COPPE/UFRJ

ESTUDO DA VARIAÇÃO DE AMPLITUDES COM O ÂNGULO (AVA) ATRAVÉS DO EMPREGO DE DIFERENTES FORMAS DE EXTRAPOLAÇÃO NAS IMAGENS ORIUNDAS DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

Ana Paula dos Santos da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: André Bulcão
Luiz Landau

Rio de Janeiro
Maio de 2009

ESTUDO DA VARIAÇÃO DE AMPLITUDES COM O ÂNGULO (AVA) ATRAVÉS DO EMPREGO DE DIFERENTES FORMAS DE EXTRAPOLAÇÃO NAS IMAGENS ORIUNDAS DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

Ana Paula dos Santos da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

_____
Prof. Luiz Landau, D.Sc.

_____
Dr. André Bulcão, D.Sc

_____
Prof. Marco Antônio Cetale Santos, D.Sc.

_____
Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 2009

Silva, Ana Paula dos Santos da

Estudo da Variação de Amplitudes com o Ângulo (AVA) Através do Emprego de Diferentes Formas de Extrapolação Nas Imagens Oriundas Da Migração Reversa No Tempo / Ana Paula dos Santos da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

IX, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau
André Bulcão

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 77-81.

1. Migração reversa no tempo. 2. Análise de AVA/AVO. 3. Refletividade. I. Bulcão, André; Landau, Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

"Dedico este trabalho à minha avó Maria Machado dos Santos, por ter sido um exemplo de luta e superação e minha verdadeira mãe"

" *Pedras no caminho? Guardo todas,*
um dia vou construir um castelo..."
(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao coordenador Dr. Luiz Landau e a todo corpo técnico-administrativo dos laboratórios LAMCE e LAB2M da COPPE/UFRJ pela oportunidade da realização deste projeto.

Agradeço ao meu orientador Dr. André Bulcão pelo sua enorme dedicação na orientação deste trabalho e brilhante contribuição para o desenvolvimento científico.

Agradeço ao meu pai José Alberto por todo o amor e dedicação ao longo da minha vida, à Bárbara Mariozzi pelo apoio e amizade e à Myrian D. Hahn pelo apoio incondicional, suporte, encorajamento e principalmente pelo carinho e apoio emocional que só uma verdadeira mãe tem pelos seus filhos.

Agradeço à amiga e geofísica Patrícia P. Ferreira, pelo apoio e presença constante durante a realização deste trabalho à Darlan Ramos pela amizade e companheirismo e à Murilo Pedreira pelo apoio e amizade.

Agradeço aos geofísicos Josias José da Silva e Márcio A. Martins pelas discussões e contribuições neste trabalho.

Aos examinadores da banca por suas importantes correções, revisões e contribuições para a elaboração do documento final.

Enfim, agradeço a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, sem eles, a caminhada seria muito mais árdua.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DA VARIAÇÃO DE AMPLITUDES COM O ÂNGULO (AVA) ATRAVÉS DO EMPREGO DE DIFERENTES FORMAS DE EXTRAPOLAÇÃO NAS IMAGES ORIUNDAS DA MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO

Ana Paula dos Santos da Silva

Maio/2009

Orientador: Luiz Landau
André Bulcão

Programa: Engenharia Civil

A dependência da refletividade com o ângulo de um reservatório é um atributo crucial para a caracterização do mesmo. Uma migração em profundidade antes de empilhamento deve ser capaz de produzir não apenas uma imagem estrutural com acurácia, mas também informações confiáveis de dependência com o ângulo. A proposta deste trabalho é apresentar os resultados de uma investigação de como diferentes formas de implementação da equação da onda podem influenciar a amplitude da seção migrada na extrapolação do campo de ondas na abordagem da Migração Reversa no Tempo (RTM). Estas amplitudes são empregadas para a realização de uma análise de sua variação em relação ao ângulo de incidência da energia em um determinado refletor, denominada função AVA (*Amplitude versus Angle*), obtendo-se informações importantes para a caracterização dos coeficientes de reflexão de uma interface em sub-superfície. Os resultados encontrados mostram que a Migração Reversa no Tempo com as implementações realizadas geram gráficos de amplitude condizentes com os coeficientes de reflexão teóricos e, desta forma, podem ser utilizados para análises de AVA.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF THE VARIATION AMPLITUDE VERSUS ANGLE (AVA) THROUGH THE USAGE OF DIFFERENT EXTRAPOLATION WAYS IN ITS NATURAL REVERSE TIME MIGRATION IMAGES

Ana Paula dos Santos da Silva

May/2009

Advisors: Luiz Landau
André Bulcão

Department: Civil Engineering

The angle dependent reflectivity of a reservoir target is a crucial input for reservoir characterization. A pre-stack depth migration should be able to produce not only an accurate structural image, but also reliable angle-dependent information. The propose of this work is to present the results of an investigation about how different wave equation implementations can influence the amplitudes of a migrated section in the wave field extrapolation by means of Reverse Time Migration (RTM) approach. These amplitudes are employed in order to perform an analysis of their variations with respect to the incidence angle on a specific reflector(AVA - Amplitude versus Angle), resulting in important information for the reflection coefficients characterization of an interface in sub-surface. The results showed that performing the Reverse Time Migration method with different implementations described in this work to generate plots related to theoretical reflection coefficients and, therefore, these plots can be used in the AVA analysis.

Índice

Capítulo I Introdução **1**

1.1 Metodologias e Objetivos 5
1.2 Estrutura da Dissertação 6

Capítulo II Modelagem Sísmica **9**

2.1 Equação Acústica da Onda 12
2.1.1 Formulação em Termos de Pressão 13
2.1.2 Formulação em Termos de Deslocamento 16
2.2 Equação Acústica Não Reflexiva da onda 19
2.3 Decomposição Direcional do Campo de Ondas 22
2.3.1 Método de Separação do Campo de Ondas 23

Capítulo III Migração Sísmica **27**

3.1 Introdução 27
3.2 Migração Reversa no Tempo 31
3.2.1 Condição de Imagem de Tempo de Excitação 33
3.3 Análise de AVO e AVA 37
3.3.1 Coeficientes de Reflexão e Impedância Acústica 38

Capítulo IV Aplicações Numéricas **44**

4.1 Modelo SEG/EAGE com Domo de Sal 45
4.2 Modelo com Duas Camadas Paralelas 51
4.3 Modelo com Cinco Camadas Paralelas 58

Capítulo V Conclusão **73**

5.1 Resultados 73
5.2 Trabalhos futuros 74

Referências Bibliográficas 77

Apêndice 1 Modelagem em Diferenças Finitas 82

A.1.1 Modelagem Acústica 83
A.1.2 Condições de Estabilidade e Dispersão Numérica 88

Capítulo 1

Introdução

Um grande desafio para a Indústria do Petróleo, atualmente, é o de encontrar reservas de hidrocarbonetos em estruturas cada vez mais complexas. Por este motivo, nas últimas décadas, as atividades de exploração tem tido um papel fundamental na descoberta de novas reservas petrolíferas, sendo uma atividade estratégica da cadeia produtiva.

Uma das principais ferramentas de exploração utilizadas na prospecção petrolífera é a sísmica de reflexão, que faz o mapeamento de estruturas em sub-superfície. Tal método se baseia na propagação de ondas sísmicas em sub-superfície e é responsável por mais de 90% dos investimentos em prospecção [THOMAS, 2001]. Através de levantamentos sísmicos é possível se obter informações importantes à respeito de estruturas geológicas em sub-superfície e seu principal objetivo é o de encontrar reservatórios de óleo e gás através das propriedades reflexivas das rochas no interior da Terra.

Na aquisição sísmica uma frente de ondas é gerada na superfície através de uma fonte artificial e se propaga nas camadas inferiores. Normalmente, em levantamentos terrestres as fontes utilizadas podem ser explosivos ou vibradores (*vibroseis)* e no caso marítimo utilizam-se canhões de ar comprimido. A onda sísmica se propaga no interior da Terra e ao encontrar uma determinada interface com contraste de *impedância acústica*[1], parte da onda se reflete e parte se refrata. A onda refletida retorna à superfície e os receptores, chamados geofones em terra e hidrofones em mar, registram a sua chegada. Os tempos de chegada de cada reflexão são relacionados às velocidades de propagação de ondas sísmicas em cada camada, e em primeira aproximação, a

[1] Produto da velocidade de propagação da onda P pela densidade do material [DUARTE, 2003]

amplitude registrada está relacionada ao contraste de impedância acústica. Apresenta-se na figura 1.1 um esquema simplificado de como essas ondas se propagam na sub-superfície em uma aquisição marítima (*offshore*) e em uma em terra (*onshore*).

Após uma seqüência de processamentos, o resultado de um levantamento sísmico pode ser apresentado na forma de uma seção transversal em que as imagens estruturais de sub-superfície serão analisadas e interpretadas.

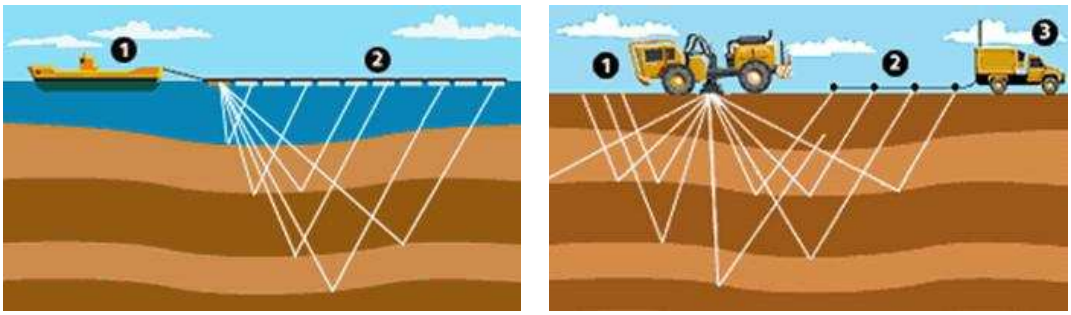


Figura 1.1 – Esquema para exemplificar como as ondas sísmicas se propagam nas camadas da sub superfície. Aquisição marítima (*offshore)* e em terra (*onshore*).

A exigência da Indústria do Petróleo da crescente otimização de investimentos tem conduzido cientistas ligados a essa área a desenvolverem técnicas de exploração que utilizam cada vez mais estudos detalhados sobre modelos, os quais tentam aproximar ao máximo as características do problema real. Assim o uso destas técnicas tornou-se comum tanto na Indústria do Petróleo quanto nos centros de pesquisa.

