donde as diferenças entre as imagens dependem exclusivamente das condições de imagem utilizadas.

4.2.1 Correlação

A Figura 4.48 mostra o resultado da condição R_c (equação (3.14)). Esta condição de imagem é considerada uma referência pelo fato de ser a mais estável condição de imagem conhecida e é amplamente utilizada na prática. Todas as outras condições de imagem supostamente não degradam a qualidade da imagem em comparação a esta.

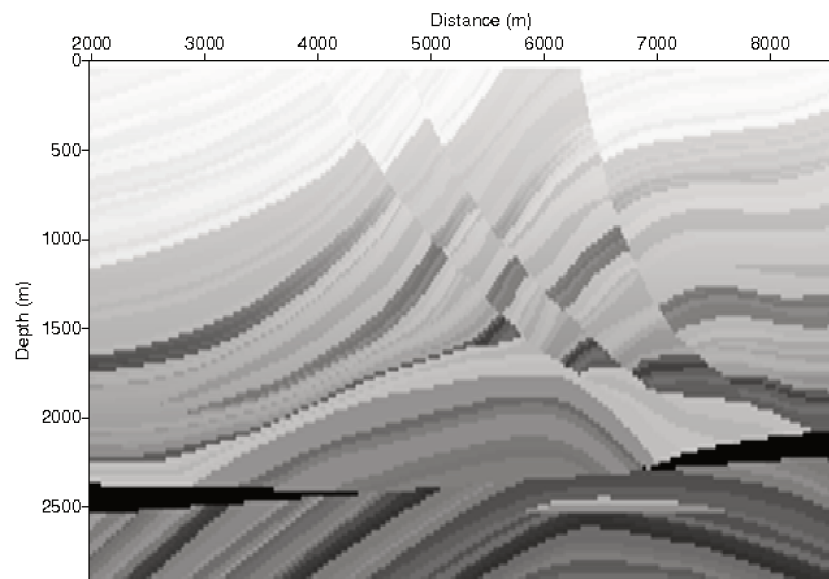


Figura 4.47. Modelo de velocidade do modelo Marmousi .

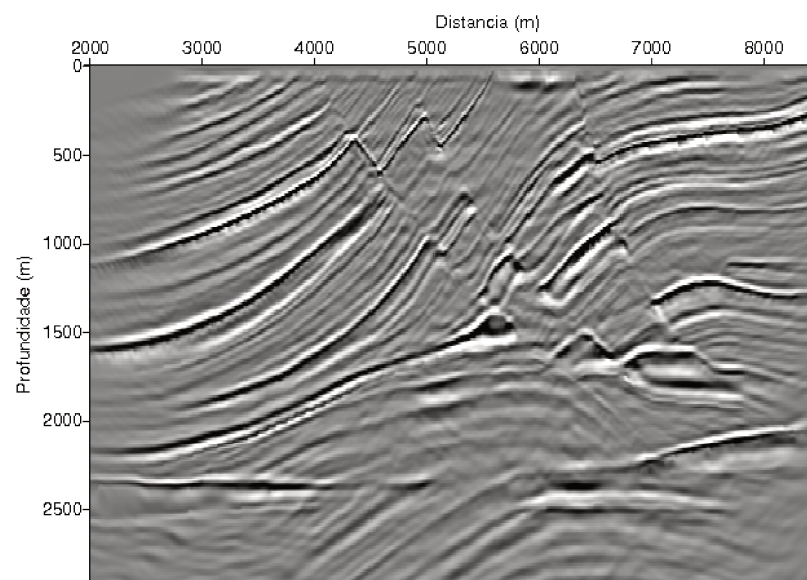


Figura 4.48. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)).

4.2.2 Divisão estável

A primeira condição de imagem com compensação de iluminação que testamos é a condição de imagem por divisão estável R_d da equação (3.16). Como já sabemos dos testes realizados nas camadas horizontais, este tipo de divisão tende a criar artefatos de migração. Testes no modelo Marmousi confirmam isto. Os artefatos de migração são tão intensos que a atual imagem não pode ser vista, exceto para alguns refletores muito fortes, mesmo para altos valores de λ na equação (3.17). Assim, abstermo-nos de mostrar tais resultados.

A estabilização da imagem só pôde ser atingida usando um valor fixo de $\varepsilon = 10^{-4}$ em todo o processo de migração para todos os tiros e níveis de profundidade ao invés de um valor ε variável sugerido pela equação (3.17). O resultado está exibido na Figura 4.49. Notamos que as imagens das Figuras 4.48 e 4.49 são praticamente idênticas. O motivo é o valor de estabilização adotado, que faz a compensação de iluminação quase uma divisão por um fator de escala constante, resultando assim em diferenças não significativas entre as imagens.

A situação é praticamente a mesma se ao invés de adicionarmos ε ao denominador da condição de imagem R_d , realizarmos a divisão apenas caso o denominador seja superior a ε , como proposto na condição de imagem R_z (equação (3.19)). Novamente, somente pela substituição de um valor fixo $\varepsilon = 10^{-4}$, a imagem melhora, embora permaneça com certos artefatos. Devido a semelhança a imagem da Figura 4.49, abstermo-nos de mostrar sua imagem resultante.

4.2.3 Suavização

A Figura 4.50 mostra o resultado da condição de imagem R_s (equação (3.20)), que suaviza o denominador da divisão. O tamanho da janela de suavização utilizado foi de $n_x = 75$.