Dentre as inúmeras técnicas geofísicas utilizadas pela Indústria Petrolífera, destacam-se, no campo de geofísica aplicada, as modelagens numéricas de propagação de ondas sísmicas em modelos discretos, que simulam a propagação de ondas em meios com diferentes velocidades. Existem diferentes modelos matemáticos que podem ser adotados para simular o fenômeno físico de propagação de ondas sísmicas. A modelagem sísmica mais comumente utilizada, é baseada na equação escalar ou na equação elástica da onda e pode produzir sismogramas sintéticos, que podem ser utilizados como dados sintéticos de entrada para testar processos de migração, ou outras etapas do processamento sísmico.

Vista como solução do problema direto na metodologia sísmica, a modelagem sísmica numérica, simulando os efeitos de propagação do campo de ondas sobre um determinado modelo geológico, pode ser empregada, principalmente para: geração de dados sísmicos sintéticos; avaliação das possibilidades, limitações e armadilhas de um dado modelo geológico; formulação da inversão sísmica não-linear; processos de migração; geração de dados para testes em algoritmos de processamento e otimização dos parâmetros de aquisição.

Nos levantamentos sísmicos, os dados sísmicos são registrados ao longo da superfície de aquisição e são compostos por reflexões e difrações do sinal sísmico, gerados por uma fonte de energia. Mas devido à absorção, parte da energia gerada pela fonte ao se propagar é convertida em outro modo de energia. Durante a fase de processamento, pode-se empregar a etapa denominada de migração sísmica que visa corrigir os efeitos ocorridos durante a propagação. A migração colapsa as reflexões colocando-as em suas posições originárias e assim obtêm-se imagens dos refletores e difratores corretamente posicionados em sub-superficie, através da extrapolação do campo de ondas registrado.

O processo de migração consiste em desfazer os efeitos da propagação do campo de ondas registrado com o objetivo de produzir uma imagem da sub-superfície [GRAY *et. al*, 2001]. A modelagem e a migração sísmica podem ser consideradas operações inversas, e muitos métodos de migração foram desenvolvidos utilizando esse fato. Desta forma, a migração tem como objetivos principais: melhorar a interpretabilidade dos dados sísmicos; determinar corretamente o posicionamento das interfaces que delimitam as camadas de rocha; e fazer a verificação do modelo geológico. Por este motivo, a migração sísmica é uma importante ferramenta para a descoberta e desenvolvimento de reservatórios de hidrocarbonetos e desempenha um papel fundamental na interpretação e exploração sísmica.

O desafio em realizar exploração geofísica em áreas com alta complexidade geológica tem aumentado o interesse da Indústria Petrolífera no aprimoramento de técnicas de migração em profundidade. Dentre os diversos tipos de esquemas de migração em profundidade, a Migração Reversa no Tempo (RTM, do inglês *Reverse Time Migration*), que utiliza a discretização da equação completa da onda para extrapolar o campo de ondas, vêm sendo largamente utilizada. Historicamente (no único

da década de 80), a RTM foi considerado impraticável devido ao elevado custo computacional e a uma grande sensibilidade na velocidade e nos parâmetros de refletividade, mais do que outros métodos que empregam a denominada equação unidirecional da onda (o*ne-way wave equation)*, já estabelecidos. No entanto, com o aumento do desempenho computacional a migração RTM tornou-se uma opção viável no processamento sísmico. Este método foi descrito por BAYSAL *et al*. (1983), MCMECHAN (1983) e LOEWENTHAL & MUFTI (1983) e consiste basicamente em um problema de condição de contorno associado a uma denominada condição de imagem [SILVA, 2002].

A Migração Reversa no Tempo (RTM), utilizando a equação completa da onda, extrapola adequadamente o campo de onda em modelos de velocidades complexos, como no caso de modelos sub-sal e permite o imageamento de estruturas com mergulhos (*dips*) maiores que 70º. Em tais situações, os esquemas empregando a equação unidirecional da onda (*one-way wave equation*) apresentam restrições e limitações em relação a qualidade das imagens obtidas, devido ao tipo de equação empregada não representar adequadamente determinados tipos de ondas sísmicas [PINHEIRO, 2007].

Se além da imagem estrutural fornecida pelos métodos de migração em profundidade, também se tem interesse na determinação da função refletividade, com o objetivo de obter informações litológicas através de processos de inversão, as amplitudes sísmicas devem ser levadas em conta. A característica mais importante do processo de reflexão é sua dependência com o ângulo, ou seja, a quantidade de energia que é refletida em uma interface depende do ângulo de incidência do campo de ondas com, reação à normal do refletor [SILVA, 2009]. Especificamente, o estudo conhecido como análise da variação de amplitude em relação ao ângulo (AVA - *Amplitude versus Angle*) ou variação da amplitude em relação ao afastamento fonte-receptor (AVO - *Amplitude versus Offset*) permite determinar parâmetros físicos através de inversão de curvas de variação do coeficiente de reflexão com o ângulo em um ponto determinado do refletor.

Diversos trabalhos mostram aplicações de análises de AVA e AVO, dentre eles estão BURNETT (1989) que utilizou este tipo de análise para determinar a velocidade de *bright-spots*, SNYDER *et al* (1989) e OSTRANDER (1984) para avaliar saturação

de fluidos, YU (1985) e GELFAND (1986) como instrumento na interpretação estatigráfica, RESNICK *et al* (1987) destacaram os problemas da análise de AVO em estruturas inclinadas.

Continua sendo um desafio o desenvolvimento de técnicas de migração que forneçam amplitudes corretas para este tipo de análise após a migração [DENG & MCMECHAN, 2007] em meios estruturalmente complexos. Uma forma de estimar corretamente as amplitudes e, por conseqüência, os coeficientes de reflexão nas interfaces do modelo, é efetuar uma migração pré-empilhamento em verdadeira amplitude. Isto significa que, a distorção das amplitudes devido ao espalhamento geométrico ao longo do raio de reflexão é compensado pela operação de migração.

Neste trabalho, os dados sintéticos foram gerados através de técnicas de modelagem sísmica e migração RTM com aplicação de diferentes equações da onda neste processo, todos eles considerando o meio como sendo acústico. Para efeito de comparação entre as equações e verificação dos esquemas de migração utilizados, analisando se tais esquemas preservaram as amplitudes das imagens migradas, foi feita uma análise de AVA em modelos de camadas paralelas. Em tais modelos, devido a sua simplicidade geométrica, é possível obter soluções analíticas empregadas nas comparações realizadas.

1.1. Metodologia e Objetivos

Neste trabalho são apresentadas simulações numéricas envolvendo a propagação de ondas sísmicas, aplicando-se três modelos matemáticos distintos, todos eles considerando-se o meio como acústico, onde se contempla somente a propagação de ondas compressionais (*P-waves*).

Para o processo de modelagem utilizou-se a Equação Acústica da Onda em todas as simulações. Já para a obtenção da condição de imagem e para a extrapolação do campo de onda implementou-se três diferentes equações para efeito de comparação, a Equação Acústica da Onda, a Equação Acústica Não Reflexiva da Onda e um esquema de Separação do Campo de Ondas proposto por BULCÃO *et al* (2007). Para a obtenção

das soluções aproximadas referentes às equações diferenciais apresentadas no decorrer da dissertação, emprega-se o Método das Diferenças Finitas (MDF).

Os objetivos principais pretendidos com essas diferentes implementações são o de propiciar o imageamento de estruturas complexas em sub-superfície com melhor resolução sísmica e o de fazer um estudo de preservação de amplitudes na imagem migrada em modelos de velocidades simples com camadas plano-paralelas, pois migrações que produzem informação corretas de amplitude são um pré-requisito para análises de variação de amplitudes com o ângulo (AVA). Além disso buscou-se métodos que migrassem ondas retornantes (*Turning Waves*[2]) que são, em geral, aquelas associadas à reflexões nos flancos salinos. É importante a consideração da preservação das "*Turning Waves*" nas etapas do processamento que precedem a migração. A migração destas ondas pode se mostrar eficiente para o imageamento de seções com mergulho próximo a 90º. A direção de propagação deste tipo de ondas é alterada dentro do modelo devido à variações de impedância. Um exemplo de modelo em que ocorre esse fenômeno é onde existe um gradiente vertical de velocidade.

Com o intuito de avaliar a máxima distância entre fonte e receptor e o ângulo de incidência associado em determinado ponto sobre um refletor, foi feita uma simulação empregando a teoria dos raios (*Ray Tracing*, a qual adota considerações de alta freqüência, na qual a frente de onda pode ser tratada como um raio, de forma similar ao adotado em Ótica).

1.2. Estrutura da Dissertação

À seguir, expõe-se um resumo do conteúdo de cada um dos capítulos desta dissertação.

[2] *Turning waves* - são ondas que se propagam em um meio geológico onde a velocidade aumenta com a profundidade de forma contínua. Elas viajam por esse meio, dependendo do gradiente vertical de velocidade, alcançando um ponto onde ocorre uma mudança no sentido de propagação. Esse ponto é denominado *turning point* [ANDRADE, 2007]. Ou seja, são ondas retornantes, que costumam ocorrer em regiões com flancos salinos e gradiente vertical de velocidade.

No capítulo 1 foi exposta uma introdução geral sobre o método sísmico de reflexão e sobre os processos de modelagem e migração sísmicas, além dos objetivos do trabalho e estrutura da dissertação.

No capítulo 2, aborda-se o conceito de Modelagem Sísmica e apresentam-se as equações diferenciais adotadas nas simulações realizadas neste trabalho.

No capítulo 3, primeiramente se apresenta uma visão geral dos procedimentos adotados para transformar os campos de ondas registrados em imagens dos refletores corretamente posicionados em sub-superfície. Em Geofísica, este conjunto de procedimentos é denominado Migração Sísmica *(Seismic Migration).* Além disso, no início do capitulo é apresentado um breve histórico sobre os métodos de migração mais utilizados pela Indústria do Petróleo e em centros de pesquisa.

Em seguida, apresenta-se o esquema de migração adotado neste trabalho, denominado de Migração Reversa no Tempo (*RTM, Reverse Time Migration*). Neste esquema, utiliza-se para a obtenção da condição de imagem, necessária para este processo, a chamada Condição de Imagem de Tempo de Excitação (*Excitation-time Imaging Condition*) através de um critério proposto por BULCÃO (2004) que considera a amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra.

Ainda neste capítulo descreve-se o processo de análise da variação de amplitudes com o ângulo (AVA), fazendo também uma breve revisão sobre a teoria dos coeficientes de reflexão. A preservação das amplitudes na imagem migrada é de extrema importância para a identificação de parâmetros petrofísicos do meio. Uma forma de estimar corretamente as amplitudes e, por conseqüência, os coeficientes de reflexão nas interfaces do modelo em estudo, é efetuar uma migração pré-empilhamento em amplitude verdadeira, onde a distorção das amplitudes devido ao espalhamento geométrico ao longo do raio de reflexão é compensada pela operação de migração [VASQUEZ *et al*, 2003].

No capítulo 4 estão agrupadas as análises realizadas, empregando-se os esquemas de modelagem e migração sísmica abordados nesta dissertação. No processo de Migração Sísmica foram utilizados dados sísmicos sintéticos obtidos à partir da modelagem numérica utilizando a Equação Acústica da Onda. Para a obtenção da condição de imagem e para a migração foram utilizadas a Equação Acústica da Onda, a

Equação Acústica Não Reflexiva da Onda e a Equação Acústica da Onda com um Esquema de Separação do Campo de Ondas.

No capítulo 5, apresentam-se as conclusões e alguns comentários acerca deste trabalho, além de propostas para trabalhos futuros, envolvendo principalmente a Modelagem e Migração Sísmica empregando outros esquemas de Modelagem e Migração Reversa no Tempo.

Ao final do texto descreve-se em um apêndice o processo de modelagem acústica por Diferenças Finitas, mostrando as expressões utilizadas para as aproximações das derivadas das equações diferenciais em vários graus de aproximação e as condições de estabilidade e de redução da dispersão numérica.

Capítulo 2

Modelagem Sísmica

A modelagem sísmica em meios complexos tem sido uma ferramenta muito utilizada pela Indústria Petrolífera para a geração de dados sísmicos sintéticos. As técnicas de modelagem são empregadas, na geofísica, para o entendimento da assinatura sísmica dos modelos geológicos que são de interesse para a exploração e produção de hidrocarbonetos. Além desse fato, as simulações numéricas têm um importante papel no teste de novas tecnologias, avaliando assim se são mais adequadas em determinada situação. Através de simulações numéricas em modelos com características geológicas semelhantes aos modelos reais é possível determinar se uma estratégia de imageamento é mais eficiente, fazendo a comparação da seção sísmica obtida com o modelo geológico conhecido.

O processo de modelagem sísmica é fundamentado no princípio de propagação de ondas. A propagação de ondas é o mecanismo pelo qual a energia é transmitida através do meio de propagação. No caso da consideração de propagação de ondas acústicas o som pode ser utilizado como exemplo e, por sua vez, pode ser definido como uma variação de pressão do meio. A forma de propagação é dependente de diversos fatores, tais como a velocidade de propagação do som e propriedades físicas constituintes do meio.

Os meios de propagação podem ser sólidos, líquidos, gasosos, ou uma mistura deles. Durante o movimento de propagação, a onda acústica, sob a influência de uma série de fatores, pode ter seu comportamento e intensidade de energia modificados. Tais fatores estão relacionados às propriedades reflexivas e transmissivas dos diferentes materiais que compõe o meio [BLACKSTOCK, 2000].

O meio de propagação da onda, por sua vez, pode ser tratado como acústico, elástico, visco-elástico, poro-elástico, dentre outros. Assim, a modelagem da

propagação de ondas constitui uma ferramenta de investigação de vital importância na geração e previsão de dados sísmicos.

Diversos métodos matemáticos, aplicados à resolução de equações diferenciais parciais, podem ser utilizados com o propósito de simular a propagação de ondas sísmicas em meios complexos. Na maior parte dos casos não é possível se obter soluções analíticas, devido à complexidade do meio e às condições de contorno consideradas. Por este motivo, são utilizadas soluções aproximadas através de métodos numéricos. Outra vantagem da análise numérica é que ela facilita que se efetuem mudanças nos parâmetros do problema.

Os métodos numéricos são baseados no conceito de discretização de equações matemáticas. Através da discretização, um modelo matemático contínuo é transformado em um modelo discreto formado por um grupo de pontos que representam o meio contínuo.

Os métodos numéricos, desenvolvidos atualmente, que têm maior aplicação em problemas de Engenharia e Geofísica são os métodos: das Diferenças Finitas (MDF), dos Elementos Finitos (MEF), Método dos Elementos de Contorno (MEC) e Método dos Volumes Finitos (MVF) [BULCÃO, 2004].

Neste trabalho utiliza-se o Método das Diferenças Finitas para a discretização do modelo matemático. Este processo é um dos mais utilizados dentre os diversos métodos de aproximação para solução da equação da onda em problemas de sísmica de reflexão. O método não apresenta restrições quanto a distribuição que caracteriza o meio e não se baseia em soluções particulares. No Apêndice A, este método é apresentado para o caso da modelagem sísmica empregando a equação acústica da onda (considerando apenas a propagação de ondas compressionais) e são mostradas as discretizações em diferenças finitas para as derivadas parciais da equação da onda em diferentes graus de aproximação.

A simulação de problemas contendo domínios infinitos ou semi-infinitos, como é o caso da modelagem geofísica de ondas sísmicas, requer a utilização de artifícios especiais na maioria dos métodos numéricos. Como exemplo de tais artifícios tem-se a aplicação de condições de contorno não reflexivas, o acoplamento de diferentes

métodos numéricos e a aplicação de operadores especiais, dentre outros [BULCÃO,2004].

A não utilização destes artifícios torna o custo computacional elevado devido ao fato de as bordas do modelo numérico terem que estar suficientemente distantes para que as ondas refletidas nestas bordas artificiais não alcancem a região de interesse do modelo no tempo considerado.

Na literatura existem diversas alternativas propostas para lidar com esta questão de bordas do modelo numérico de modo a dissipar as ondas refletidas nelas durante a simulação de problemas com domínios infinitos ou semi-infinitos. Dentre elas estão as condições de contorno não-reflexivas, que são denominações dadas a diferentes tipos de condições de contorno que tem como objetivo fazer com que a frente de onda não seja refletida nas bordas artificiais do modelo. Para atingir este objetivo, neste trabalho, foram aplicadas condições de contorno não reflexivas propostas por [CERJAN, 1985] e [REYNOLDS, 1978]. Estas condições foram aplicadas sobre uma camada de amortecimento (*Damping Zones*) [BORDING & LINES, 1997] no modelo, onde impõe-se em determinada região que antecede as bordas artificiais do modelo um amortecimento fictício que reduzirá as amplitudes. Neste esquema impõe-se bordas artificiais para que possam ser aplicadas as condições não reflexivas sem afetar informações importantes do modelo. Estas técnicas, utilizadas juntas se mostraram eficazes no tratamento das bordas.

Em aplicações de modelagens numéricas em geofísica voltadas para a Indústria do Petróleo, geralmente, empregam-se dois tipos de modelos matemáticos, o acústico e o elástico. No caso da utilização de um modelo acústico o fenômeno físico de propagação de ondas sísmicas é regido e modelado através da Equação Acústica da Onda, onde consideram-se apenas a propagação de ondas compressionais (*P-waves*) ao longo do modelo. E no caso da utilização de operadores elásticos, a equação implementada na modelagem é a chamada Equação de Navier ou Equação Elástica da Onda, onde se considera a propagação de ondas compressionais (*P-waves*) e cisalhantes (*S-waves*), bem como as interações entre elas.

Na etapa de modelagem nesta dissertação foi utilizada a equação acústica da onda para a extrapolação do campo de ondas, pois apesar da simplicidade de um modelo baseado apenas na propagação de ondas compressionais consegue-se resultados

satisfatórios em problemas geofísicos aplicados na Indústria Petrolífera com menor custo computacional do que a modelagem elástica.

O objetivo principal das modelagens sísmicas realizadas foi fornecer dados sísmicos sintéticos, que serão empregados como dados de entrada para os processos de Migração Reversa no Tempo desenvolvidos.

Nas etapa de Migração Reversa no Tempo foram aplicadas diferentes equações para meios acústicos em se tratando de simplificações e hipóteses a partir da equação completa da onda. A primeira hipótese utilizada foi a Equação Acústica da Onda em que se considera a densidade do meio constante, a segunda foi a denominada Equação Acústica Não reflexiva da Onda em que as considerações à respeito da mesma são baseadas na hipótese que os meios estudados possuem a impedância constante. O último esquema utilizado foi a Equação Acústica da Onda com a separação do campo de ondas em suas componentes descendente e ascendente, onde utilizou-se somente a componente descendente.

Nas próximas sessões explicam-se em detalhes as diversas equações da onda utilizadas neste trabalho.

2.1 Equação Acústica da Onda

Em problemas geofísicos de propagação de onda, geralmente, assume-se que o meio físico seja regido pela Equação Acústica da Onda, onde se consideram apenas ondas compressionais (*P-waves*). A equação da onda acústica é uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem.

Esta equação pode ser desenvolvida utilizando dois tipos de formulação, uma em termos de pressão e outra em termos de deslocamento da partícula, que serão apresentadas nas seções 2.1.1 e 2.1.2, a seguir.

2.1.1 Formulação em Termos de Pressão

O algoritmo desenvolvido neste trabalho para as modelagens é baseado no método das diferenças finitas aplicado à equação acústica da onda, assumindo que a Terra se comporta como um meio acústico. Para os objetivos pretendidos neste trabalho implementou-se numericamente uma modelagem sísmica empregando malhas regulares em modelos que representam meios geológicos bidimensionais. As derivadas segundas presentes na equação da onda foram obtidas por expansões da série de Taylor de décima ordem, para o caso espacial, e de segunda, para o temporal (ver apêndice A).

Para a simulação da propagação de ondas acústicas em sub-superficíe, geralmente, é utilizada uma equação diferencial da onda em duas dimensões, que representa o comportamento do campo de ondas acústico com variações no espaço e no tempo, considerando a densidade do meio constante.

Esta equação é chamada de Equação Acústica da onda e pode ser deduzida baseada na teoria da elasticidade, onde a lei de Hooke estabelece uma relação entre pressão e variação volumétrica [SILVA, 1995]:

$$P = -k(\nabla . \vec{\boldsymbol{u}}), \tag{2.1.1}$$

onde P = P(x,z,t) é a variação de pressão em relação à pressão ambiente, k = k(x,z) é o módulo de elasticidade do meio e $\vec{\boldsymbol{u}} = \vec{\boldsymbol{u}}\,(x, z, t)$ é o vetor deslocamento da partícula.