A estrutura da imagem teve uma ligeira melhora em comparação a imagem da Figura 4.49. Além disso, a compensação de iluminação pode ser vista como tendo um efeito considerável. As reflexões mais fortes nas regiões mais profundas do modelo, bem como as reflexões do reservatório, têm amplitudes mais fortes do que antes. Entretanto, os

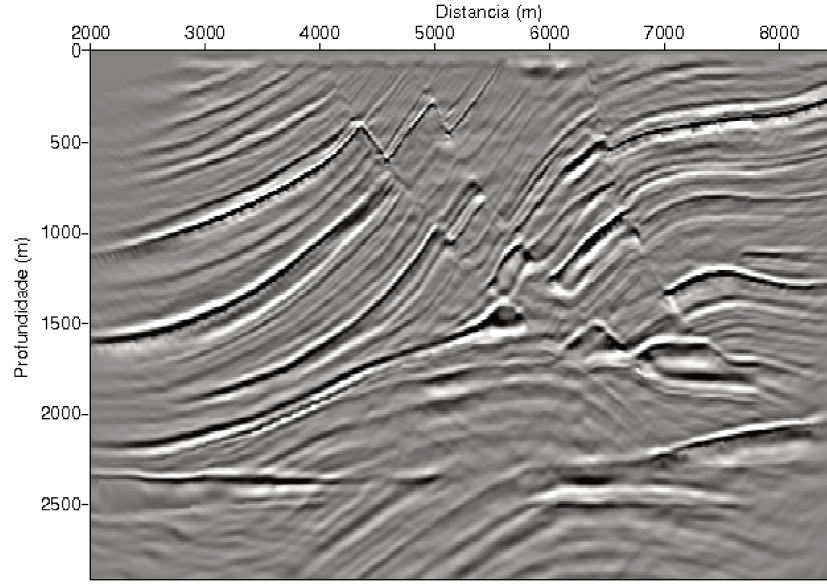


Figura 4.49. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão estável R_d (equação (3.16)) com $\varepsilon = 10^{-4}$.

artefatos de migração são ainda bastante fortes, deteriorando a qualidade final da imagem. Isto é consistente com o resultado do simples modelo de camadas horizontais apresentado na Figura 4.7 que mostra um ruído semelhante. Assim como na Figura 4.7, as falsas sombras de refletor da Figura 4.50 são mais fracas que os refletor propriamente ditos, mas que, no geral, geram uma impressão de instabilidade.

4.2.4 Divisão por Autocorrelação

Artefatos fora das regiões iluminadas perturbaram a imagem obtida quando aplicada a condição de imagem R_{da} , dada pela equação (3.22). Entretanto, tanto a condição de imagem R_{dad} quanto a condição R_{daz} , dadas pelas equações (3.25) e (3.26), respectivamente, que divide a correlação cruzada pela autocorrelação (modificadas a partir da condição R_{da}), produziram resultados satisfatórios e praticamente idênticos. Por esta razão, apresentamos apenas o resultado da condição de imagem R_{daz} na Figura 4.51. Em ambas condições de imagem tomamos $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$ na equação (3.28).

Ambas imagens migradas são virtualmente idênticas, apresentando uma melhora na recuperação da zona do reservatório quando comparado com o resultado de correlação

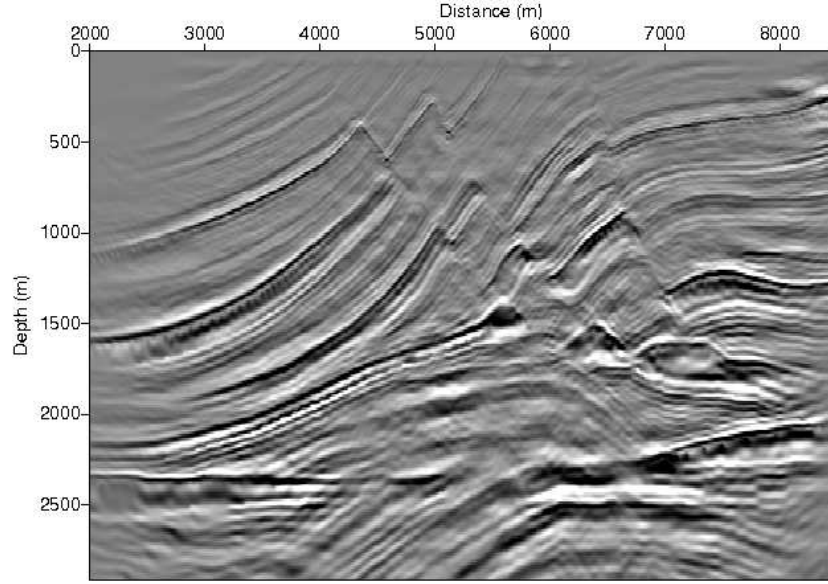


Figura 4.50. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por suavização R_s (equação (3.20)) com janela de tamanho $n_x = 75$.

(Figura 4.48). Em geral, embora nenhuma correção de amplitude foi aplicada, a força das imagens dos refletores dá alguma idéia sobre a força relativa dos contrastes no modelo Marmousi original.

Como esperado do experimento de camadas horizontais, definir a condição de imagem como sendo zero onde o campo de onda descendente é muito pequeno (menor ou igual que ε) nos fornece uma região mutada de efeitos indesejáveis na imagem. Note que apesar das condições de imagem R_{da} , R_{dad} e R_{daz} (equações (3.22), (3.25) e (3.26), respectivamente) realizarem compensação de iluminação, os artefatos de migração da Figura 4.51 não são piores do que aqueles apresentados na Figura 4.48 dada pela simples condição de imagem por correlação R_c (equação (3.14)).