Pode-se relacionar a variação da pressão com a aceleração da partícula através da segunda lei de Newton:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{\boldsymbol{u}} = -\nabla P, \tag{2.1.2}$$

onde ρ = ρ(x,z,t) é a densidade do meio. Derivando-se a expressão (2.1.1) em relação ao tempo, tem-se que:

$$\frac{\partial}{\partial t}P = \frac{\partial}{\partial t}[-k(\nabla.\vec{\boldsymbol{u}})], \tag{2.1.3}$$

derivando-se a expressão (2.1.3) novamente em relação ao tempo e considerando-se k constante, tem-se que:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = -k\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2}(\nabla.\vec{\boldsymbol{u}})\right]. \tag{2.1.4}$$

Invertendo-se os operadores de derivação, a equação (2.1.4) fica:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = -k\left[\nabla.\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{\boldsymbol{u}}\right)\right]. \tag{2.1.5}$$

Sendo que pode-se substituir a segunda lei de Newton, representada pela equação (2.1.2) na expressão (2.1.5), obtendo-se:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = -k\left[\nabla.\left(-\frac{1}{\rho}\nabla\rho\right)\right]. \tag{2.1.6}$$

Feito isso, pode-se eliminar o sinal de menos da expressão (2.1.6) e resolvê-la em termos do divergente. Através destas operações obtêm-se a equação (2.1.7):

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = k\left[\nabla\left(\frac{1}{\rho}\right).\nabla\mathrm{P} + \frac{1}{\rho}\nabla.\nabla\mathrm{P}\right]. \tag{2.1.7}$$

Sendo que, pela lei de Leibniz, o gradiente de 1/ρ é dado pela expressão (2.1.8):

$$\nabla\left(\frac{1}{\rho}\right) = -\frac{\nabla\rho}{\rho^2}\,. \tag{2.1.8}$$

Substituindo a equação (2.1.8) na expressão (2.1.7), tem-se que:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = k\left[-\frac{\nabla\rho}{\rho^2}\,.\nabla P + \frac{1}{\rho}\nabla.\nabla P\right]\ . \tag{2.1.9}$$

Fazendo o módulo de elasticidade k = ρc^2 e substituindo na equação (2.1.9), obtêm-se a expressão (2.1.10) abaixo:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = \rho c^2\left[-\frac{\nabla\rho}{\rho^2}\,.\nabla \mathrm{P} + \frac{1}{\rho}\nabla.\nabla P\right]\ . \tag{2.1.10}$$

Eliminando-se os termos comuns e reorganizando a equação (2.1.10), têm-se que:

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}P = \left[-\frac{\nabla\rho}{\rho}\,.\nabla \mathrm{P} + \nabla.\nabla P\right]\ . \tag{2.1.11}$$

Sendo que $\nabla.\nabla P = \nabla^2 P$, pode-se substituir esta expressão na equação (2.1.11) e reorganizá-la, obtendo-se a equação (2.1.12), abaixo:

$$\nabla^2 P\ -\ \frac{1}{\rho}\nabla\rho.\nabla P = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}\,. \tag{2.1.12}$$

Considerando-se a densidade constante, o segundo termo da equação (2.1.12) torna-se nulo. Logo, tem-se que a equação (2.1.12) se transforma na equação (2.1.13), que é a Equação Acústica da Onda com densidade constante em duas dimensões.

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \ . \tag{2.1.13}$$

Desenvolvendo-se o laplaciano e reorganizando a equação (2.1.13), obtêm-se a expressão (2.1.13), abaixo:

$$\frac{1}{c^2}\ \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial z^2}. \tag{2.1.14}$$

onde *P(x,z,t)* é o campo de pressão da onda, *x* e *z* são as coordenadas espaciais, *t* é a coordenada temporal e *c* é a velocidade de propagação no meio.

Organizada desta forma, e com a aplicação de uma fonte para gerar o pulso sísmico, que com a solução das equações, será propagado no modelo, a equação será discretizada em diferenças finitas, o que permitirá a simulação da propagação do campo de pressão no modelo à medida que os passos de tempo sejam incrementados. Esta equação foi implementada em todas as modelagens realizadas neste trabalho e em alguns processos de Migração para efeito de comparação com as outras equações implementadas.

O processo de discretização em diferenças finitas e modelagem computacional é explicado em detalhes no apêndice A no final desta dissertação.

2.1.2 Formulação em Termos de Deslocamento

A Equação Acústica da Onda (2.1.14) também pode ser formulada em termos do deslocamento das partículas. Esta formulação pode ser desenvolvida através de simplificações da Equação de Navier para meios elásticos. Desta forma, tem-se que as equações para um sólido elástico, homogêneo e isotrópico podem ser sumarizadas em notação tensorial cartesiana pelas expressões (2.1.15) [GRAFF, 1975]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \tau_{ij,j} + \rho f_i$$

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_{\mathrm{kk}}\, \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \qquad (2.1.15)$$

$$\omega = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} - u_{j,i}\right),$$

onde:

u_i representa o vetor de deslocamentos de um ponto meio;

τ_{ij} representa o tensor de tensões. Esse tensor é considerado simétrico, ou seja, $\tau_{ij} = \tau_{ji}$;

ε_{ij} e ω_{ij} representam, respectivamente, os tensores de deformação e de rotação;

δ_{ij} representa a função Delta de Kronecker[3];

ρ expressa a densidade por unidade de volume;

f_i representa um vetor contendo as forças por unidade de massa do meio;

λ e μ são as constantes elásticas do meio, denominadas constantes de Lamè.

As equações governantes em termos dos deslocamentos são obtidas substituindo a expressão para a tensão na relação tensão-deformação (2.1.15). Estas substituições resultam nas *equações de movimento*, chamadas de equações de *Navier*, representadas pela expressão (2.1.16) :

$$(\lambda + \mu) u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i. \qquad (2.1.16)$$

A expressão vetorial equivalente à equação (2.1.16) é dada por:

[3] $\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, para\ i = j \\ 0, para\ i \neq j \end{cases}$

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2\mathbf{u} + \rho\mathbf{f} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \,. \tag{2.1.17}$$

Desconsiderando-se as forças por unidade de massa do material, representadas por **f**, tem-se que:

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2\mathbf{u} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad . \tag{2.1.18}$$

Definindo-se a dilatação do material como:

$$\Delta = \nabla.\vec{\boldsymbol{u}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_{kk} \quad . \tag{2.1.19}$$

A equação (2.1.18) pode ser escrita como:

$$(\lambda + \mu)\nabla\Delta + \mu\nabla^2\mathbf{u} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \quad . \tag{2.1.20}$$

Para o meio acústico pode-se considerar μ = 0, pois esta constante representa o módulo de cisalhamento, que não existe em meios acústicos. Desta forma obtém-se a equação (2.1.21), em termos do deslocamento:

$$\lambda\nabla^2\mathbf{u} = \rho\ddot{\mathbf{u}} \ . \tag{2.1.21}$$

Desenvolvendo-se esta equação para duas dimensões, tem-se que:

$$\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\lambda}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \ , \tag{2.1.22}$$

onde a velocidade de propagação c é dada por:

$$c = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \quad . \tag{2.1.23}$$

Logo, a equação (2.1.22) se torna:

$$\frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \,. \tag{2.1.24}$$

A equação (2.1.24) é a Equação Acústica da Onda.

2.2 Equação Acústica Não Reflexiva da onda

Um dos métodos utilizados, neste trabalho, para o cálculo do tempo de trânsito da onda direta e para a migração é baseado na chamada equação acústica da onda não-reflexiva em duas dimensões. Esta equação produz uma redução no coeficiente de reflexão efetivo das camadas do modelo de velocidades. Para regiões homogêneas do modelo esta equação fica equivalente à equação acústica da onda. Entretanto, quando se propaga de um meio para outro, o coeficiente de reflexão efetivo para uma incidência normal é zero e para outros ângulos é pequeno [BAYSAL, 1984].

O uso da equação não-reflexiva da onda fornece um ótimo resultado para a migração de "*Turning Waves*" devido a redução do coeficiente de reflexão efetivo, como mostrado por BAYSAL *et al*. (1984). É importante a consideração da preservação das "*Turning Waves*" nas etapas do processamento que precedem a migração. A migração dessas ondas pode se mostrar eficiente para o imageamento de seções com mergulho próximo a 90º [SILVA, 1995].

Existem, na literatura especializada, vários trabalhos que tem como objetivo melhorar a qualidade da imagem gerada na migração sísmica em estruturas próximas a flancos de sal e à corpos de sal utilizando *turning waves* [SILVA, 1995]. Devido à variações de impedância no modelo, esses tipos de ondas tem a direção de propagação alterada à medida que viajam através do modelo. Um exemplo de modelo em que ocorre esse fenômeno é um modelo onde existe um acréscimo linear da velocidade com o aumento da profundidade (característico de modelos geológicos encontrados no Golfo do México).

A equação não-reflexiva da onda é uma modificação da equação acústica da onda onde a impedância é constante ao longo de todo o modelo. Esta modificação na

equação acústica da onda reduz as múltiplas reflexões, que são artefatos indesejáveis no processo de migração [CARCIONE, 2003].

Assumindo a impedância constante ao longo de todo o modelo, a equação acústica da onda fica [BAYSAL, 1984]:

$$c\frac{\partial}{\partial x}\left(c\frac{\partial P}{\partial x}\right)+c\frac{\partial}{\partial z}\left(c\frac{\partial P}{\partial z}\right)=\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}\,. \tag{2.2.1}$$

Aplicando a regra da cadeia a equação (2.2.1) se torna:

$$c\left(\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\partial P}{\partial x}+c\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}\right)+c\left(\frac{\partial c}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial z}+c\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)=\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}. \tag{2.2.2}$$

A seguir, separam-se os termos com derivadas de primeira ordem dos termos com derivada de segunda ordem, e se obtém a equação (2.2.3), abaixo:

$$c\left(\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial c}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial z}\right)+c\left(c\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+c\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)=\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}. \tag{2.2.3}$$

Dividindo os dois lados da equação por c^2 tem-se que:

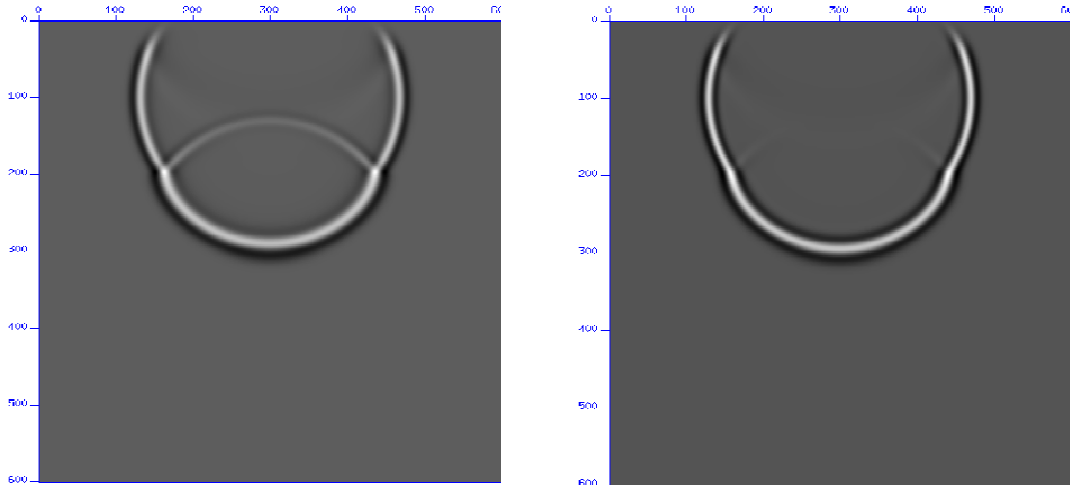
$$\frac{1}{c}\left(\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial c}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial z}\right)+\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}\,. \tag{2.2.4}$$

Reorganizando a equação (2.2.4) e aplicando o termo fonte, obtém-se a equação (2.2.5), abaixo:

$$\frac{1}{c}\left(\frac{\partial c}{\partial x}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\partial c}{\partial z}\frac{\partial P}{\partial z}\right)+\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}\right)-\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P}{\partial t^2}=f(t)\delta\left(x-x_f\right)\delta\left(z-z_f\right). \quad (2.2.5)$$

A equação (2.2.5) é a equação acústica não-reflexiva da onda. Nota-se que esta equação possui um termo a mais que a equação acústica da onda. Este termo é discretizado em quarta ordem de aproximação e adicionado na equação acústica da onda nos processos de cálculo da matriz de tempo de trânsito e de migração (ver discretização de quarta ordem no apêndice A.1).