Semelhante resultado foi obtido pela condição de Imagem R_{das} (equação (3.29)), com uma janela de suavização de tamanho $n_x = 100$ e apresentado na Figura 4.52. Embora a qualidade global de ambas as imagens sejam semelhantes, a condição de imagem R_{das} é melhor na parte superior da imagem enquanto R_{daz} produz imagens mais claras em sua parte inferior. Alguns artefatos de migração permanecem em ambas as imagens. Os mais fortes podem ser observados na Figura 4.52.

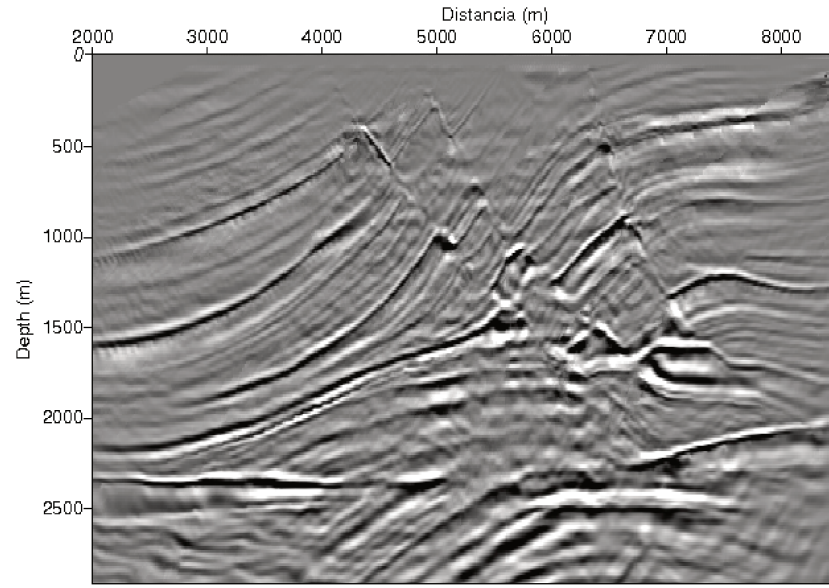


Figura 4.51. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação R_{daz} (equação (3.26)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$.

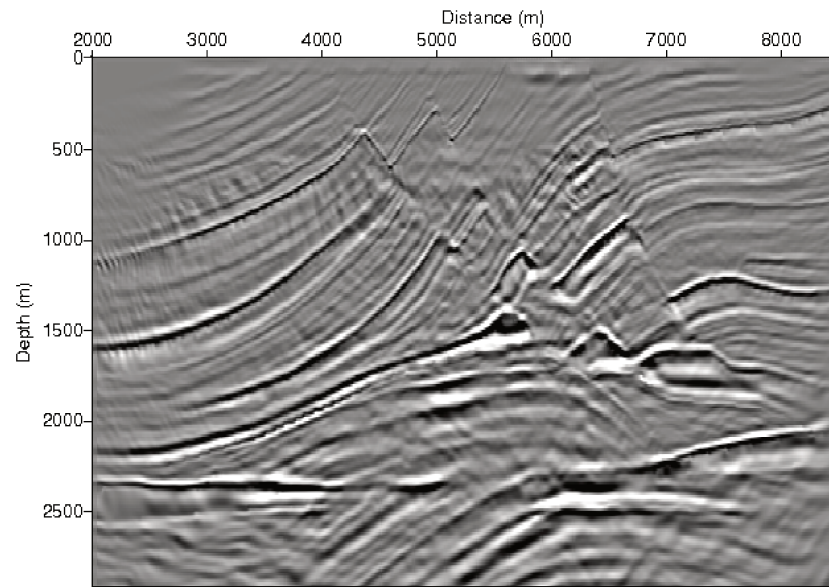


Figura 4.52. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por auto-correlação R_{das} (equação (3.29)) com janela de tamanho $n_x = 100$.

4.2.5 Quadrados Mínimos Totais

Semelhante à condição de imagem R_{da} , a condição de imagem por quadrados mínimos totais R_{tls} (equação (3.30)) apresentou-se instável. Entretanto, as condições de imagem R_{tlsa} , R_{tlsz} e R_{tlss} , dadas pelas equações (3.33), (3.34) e (3.36), respectivamente, produziram resultados satisfatórios. Mais uma vez as condições R_{tlsa} e R_{tlsz} apresentaram resultados semelhantes e por esta razão, apresentamos apenas o resultado da condição R_{tlsz} na Figura 4.53. Para as condições R_{tlsa} e R_{tlsz} tomamos novamente $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$ na equação (3.28) e $n_x = 100$ para a condição R_{tlss} .

Comparando as Figuras 4.51 e 4.53, referente as condições de imagem R_{daz} e R_{tlsz} , vemos que estas, em um aspecto global são praticamente idênticas. Alguns refletores estão mais reforçados na Figura 4.53 na parte superior da imagem enquanto que a Figura 4.51 apresenta uma imagem mais clara em sua parte inferior. Em ambos os casos os artefatos próximos à superfície persistem. Isto é consistente com o modelo de camadas horizontais apresentado na Figura 4.23, que mostram que os artefatos de migração próximos à superfície estão mais acentuados em relação à condição de imagem R_{daz} , mas praticamente idênticos em sua parte mais profunda.