Foi realizada uma simulação da propagação do campo de ondas com a Equação Acústica da Onda e com a Equação Acústica Não Reflexiva da Onda em um modelo simples de camadas plano paralelas com o propósito de verificar o efeito de redução da amplitude das reflexões no campo de ondas. As figuras 2.2.1 a e b mostram o *snapshot* do campo de ondas propagado com a equação acústica da onda (*two way wave equation*) e o *snapshot* do campo de ondas propagado com a equação não-reflexiva da onda (*two way nonreflecting wave equation).* O modelo utilizado para esta propagação é um modelo de duas camadas paralelas de dimensões x igual à 3600 m e z igual à 3600 m, com um refletor posicionado em z igual à 1200 metros e espaçamento da malha igual a 6m. A fonte utilizada foi uma fonte Ricker, proposta por CUNHA (1997) com freqüência de 45Hz.



(a) (b)

Figura 2.2.1- Propagação do campo de onda utilizando a equação acústica da onda (a) e com a equação acústica não reflexiva da onda (b) em um modelo de duas camadas paralelas.

Analisando a figura 2.2.1 (a) e (b) , nota-se que o coeficiente de reflexão efetivo para a equação da onda não-reflexiva é bem mais baixo que o para a equação acústica da onda, o que levará a redução dos artefatos no processo de migração.

2.3 Decomposição Direcional do Campo de Ondas

Esquemas de separação dos campos de onda ascendente e descendente se mostraram eficientes no aprimoramento da qualidade da imagem de sub-superfície em modelos de geometria complexa.

No presente trabalho, foi aplicada uma técnica de separação do campo de ondas com o objetivo de fazer a verificação da preservação de amplitudes na seção migrada através deste método. A técnica utilizada é um novo esquema proposto por BULCÃO *et al* (2007).

2.3.1 Esquema de separação do campo de ondas proposto por BULCÃO *et al* (2007)

Neste esquema, em cada passo de tempo, aplica-se no campo de ondas acústico um esquema para efetivar a separação do campo de ondas nas direções ascendente e descendente. Como resultado, caso seja aplicado na direção descendente, a maior parte da energia que viaja na direção ascendente é eliminada, restando apenas a energia na direção descendente.

Esta metodologia de separação do campo de onda é comumente utilizada em problemas eletromagnéticos, e se mostrou eficiente quando aplicada no cálculo da matriz de tempo de trânsito e na migração sísmica [BULCÃO, 2007].

Neste esquema, a equação (2.3.1) é utilizada para efetivar a separação direcional do campo de ondas na direção descendente. O ponto é utilizado para representar a derivada temporal.

$$\dot{u}^{-} = \frac{1}{2}\left(\dot{u} - c u_{,j}\right) \quad , \qquad (2.3.1)$$

onde: u é o campo de onda acústico, c é a velocidade de propagação e u^{-} representa o campo de onda na direção descendente.

Para a obtenção do campo de onda ascendente a expressão é análoga, apenas substituindo o sinal negativo pelo positivo.

Integrando-se temporalmente a expressão 2.3.1 para os dois campos de onda (descendente e ascendente), empregando-se o mais simples dos esquemas de integração numérica, no qual aproxima-se o valor da integral considerando as áreas formadas pelos retângulos dos valores da abscissas e o intervalo de amostragem Δt, obtém-se as expressões 2.3.2 e 2.3.3.

Tal esquema de integração numérica, apesar de sua simplicidade, fornece resultados satisfatórios, pois emprega-se o intervalo de tempo considerado para o avanço da solução numérica da equação da onda.

A expressão 2.3.2 representa o campo de ondas na direção descendente e a equação 2.3.3 representa o campo de ondas na direção ascendente:

$$U_{desc}(i,j) = U_{desc}(i,j) + \left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u(i,j)}{\partial t} - c\frac{\partial u(i,j)}{\partial z}\right)\right] \times \Delta t \ . \qquad (2.3.2)$$

$$U_{asc}(i,j) = U_{asc}(i,j) + \left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u(i,j)}{\partial t} + c\frac{\partial u(i,j)}{\partial z}\right)\right] \times \Delta t \ , \qquad (2.3.3)$$

onde $U_{desc}(i,j)$ é o campo de ondas na direção descendente, $U_{asc}(i,j)$ é o campo de ondas na direção ascendente, $\frac{\partial u(i,j)}{\partial t}$ é a derivada parcial do campo de onda acústico em relação ao tempo e $\frac{\partial u(i,j)}{\partial z}$ é derivada parcial do campo de onda acústico em relação à coordenada z.

Neste trabalho, as derivadas temporais (∂u(i,j)/∂t) foram discretizadas com aproximação em segunda ordem e paras as derivadas espaciais (∂u(i,j)/∂z) a discretização realizada foi com uma aproximação em quarta ordem. Ver no apêndice A as discretizações nas ordem mencionadas.

Na figura 2.3.1 observa-se um esquema da propagação do campo de ondas e sua separação na direção descendente representada pelas setas vermelhas. Quando considera-se apenas a separação nesta direção não são levadas em conta as ondas que viajam lateralmente pelo modelo.

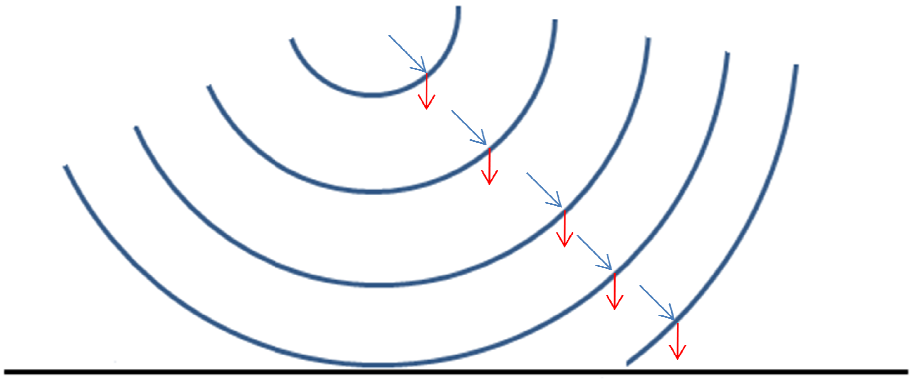


Figura 2.3.1 Propagação do campo de ondas e sua separação na direção descendente.

Foi realizada uma simulação em modelo homogêneo com o intuito de testar a eficiência do método para separar os campos de ondas. A figura 2.3.2 mostra a propagação dos campo de ondas ascendente e descendente no modelo homogêneo, com a fonte localizada no centro do modelo.

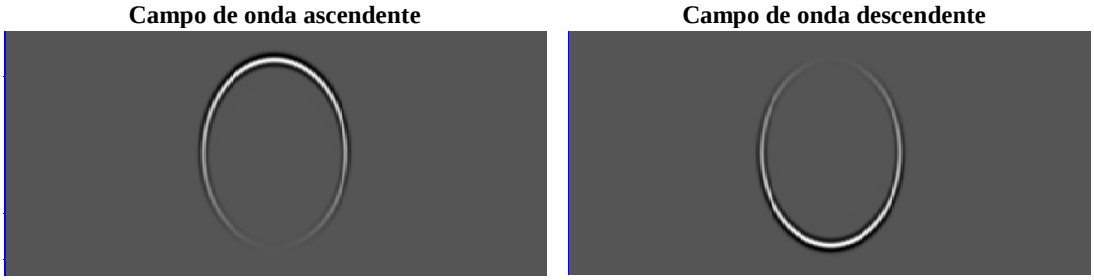


Figura 2.3.2 Campos de onda ascendente e descendente se propagando no interior de um modelo homogêneo com a fonte posicionada no centro do modelo.

Observando-se a figura (2.3.2) pode-se concluir que o método utilizado mostra-se eficiente na separação dos campos de ondas. Com este esquema é possível trabalhar com a proporção de energia do campo de ondas que realmente importa para a geração da imagem em profundidade.

Tal esquema pode ser modificado para considerar qualquer direção de propagação, não somente a direção ascendente e descendente, de forma a efetivar a

separação direcional do campo de ondas na direção que realmente pode vir a contribuir para o imageamento sísmico.

Capítulo 3

Migração Sísmica

Nas próximas seções será explicado o processo de migração sísmica e seus principais objetivos, será feito um breve histórico sobre os processos de migração mais utilizados pela Indústria do Petróleo e como é realizado o processo de Migração Reversa no Tempo. Também será explicado o que é, e como é feita, uma análise de ângulo *versus* amplitude (AVA).

3.1 Introdução

Migração Sísmica é o processo que tem como objetivo transformar as informações registradas em sismogramas em imagens geológicas das camadas da sub-superfície. Segundo BULCÃO (2004):

Em Geofísica, define-se Migração Sísmica como sendo um conjunto de procedimentos nos quais os campos de ondas registrados (sendo na superfície ou não), contendo as informações das camadas e interfaces do modelo geológico, são transformados, através de métodos adequados, em imagens corretamente posicionadas dos refletores em sub-superfície. Durante este processo, tem-se a extinção das difrações que são registradas nos sismogramas.