Para as condições R_{das} e R_{tlss} ambas imagens migradas são virtualmente idênticas, resultado este também condizente ao modelo de camadas horizontais e exibidos nas Figuras 4.17 e 4.25

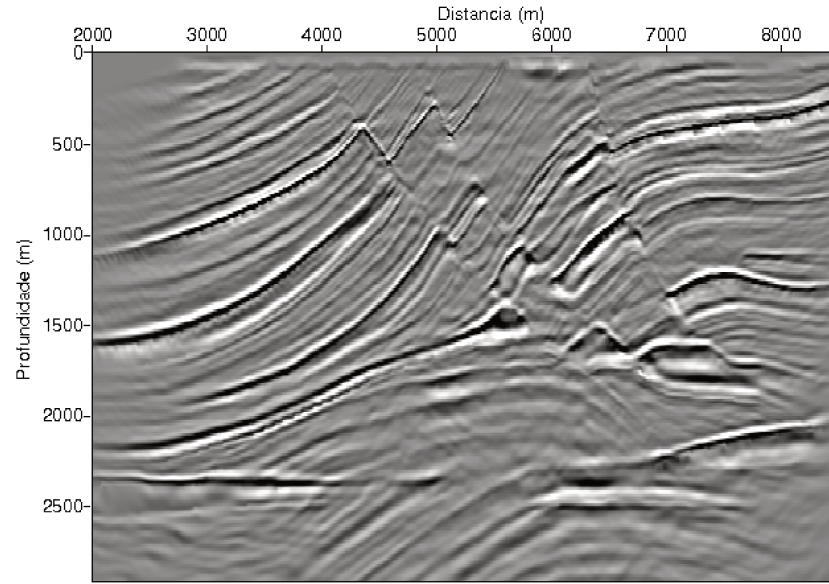


Figura 4.53. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por divisão por quadrados mínimos totais zerada R_{tlsz} (equação (3.34)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$.

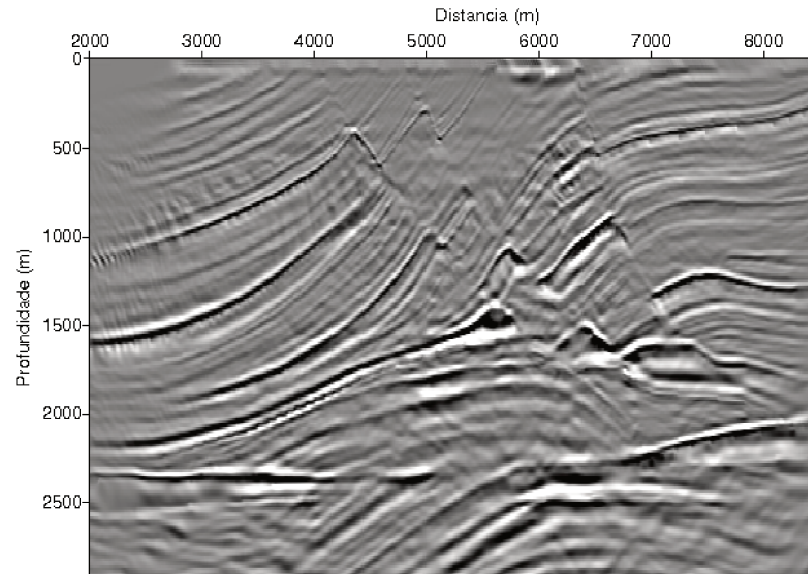


Figura 4.54. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais suavizada R_{tlss} (equação (3.36)) com janela de tamanho $n_x = 100$.

4.2.6 Quadrados mínimos estabilizados

As imagens das Figuras 4.55 e 4.56 apresentam o resultado das condições de imagem R_{ls} e R_{sls} dadas pelas equações (3.37) e (3.40), respectivamente. Novamente tomamos na equação (3.39) $\beta = 1$. Como uma primeira vantagem destas condições de imagem por quadrados mínimos, notamos que em todas as figuras as imagens vão muito mais longe na zona de fronteira do que nas Figuras 4.51 e 4.52. Após uma inspeção mais detalhada da imagem da Figura 4.55, vemos a presença de artefatos perto da superfície, problema este resolvido pela condição de imagem R_{sls} (Figura 4.56). Entretanto, como já esperado do modelo de camadas horizontais, estes artefatos aparecem apenas na região de fronteira da imagem, onde os dados avaliados são, de qualquer forma, insuficientes e em sua parte central as imagens são praticamente idênticas. Em ambos os casos os artefatos persistem em uma profundidade de aproximadamente 1500 metros. As amplitudes nas Figuras 4.55 e 4.56 são visivelmente reduzidas se comparadas com as Figuras 4.51 e 4.52.

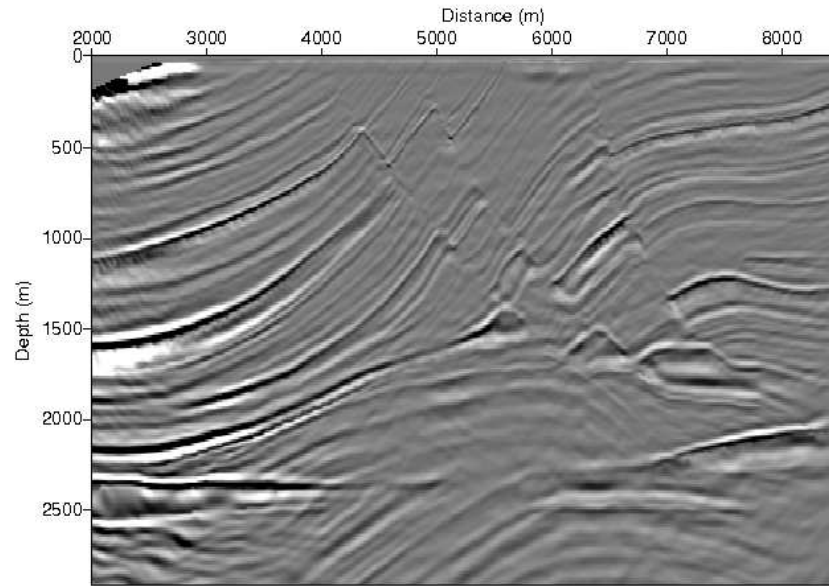


Figura 4.55. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos R_{ls} (equação (3.37)).

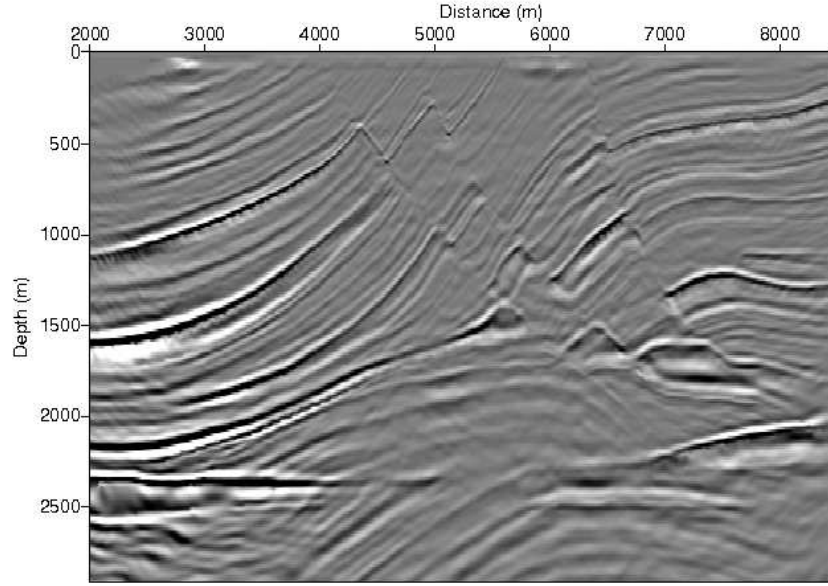


Figura 4.56. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados R_{sls} (equação (3.40)) com $N_x = 275$ e $\beta = 1$.

4.2.7 Novas condições de quadrados mínimos estabilizados

Pelo fato de que as condições de imagem por quadrados mínimos e quadrados mínimos estabilizados (equações (3.37) e (3.40), respectivamente) produziram bons resultados com diferentes artefatos removidos em relação as condições de imagem R_{dad} , R_{daz} e R_{das} , nos motivamos a combinar os respectivos tipos de estabilização na condição de imagem R_{ls} , bem como na condição de imagem R_{tls} , esperando que estas combinações possam ajudar a remover todos os artefatos de migração observados. O resultado das condições de imagens combinadas R_{lsz} , R_{lss} , R_{stls} , R_{stlsz} e R_{stlss} (equações (3.41), (3.42), (3.43), (3.45) e (3.46)) estão nas Figuras 4.57, 4.58, 4.59, 4.60 e 4.61, respectivamente. Para as condições R_{lsz} e R_{stlsz} tomamos $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$ na equação (3.28) e nas condições suavizadas R_{lss} e R_{stlss} tomamos janelas de tamanho $n_x = 100$ e $n_x = 25$ na equação (3.21), respectivamente. Mais uma vez a condição R_{stlsa} apresentou um resultado semelhante à condição R_{stlsz} e por este motivo, abstermo-nos de exibí-la.

Percebemos que as condições de imagem que utilizam a mesma técnica de estabilização apresentam imagens bem semelhantes, como se pode ver nas Figuras 4.57 e 4.60 e 4.58 e 4.61 (vista com seu respectivo par). Porém, as condições de imagem estabilizadas R_{lsz} e

R_{lss} , que usam como ponto de partida a condição de imagem R_{ls} , dada pela equação (3.37) (método de quadrados mínimos convencionais com soma de fontes antes das divisões), como visto no modelo de camadas horizontais, não preservam totalmente a amplitude, problema este sanado pelas condições de quadrados mínimos totais estabilizados R_{stlsz} e R_{stlss} . Particularmente, a condição de imagem R_{lss} (equação (3.42)) preservou de forma parcial a amplitude ao longo dos refletores, mas apenas para grandes janelas, enquanto a amplitude referente a condição R_{stlss} foi totalmente preservada mesmo para uma janela pequena.

Como já esperado do modelo de camadas horizontais, também é grande a semelhança entre as Figuras 4.55 e 4.59 das condições de imagem R_{ls} e R_{stls} (equações (3.37) e (3.43)). Mais uma vez vemos a presença de artefatos próximo a superfície e na região de fronteira da imagem e amplitudes reduzidas se comparadas com as Figuras 4.51 e 4.52.

Ambas condições de imagem R_{stlsz} e R_{stlss} apresentam uma considerável melhora em relação a condição de imagem R_{sls} (Figura 4.56). No caso da condição R_{stlsz} podemos ver uma imagem mais clara em sua parte superior se comparada a condição R_{stlss} . No geral, poucos artefatos de migração são visíveis em ambas as imagens, particularmente na Figura 4.60. Reconhecemos que a extensão para a zona de fronteira alcançada pelas condições R_{ls} e R_{sls} é também realizada pelas presentes condições. Note também que as amplitudes em ambas as imagens são menos afetadas pela estabilização do que aquelas exibidas nas Figuras 4.55 e 4.56 e mais perto daquelas exibidas nas Figuras 4.51 e 4.52. Portanto, podemos concluir que ambos os novos métodos de estabilização agiram positivamente, criando resultados satisfatórios que combinam as vantagens das condições adotadas por SCHLEICHER et al. (2008) e VIVAS et al. (2009).