Sendo assim, a migração é uma ferramenta básica para o processamento e a interpretação sísmica e seu propósito é fornecer imagens representativas das estruturas geológicas na sub-superfície.

Existem - basicamente - dois tipos de migração sísmica, denominados migração em tempo e migração em profundidade. Essa classificação é feita em relação à escala vertical da imagem obtida.

Na migração em tempo, a escala vertical da imagem gerada, como o próprio nome já diz, está em tempo, não sendo possível determinar a real posição de um dado refletor em profundidade. Para isto, é preciso aplicar procedimentos para que os refletores sejam corretamente posicionados através de técnicas de conversão tempo-profundidade, fazendo com que a escala vertical em tempo se torne uma escala em profundidade. Este tipo de técnica leva em consideração o campo de velocidades e o tempo de trânsito até atingir um determinado refletor, que é obtido de forma direta através da imagem em tempo.

Na migração em profundidade a imagem dos refletores é gerada de tal forma que os refletores já encontram-se corretamente posicionados em profundidade. Desta forma, no processo de migração os dados registrados no domínio do tempo (x,t) são mapeados no domínio da profundidade (x,z) [FARIA, 1986].

Na migração em tempo o custo computacional geralmente é menor e em casos de modelos com variações laterais de velocidade apresenta limitações. Enquanto a migração em tempo focaliza a energia proveniente das estruturas geológicas em um determinado instante de tempo, a migração em profundidade também posiciona estas mesmas estruturas em sua correta localização [BULCÃO, 2004]. Por este motivo, apesar de terem maior custo computacional, alguns esquemas de migração em profundidade tem se mostrado bastante eficazes no imageamento sísmico por ser possível a utilização de modelo de velocidades com quaisquer tipos de variações. Enquadra-se neste caso a Migração Reversa no Tempo (RTM).

A migração sísmica em profundidade é uma das principais técnicas aplicadas no processamento de dados de sísmica de reflexão e tem como objetivos principais posicionar corretamente os refletores e colapsar as difrações, possibilitando assim uma melhor interpretabilidade dos dados sísmicos, além de fazer a verificação do modelo geológico. Em áreas onde o custo de perfuração é elevado a migração sísmica tem um papel importante na redução dos riscos e identificação dos alvos exploratórios.

No desenvolvimento da interpretação sismo-estratigráfica, a determinação de potencial de hidrocarbonetos a partir de medidas de amplitude e a delineação de reservatórios demandam uma boa qualidade das seções obtidas através do processamento sísmico. Para áreas geologicamente complexas a migração pré empilhamento é a mais indicada e, portanto, esta técnica se constitui numa ferramenta muito importante na localização de reservatórios [ALDUNATE *et al*, 2004].

Na literatura de processamento sísmico existe uma grande variedade de métodos que utilizam a equação da onda para o desenvolvimento de técnicas de migração. A indústria classifica os algoritmos de migração baseada nas considerações em suas formulações, no domínio de execução do algoritmo e no princípio de imageamento utilizado para criar a imagem migrada. Todos os métodos de migração resolvem uma equação da onda de forma aproximada, a equação que governa a propagação de ondas sísmicas no interior da Terra. Conhecendo a velocidade da onda na Terra e as mudanças de pressão em função do tempo, como o registrado em traços sísmicos, pode-se utilizar a equação da onda para calcular as variações de pressão em relação ao espaço [SAVA & HILL, 2009].

Existem várias técnicas de migração utilizadas amplamente pela indústria de petróleo, entre elas estão a migração Kirchhoff, as técnicas de migração no domínio da freqüência, como por exemplo, os métodos *Phase-Shift* e o *Phase-Shift Plus Interpolation* (PSPI), e a Migração Reversa no Tempo (RTM), que foi utilizada neste trabalho.

Os algoritmos de migração sísmica baseados na formulação integral de Kirchhoff podem ser derivados a partir da solução da equação da onda segundo a aproximação de Born ou segundo a aproximação assintótica da teoria dos raios. Em ambos os casos faz-se necessário a determinação da função de Green. Nesse contexto, podem ser referenciados os trabalhos de BLEISTEIN (1987), GOLDIN (1986) E SCHLEICHER *et al*. (1993). Este método é muito utilizado por ter menor custo computacional, entretanto, no caso de estruturas geológicas complexas, como intrusões salinas, por exemplo, os métodos de migração do tipo Kirchhoff não têm conseguido bons resultados, devido à simplificações em sua formulação.

Os métodos de migração no domínio da freqüência foram introduzidos por Stolt com o Método *F-K* (1978). Porém, este método possuía a restrição de não admitir

variações de velocidade no meio. Mais tarde foi desenvolvido por GAZDAG (1978) o método *Phase-Shift* que já contemplava modelos com variações verticais de velocidades. Com o desenvolvimento das técnicas de migração surgiu um método mais robusto que também contempla variações laterais de velocidade. Isso ocorreu em 1984, quando Gazdag e Sguazzero introduziram o método de migração PSPI (*Phase-Shift Plus Interpolation*). Algum tempo depois surgiu a migração por mudança de fase em duas etapas ou método *Split-Step*, introduzido por FREIRE (1988) e STOFFA *et al*. (1990) que também contemplava variações laterais de velocidade e era menos onerosa computacionalmente [SILVA, 2006].

Os métodos no domínio da freqüência citados, utilizam a equação unidirecional da onda (*one-way*) e através deles não se consegue imagear as *turning waves*, presentes em estruturas complexas com acréscimo do gradiente de velocidade com a profundidade. Além disso, quando se utilizada a equação da onda unidirecional (*one-way*) ocorrem erros de amplitude nos campos de ondas que estão relacionados ao fato destas equações não obedecerem aos princípios de reciprocidade e conservação de energia, duas propriedades fundamentais satisfeitas pela equação completa da onda. Informações de fase e amplitude são necessárias quando, além da posição do refletor, se está interessado em realizar estudos de AVA (variação da amplitude com o ângulo) após a migração.

Já na técnica de Migração Reversa no Tempo (RTM) é feita a depropagação do campo de ondas no tempo, utilizando a equação completa da onda. Geralmente, empregam-se técnicas de diferenças finitas para solucioná-la. Com a aplicação da denominada condição de imagem obtêm-se a posição espacial dos refletores em profundidade.

Esta técnica foi descrita por BAYSAL *et al*. (1983), MCMECHAN (1983) e LOEWENTHAL & MUFTI (1983) e devido aos seus bons resultados ao imagear estruturas com geometrias complexas, como é o caso de modelos com intrusões salinas com características geológicas parecidas com as encontradas no Golfo do México e Bacia de Santos, foi escolhida para ser utilizada no presente trabalho. Além disso, este método de migração contempla o imageamento de *turning waves*. Na seção 3.2 a Migração RTM será explicada em detalhes.

3.2 Migração Reversa no Tempo (RTM)

A Migração Reversa no Tempo (RTM, do inglês *Reverse Time Migration*) consiste, basicamente, em propagar as ondas registradas no sentido inverso no eixo do tempo, ou seja, do tempo final até o tempo inicial da análise. Esse processo é dividido em três partes, que podem ou não ser computadas independentemente, dependendo do esquema implementado. São as seguintes:

i. Propagação do campo de onda.
ii. Processo de depropagação, extrapolação do sismograma
iii. Aplicação de uma condição de imagem.

O processo de depropagação corresponde a calcular o campo de ondas em profundidade para cada tempo, utilizando os dados registrados (seção sísmica gerada na modelagem) como condição de contorno, à partir do tempo final da seção sísmica até o tempo igual a zero, obtendo assim a seção migrada em profundidade [FARIA,1986].

No processo de Migração Reversa no Tempo, geralmente, utiliza-se o Método das Diferenças Finitas para resolver a equação completa da onda para meios acústicos ou elásticos por uma extrapolação no tempo, permitindo que as ondas se propagem em todas as direções. Além disso, com o uso da equação completa da onda é possível migrar refletores com qualquer inclinação.

No processo de Migração Reversa no Tempo, à partir da seção registrada em uma superfície de observação, propaga-se inversamente o campo de ondas até às posições onde as reflexões foram geradas fazendo de cada estação receptora uma fonte pontual geradora de sinal sísmico (Figura 3.2.1). Do ponto de vista físico, pode-se basear no princípio de Huygens, no princípio da reversibilidade temporal e no princípio da reciprocidade para dizer que a equação da onda pode ser utilizada também de forma reversa no tempo, porém, ao invés de utilizar uma única posição da malha como fonte geradora de sinal sísmico, será utilizada cada uma das posições dos receptores para gerar este sinal, conforme mostrado matematicamente pela Equação 3.2.1:

$$\nabla^2 U(x,z) - \frac{1}{V(x,z)^2}\frac{\partial^2 U(x,z)}{\partial t^2} = sis(x, z = z_{obs}, t)\delta(x - x_{rec})\delta(z - z_{rec}), \quad (3.2.1)$$

onde sis(x, z, t) é o sismograma registrado na modelagem direta para uma fonte pontual; z_{obs} é a profundidade do plano de observação onde os receptores (geofones ou hidrofones) estão posicionados (x_{rec} e z_{rec}).

Portanto, durante o processo de Migração Reversa no Tempo cada receptor se comportará como uma fonte pontual reinjetando o campo anteriormente gravado na modelagem direta.

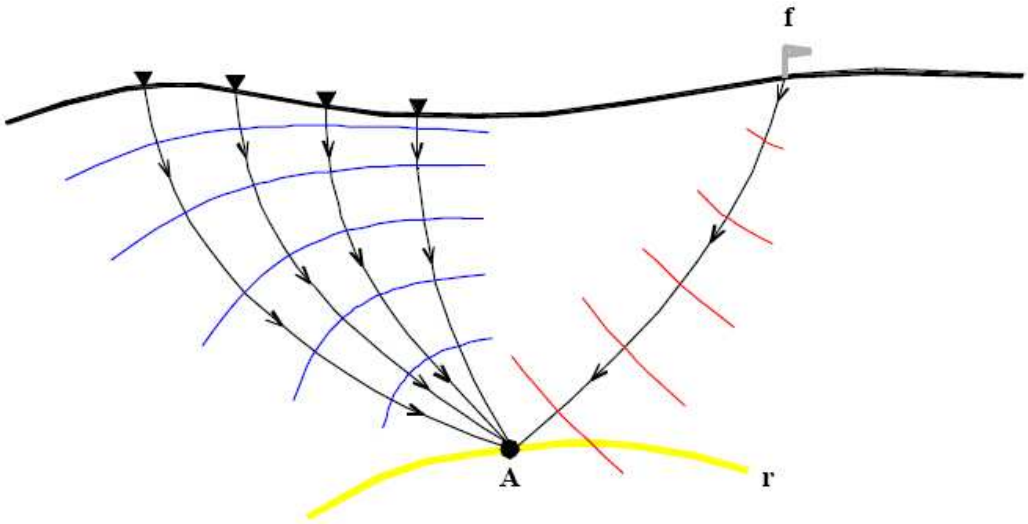


Figura 3.2.1. Representação do Princípio de Imageamento: depropagação dos registros do sismograma confrontando com a condição de Imagem TD(x,z). As reflexões são reposicionadas onde elas se originaram (Figura retirada de BULCÃO (2004)).