Uma observação geral sobre todas as comparações feitas das Figuras 4.48 a 4.61 é que a condição de imagem R_{stlsz} (equação (3.45)), por mais que apresente alguns artefatos de migração bem próximos à superfície, produziu a melhor imagem (Figura 4.60), com o mínimo de artefatos de migração e o mínimo de amplitudes de migração afetados. A qualidade desta imagem chega muito próximo da simples condição de imagem por correlação R_c (Figura 4.48) de equação (3.14).

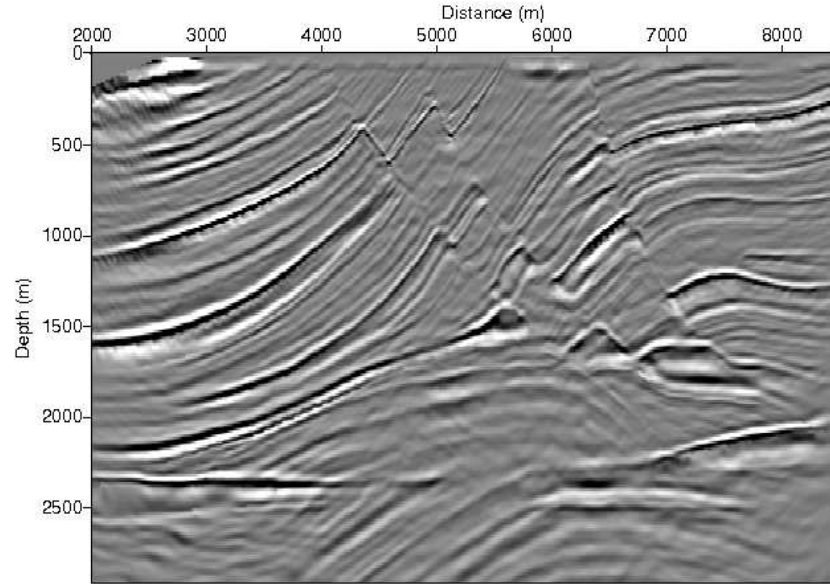


Figura 4.57. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados zerada R_{lsz} (equação (3.41)) com $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$.

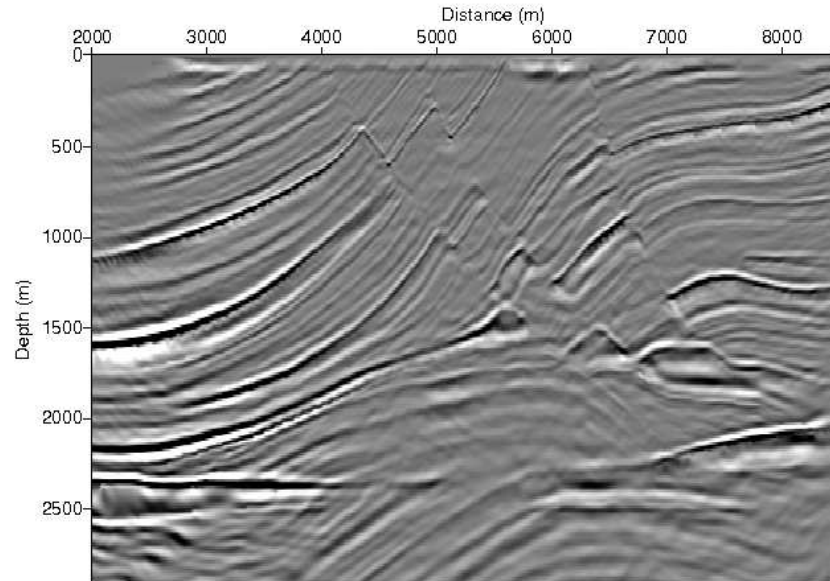


Figura 4.58. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos estabilizados suavizada R_{lss} (equação (3.42)) com $n_x = 100$.

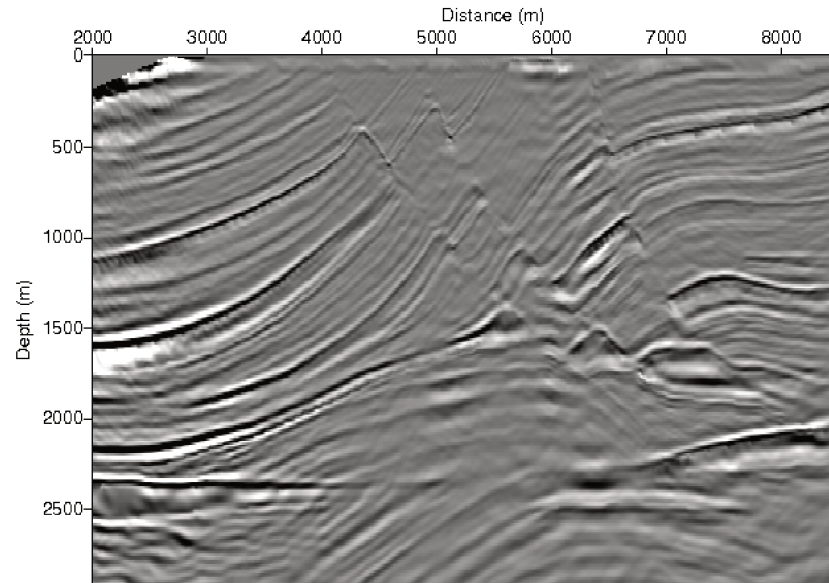


Figura 4.59. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados R_{stls} (equação (3.43)).

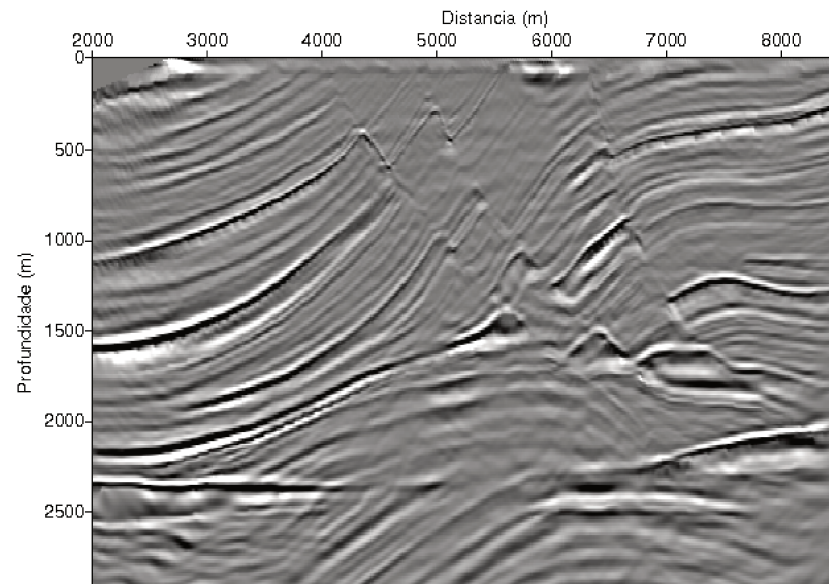


Figura 4.60. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados zerada R_{stlsz} (equação (3.45)) $\lambda = 0.05$ e $\alpha = 10^{-6}$.

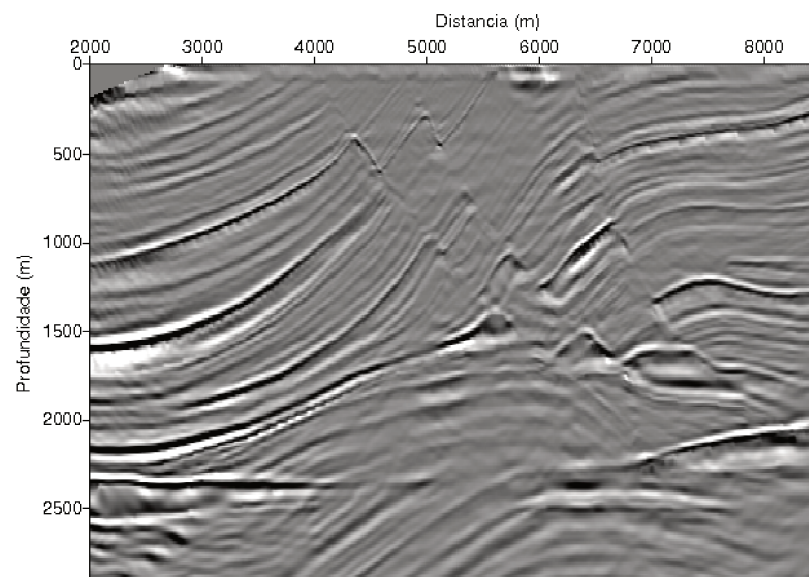


Figura 4.61. Modelo Marmousi migrado utilizando a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados suavizada R_{stlss} (equação (3.46)) com $n_x = 25$.

Conclusões

Quando as amplitudes de uma imagem migrada precisam ser levadas em consideração, a condição de imagem padrão de correlação desenvolvida por CLAERBOUT (1971) não pode ser utilizada, uma vez que esta destrói as informações da amplitude. Diversas técnicas para preservá-las, evitando certos problemas com divisões de valores próximos de zero, foram discutidas em um passado recente (VALENCIANO e BIONDI, 2003; GUITTON et al., 2007; SCHLEICHER et al., 2008; VIVAS et al., 2009). Neste trabalho combinamos as idéias destas diversas técnicas de estabilização para chegarmos a outros novos critérios de estabilização para condições de quadrados mínimos. Estas novas condições, que denominamos por condições de quadrados mínimos estabilizados, ajudam a evitar certos problemas de instabilidade na imagem migrada. Além disso, deduzimos uma nova condição de imagem baseada em quadrados mínimos totais e a combinamos também com as referidas técnicas de estabilização.

Nossos experimentos numéricos, quando aplicados primeiramente em um simples modelo horizontal, bem como no modelo Marmousi, mostram que as condições por quadrados mínimos convencional estabilizados produzem resultados satisfatórios e que ajudam a reduzir certos artefatos de migração que não foram reduzidos pelas condições de imagem recentemente propostas e citadas neste trabalho. Uma série de testes numéricos foi necessária para a escolha dos melhores parâmetros para a estabilização das amplitudes, de acordo com cada técnica de estabilização adotada, parâmetros estes como o tamanho das janelas de suavização e constantes que limitavam os efeitos indesejáveis na imagem onde o campo de onda descendente era de baixo valor (e que ainda dependiam de um certo calibrador constante). A escolha de cada um desses parâmetros influencia diretamente no resultado final da migração, sendo que estes não podem ser muito pequenos, de modo que não estaríamos realizando nenhum tipo de estabilização, como também não podem ser muito grandes, de modo a afetar as suas propriedades matemáticas. Testes realizados no

Conclusões

modelo horizontal mostram que ao escolhermos um parâmetro de forma incorreta podemos alterar as informações de amplitudes dos dados. Isso nos mostra que a dependência desses parâmetros é muito forte e, dependendo do modelo adotado, pode interferir no resultado das amplitudes dos dados. Em nossos experimentos numéricos, em alguns casos, uma pequena variação destes parâmetros (na ordem de 10^{-2} para as constantes limitadoras ou um aumento de 10 pontos nas janelas de suavização, por exemplo) já alteravam significativamente os resultados finais.