Neste trabalho, para a Migração Reversa no Tempo se faz uma comparação entre a equação acústica da onda, a denominada equação da onda não-reflexiva, e o esquema de separação do campo de ondas apresentado. A chamada equação da onda não reflexiva reduz a reflexão do campo de ondas durante a depropagação, reduzindo alguns dos artefatos característicos da Migração Reversa no Tempo que emprega a equação completa da onda. No caso do esquema de separação do campo de ondas o objetivo foi o de utilizar somente o campo de ondas na direção descendente. Além

disso, foi utilizada como condição de imagem, a condição de imagem de Tempo de Excitação, que será explicada à seguir.

3.2.1 Condição de Imagem de Tempo de Excitação

A condição de imagem possui um papel fundamental nos algoritmos de Migração Reversa no Tempo e influencia significativamente a qualidade da imagem em profundidade obtida.

Umas das condições de imagem mais utilizadas no processo de Migração Reversa no Tempo é a chamada, condição de imagem de Tempo de Excitação que se baseia na chamada matriz de tempo de trânsito da onda direta (TD(x,z)).

Neste esquema, que utiliza como Condição de Imagem a Matriz de Tempo de Trânsito da onda direta (TD(x,z)), a aplicação do método pode ser feita sobre dados sísmicos pré empilhados, ou seja, a análise dos sismogramas é feita levando-se em consideração a mesma geometria de aquisição de dados [BULCÃO,2004].

O cálculo da matriz TD(x,z) é realizado através de uma sub-rotina inserida dentro do programa principal. Basicamente, é realizada, para cada passo de tempo, uma comparação entre o valor do campo no instante atual (n) com o valor no instante anterior (n −1). Se este for menor do que aquele, o campo prossegue, se não, registra-se o valor do tempo (n) em uma matriz (TD(x,z)) e a magnitude do campo em uma matriz de amplitude máxima (Am). Portanto, para cada ponto da malha, tem-se o valor do tempo da onda direta (TD) e o seu máximo valor de amplitude (Am). Nas interfaces do modelo os tempos de propagação dos campos de onda direto e reverso na migração serão coincidentes.

A imagem da seção migrada M(x,z) será construída pelo campo de onda depropagado no tempo que corresponde ao tempo de trânsito entre a fonte sísmica e cada ponto específico da malha, expressa matematicamente pela equação 3.2.2:

$$M(x,z) = U(x,z,t = TD) \ , \qquad (3.2.2)$$

onde, *U (i, k, t)* é o campo de onda que está sendo migrado, *TD* é a matriz de tempo de trânsito da máxima amplitude a partir da fonte.

Na figura 3.2.2 pode-se ver o fluxograma do método de migração RTM utilizando a condição de imagem de Tempo de Excitação.

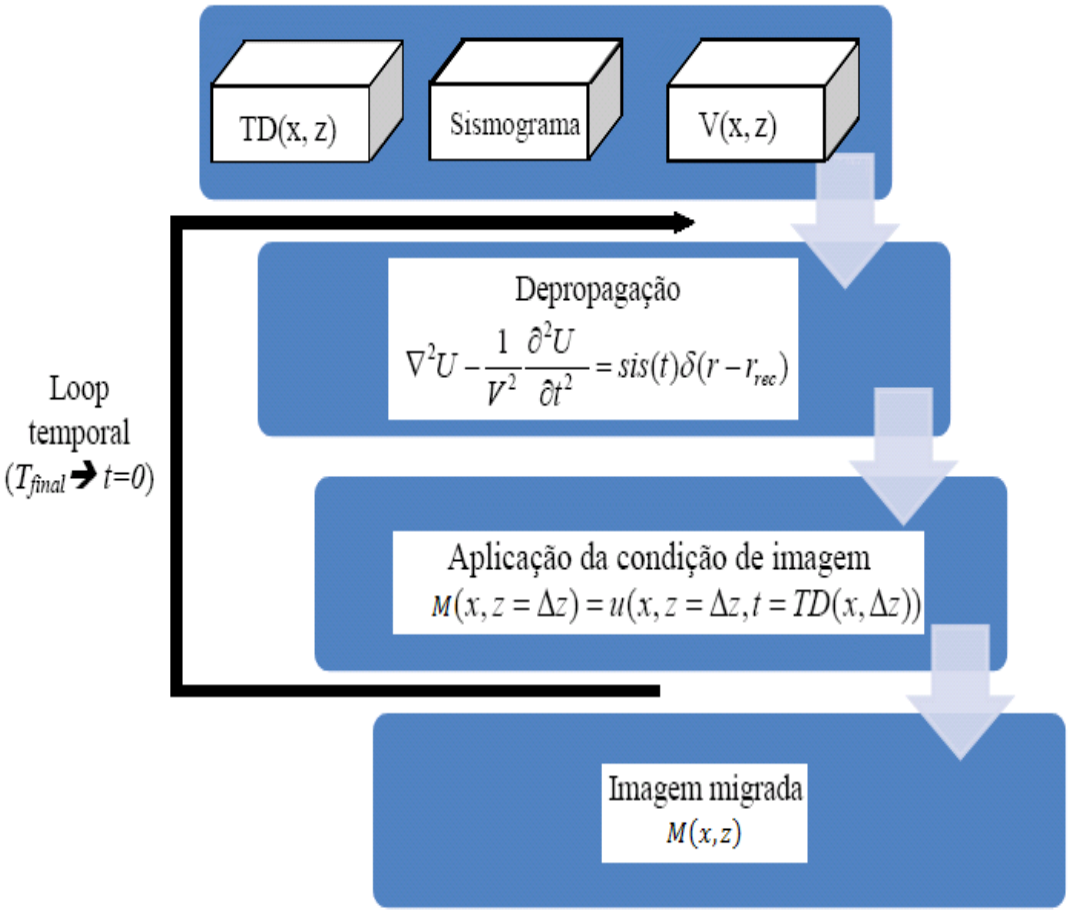


Figura 3.2.2 Esquema de Migração Reversa no Tempo (RTM) utilizando a condição de imagem de Tempo de Excitação.

Existem vários critérios que podem ser aplicados durante a fase de propagação do campo de ondas para se determinar a matriz de tempo de trânsito, que será utilizada durante a formação da imagem em profundidade.

Um critério muito utilizado atualmente para a obtenção da matriz de tempo de trânsito foi proposto por LOEWENTHAL & HU (1991), sendo baseado na amplitude

máxima da grandeza na qual a imagem em profundidade está associada. Para o caso da consideração do meio como sendo acústico, em que só há a propagação de ondas compressionais esta grandeza é a pressão hidrostática do campo de ondas.

A expressão utilizada no algoritmo de processamento para o cálculo da Matriz de Tempo de Trânsito (TD) através do critério da amplitude máxima, em termos de pseudocódigo, durante a propagação do campo de ondas em todos os pontos do modelo é dado por:

$$
\begin{aligned}
&\textit{if } (abs(u(x,z,t)) \geq abs\ (ref(x,z))) \textit{ then} \\
&\qquad ref(x,z) = u(x,z,t) \\
&\qquad TD(x,z) = t \\
&\textit{endif},
\end{aligned}
$$

onde:

x e z são as variáveis espaciais em 2D

t é o tempo durante a propagação do campo de ondas

u(x,z,t) é a matriz que contém as incógnitas do problema (pressão hidrostática do campo de ondas, no caso da modelagem sísmica utilizando operadores acústicos)

ref(x,z) é uma matriz contendo o valor da amplitude máxima para a incógnita em questão

TD(x,z) é a matriz de tempo de trânsito

Em casos de modelos de geometria complexa, quando se aplica o critério de amplitude máxima, em regiões distantes da posição da fonte sísmica surgem inúmeras descontinuidades na matriz de tempo de trânsito devido as diversas reflexões e reverberações do campo de ondas provenientes das diferenças de impedâncias acústica entre as interfaces. Para reduzir as descontinuidades na matriz de tempo de trânsito obtida, o modelo de velocidades deve ser suavizado, diminuindo os contrastes de impedância acústica ao longo do modelo.

Para o cálculo da Matriz de Tempo de Trânsito TD(x,z), neste trabalho, utilizou-se um método que consiste em um esquema baseado na aplicação de um critério desenvolvido por BULCÃO (2004), que não considera a amplitude máxima, mas sim a amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (*first break*). Este método tem por objetivo, como o próprio nome já diz, registrar a amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra e possui a vantagem de fazer com que as matrizes de tempo de trânsito tenham um comportamento mais suave em zonas distantes do ponto de detonação da fonte sísmica do que as obtidas com o método proposto por LOEWENTHAL & HU (1991).

Para a utilização do método, leva-se em consideração a freqüência de corte da fonte sísmica, através da equação (3.2.3):

$$T_f = 2\frac{\sqrt{\pi}}{f_c}, \tag{3.2.3}$$

onde T_f é o intervalo de tempo associado ao comprimento de onda da fonte sísmica empregada (vide apêndice A). Desta maneira, é possível selecionar a amplitude máxima que ocorrerá nas proximidades da primeira quebra, através de testes lógicos [BULCÃO, 2004].

A sub-rotina introduzida no algoritmo de propagação do campo de ondas para a obtenção da matriz de tempo de trânsito através do critério da amplitude máxima na proximidade da primeira quebra (adaptada de BULCÃO (2004)), pode ser escrita em termos de pseudocódigo, como:

```
cond1 = ((t – T(i,j)) ≤ (0.10)*Tf)
cond2 = (u(i,j,t) > ref(i,j))
cond3 = ( ref(i,j) = 0.0)
cond4 = (u(i,j,t) > 5.0*ref(i,j))
if ((cond2.and.(cond1.or.cond3)).or.(cond4)) then
        ref(i,j) = u(i,j,t)
        TD(i,j) = t
endif  ,
```

onde: *cond1, cond2, cond3* e *cond4* são variáveis lógicas que conterão o resultado das expressões avaliadas.

O método mostrou-se mais eficaz do que o do critério da amplitude máxima, mais difundido atualmente, em diversos artigos publicados pelo autor, tais como BULCÃO et al, 2003a e 2003b. Além disso, o número de descontinuidades na matriz de tempo mostrou-se inferior com a utilização deste novo método em comparação com o critério da amplitude máxima. Desta forma, as imagens em profundidade geradas mostraram possuir melhor continuidade ao longo da seção migrada.