Entretanto, por melhor que fosse a escolha dos parâmetros de estabilização, as amplitudes das condições por quadrados mínimos convencional estabilizados não puderam ser totalmente preservadas, independente da técnica de estabilização abordada, problema este sanado pelas novas condições de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados. Uma outra vantagem é que os parâmetros para a estabilização das amplitudes tiveram um melhor comportamento e uma maior flexibilidade, se comparados com aqueles aplicados nas condições por quadrados mínimos convencional. Em grande parte dos testes, os parâmetros de estabilização foram obtidos de forma mais rápida e ainda assim preservando as amplitudes dos dados. Esse fato é de grande importância pois, dependendo do modelo adotado, a escolha do melhor parâmetro torna-se um trabalho honeroso. Além do mais, as novas condições de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados aumentaram a abrangência do afastamento realizado com amplitude verdadeira e atingida no valor esperado e que resultaram em imagens mais claras com menos artefatos de migração possível na região central da imagem.

Uma observação geral sobre todas as comparações feitas é que a condição de imagem por quadrados mínimos totais estabilizados que zera os pontos da imagem onde o denominador é de baixo valor produziu a melhor imagem com o mínimo de artefatos de migração e o mínimo de amplitudes de migração afetados. A qualidade desta imagem chega muito próximo da simples condição de imagem por correlação, mas agora com amplitudes corretamente preservadas.

Referências Bibliográficas

- [1] Arienti, M. T., E. Bonomi, G. Cardone, and L. Cazzola, 2002, *Amplitude-preserving Monte Carlo 3D prestack migration*: 64th EAGE Conference and Exhibition, Expanded Abstracts, EAGE, B09:1–4.
- [2] Bagaini, C., E. Bonomi, and E. Pieroni, 1995, *Data parallel implementation of 3-D PSPI*: 65th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 188-191
- [3] Bleisten, N., 1984, *Mathematical Methods for Wave Phenomena*: Academic Press, Inc.
- [4] Claerbout, J. F., 1970, *Coarse Grid Calculations of Waves in Inhomogeneous Media with Application to Delineation of Complicated Seismic Structure*: Geophysics, **35**, 407-418.
- [5] Claerbout, J. F., 1971, *Toward a unified theory of reflector mapping*: Geophysics, **36**, 467-481.
- [6] Claerbout, J. F., 1985, *Imaging the Earth's Interior*: Blackwell Scientific Publications
- [7] Gazdag, J., 1978, *Wave equation migration with phase-shift method*: Geophysics, **43**, 1342-1351.
- [8] Gazdag, J., and Sguazzero P., 1984, *Migration os seismic data by phase shift plus interpolation*: Geophysics, **49**, 124-131.
- [9] Guitton, A., A. Valenciano, D. Bevc, and J. Claerbout, 2007, *Smoothing imaging condition for shot profile migration*: Geophysics **72**, no. 3, S149-S154.
- [10] Ikelle, L. T., L. Amundsen 2005, *Introduction to Petroleum Seismology*: Investigations in Geophysics n° 12, Society of Exploration Geophysicists.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] Kearey, P., Michael B., Ian Hill, 2002, *An Introduction to Geophysical Exploration*: Blackwell Science, Third Edition.
- [12] Nolet, G., 2008, *A Breviary of Seismic Tomography: Imaging the Interior of the Earth and Sun*: Cambridge University Press.
- [13] Riley, D. C., and J. Claerbout, 1976, *2-D Multiple Reflections*: Geophysics **41**, no. 4, 592-620.
- [14] Ristow, D., and Rühl, T., 1994, *Fourier finite-difference migration*: Geophysics, **59**, 1882-1893.
- [15] Sava, P. , and S. Fomel, 2006, *Time-shift Imaging Condition on Seismic Migration*: Geophysics, **71**, S209 - S217.
- [16] Schleicher, J., Costa, J. C., and Novais, A., 2008, *A comparison of imaging conditions for wave-equation shot-profile migration*: Geophysics, **73**, S219-S227.
- [17] Stoffa, P. L., Fokkema, J. T., de Luna Freire, R. M. and Kessinger, W. P., 1990, *Split-step Fourier migration*: Geophysics, **55**, 410-421.
- [18] Valenciano, A., and B. Biondi, 2003, *2D deconvolution imaging condition for shot profile migration*: 73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1059-1062.
- [19] Versteeg, R., 1994, *The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set*: The Leading Edge, **13**, 927-936.
- [20] Vivas, F. A., Pestana, R. C., and Ursin, B., 2009, *A new stabilized least-squares imaging condition*: Journal of Geophysics and Engineering, **6**, 264-268.
- [21] Yilmaz, Ö., 2008, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*: Investigations in Geophysics n° 10, Society of Exploration Geophysicists.