3.3 Análise da Variação de Amplitude Com Ângulo (AVA)

Quando uma onda compressional incide em uma interface formando certo ângulo, são geradas uma onda compressional refletida e uma transmitida, além da onda cisalhante refletida e transmitida. Devido a este fenômeno de partição de energia na interface, o coeficiente de reflexão da onda compressional depende também da velocidade da onda cisalhante, dos meios que definem a interface, além de suas velocidades compressionais e densidades.

Os coeficientes de reflexão indicam a refletividade do meio e podem ser expressos através de uma relação matemática que indica a quantidade de energia do campo de ondas incidente que reflete em uma interface entre duas camadas geológica com diferentes parâmetros elásticos. Desta forma, a refletividade é um conceito físico fundamental para a compreensão das informações sísmicas, sendo a base para estudos de variação de coeficientes de reflexão com o ângulo de afastamento (AVA). A análise de AVA em dados de sísmica de reflexão têm sido de crescente interesse em estudos de exploração na última década. Apesar das amplitudes sísmicas serem a resposta da propagação sísmica através do meio geológico, não há como relacioná-las diretamente com as propriedades litológicas. Porém isso pode ser feito através da análise de AVA, relacionando as variações de amplitude com as propriedades petrofísicas do meio. Por

este motivo, uma migração que produza amplitudes precisas é de extrema importância para análises deste tipo, sendo um pré-requisito para a inversão de variações de amplitude com o ângulo (AVA). Informações corretas de amplitude, para que possa ser realizado este tipo de estudo, podem ser obtidas teoricamente a partir de uma migração em profundidade antes do empilhamento [CHATTOPADHYAY & McMECHAN, 2008].

A análise de AVA permite determinar parâmetros físicos através das curvas de variação do coeficiente de reflexão com o ângulo em um ponto determinado do refletor. Atualmente, os atributos sísmicos têm sido extremamente utilizados para a obtenção da descrição geológica de reservatórios de hidrocarbonetos, em especial para a definição da continuidade horizontal das camadas, fazendo assim um mapeamento de heterogeneidades. Geralmente, essas heterogeneidades estão associadas à saturação da rocha por fluidos. Esta informação pode ser obtida através de análises de AVA, onde a preservação de amplitudes deve ser assegurada. Por isso, continua sendo um desafio o desenvolvimento de técnicas de migração que forneçam amplitudes corretas para esta análise após a migração.

Neste trabalho avalia-se a influência nas amplitudes das imagens em profundidade com a aplicação do esquema de Migração Reversa no Tempo, considerando-se os três diferentes esquemas para a extrapolação do campo de ondas apresentados anteriormente.

Foi possível assim, analisar se os esquemas de Migração Reversa no Tempo utilizados fornecem boas estimativas para os coeficientes de reflexão à partir das amplitudes extraídas das imagens geradas. Também foram analisadas se as equações implementadas fornecem bons resultados na migração, fazendo a comparação dos gráficos de amplitude obtidos com o uso de cada uma delas.

3.3.1 Coeficientes de Reflexão e Impedância Acústica

Fisicamente, o fenômeno da reflexão consiste na mudança da direção de propagação da energia (desde que o ângulo de incidência não seja nulo). Ou seja, é o retorno da energia incidente em direção à região de onde ela é oriunda após entrar em

contato com uma superfície refletora, que pode ser uma interface que separa dois meios com diferentes impedâncias acústicas. A fração da energia que retorna pode ser medida através dos chamados coeficientes de reflexão e transmissão da onda plana, que desempenham um papel importante na propagação de ondas sísmicas. Através da partição de amplitudes que ocorre quando uma onda plana incide sobre uma interface plana separando dois meios de parâmetros elásticos distintos é possível se obter esses coeficientes.

À seguir será realizada uma revisão das principais fórmulas, utilizadas neste trabalho, para o cálculo dos coeficientes de reflexão nas interfaces entre dois meios com diferentes velocidades de propagação.

A figura 3.3.1 mostra os vetores de propagação de uma onda plana P incidente no meio 1 e suas correspondentes ondas refletidas PP e PS no meio 1 e transmitidas PP e PS no meio 2 (os índices 1 e 2 identificam os parâmetros referentes aos meios 1 e 2).

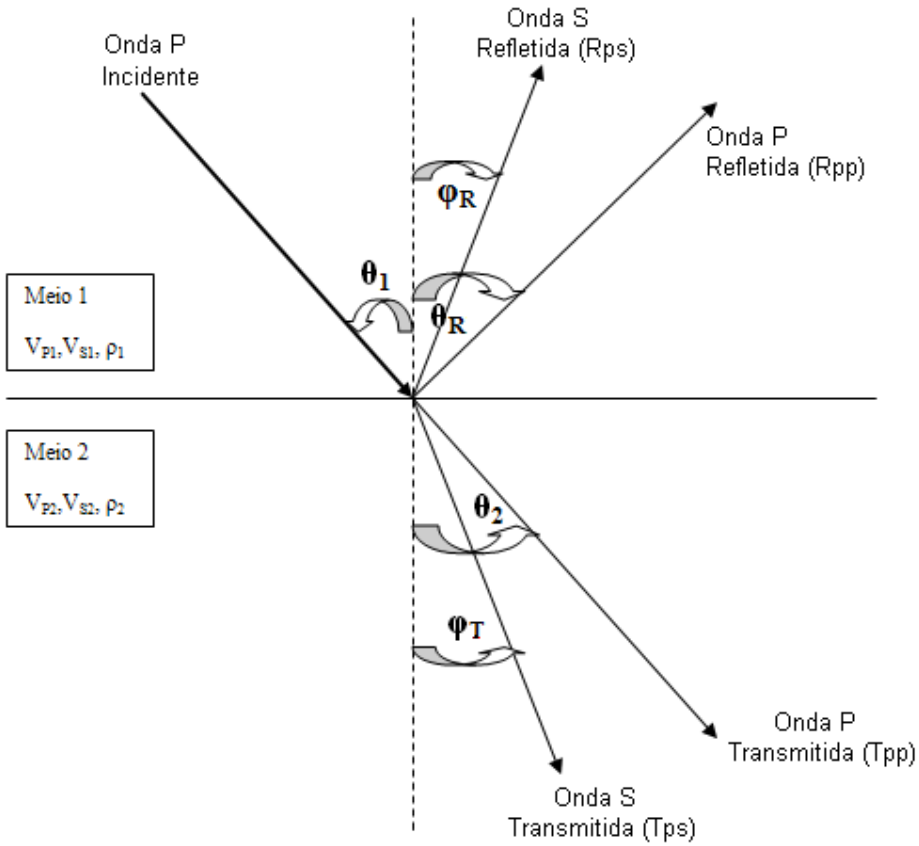


Figura 3.3.1 - Transmissão e reflexão na interface entre dois meios elásticos para uma onda P incidente.

Nesta figura, definiu-se θ_1 como o ângulo do vetor de propagação da onda P incidente com a normal à interface, θ_2 como o ângulo do vetor de propagação da onda PP transmitida, θ_R como o ângulo do vetor de propagação da onda PP refletida e φ_R e φ_T como os ângulos dos referidos vetores de propagação das ondas convertidas PS refletidas e transmitidas com a normal à interface, respectivamente.

Todos esses ângulos podem ser relacionados através da Lei de Snell [NUSSENZVEIG,1996]:

$$p = \frac{sen\theta_1}{V_{P1}} = \frac{sen\theta_R}{V_{P1}} = \frac{sen\theta_2}{V_{P2}} = \frac{sen\varphi_R}{V_{S1}} = \frac{sen\varphi_T}{V_{S2}} \,. \qquad (3.3.1)$$

Observa-se que na equação (3.3.1) que $\theta_1 = \theta_R$ e que p é o parâmetro do raio.

Também segundo a Lei de Snell pode-se afirmar que os vetores de propagação de todas as ondas citadas acima, bem como a normal à interface estão em um mesmo plano, chamado de plano de incidência. Considerando-se apenas o caso de ondas compressionais, a Lei de Snell fornece a relação 3.3.2, abaixo:

$$sen\theta_2 = sen\theta_1 \frac{V_{P2}}{V_{P1}} \ . \qquad (3.3.2)$$

Quando *sen* $\theta_2 = 1$, o que implica em $V_{P1} \leq V_{P2}$, têm-se que:

$$sen\theta_C = \frac{V_{P1}}{V_{P2}} \ . \qquad (3.3.3)$$

O ângulo θ_c é chamado de ângulo crítico da onda P. Este é o ângulo de incidência correspondente à inclinação na qual todo o campo incidente é refletido, sem transmissão de energia para as camadas subjacentes ($\theta_2 = 90^o$). Isto vai ocorrer somente quando a velocidade da camada superior é menor do que a velocidade da camada inferior. Correspondentemente, existe o ângulo crítico para a onda S.

Para incidência normal, onde não há onda convertida, o coeficiente de reflexão da onda P (R_p) é expresso como em CASTAGNA (1993) pela equação (3.3.4):

$$R_P = \frac{I_{P2} - I_{P1}}{I_{P2} + I_{P1}} \ , \qquad (3.3.4)$$

A impedância é o resultado do produto entre a densidade e a velocidade para cada um dos meios no modelo proposto. Na equação (3.3.4), I_P é a impedância da onda compressional (P). Esta equação é válida tanto para meios elásticos como para meios acústicos. Pode ser feita a analogia da equação 3.3.4 com as impedâncias da onda S para o coeficiente de reflexão R_S à incidência normal da onda S. O coeficiente de transmissão (T_P) neste caso será dada pela equação 3.3.5.

$$T_P = (1 + R_P)\frac{\rho_1}{\rho_2}\,, \tag{3.3.5}$$

onde ρ_1 e ρ_2 são as densidades dos meios 1 e 2, respectivamente.

Se a incidência for oblíqua, as fórmulas para os coeficientes de reflexão para meios elásticos e acústicos são diferentes. No caso especial de meios acústicos, onde não há propagação de onda cisalhante, o coeficiente de reflexão pose ser expresso pela equação (3.3.6):

$$R(\theta_1) = \frac{V_{P2}\,\rho_2\cos(\theta_1) - V_{P1}\rho_1\cos\,(\theta_2)}{V_{P2}\,\rho_2\cos(\theta_1) + V_{P1}\rho_1\cos\,(\theta_2)}\,, \tag{3.3.6}$$

onde θ_1 é o ângulo de incidência, θ_2 é o ângulo transmitido, e V_1 e V_2 são as velocidades da onda P no meios 1 e 2, respectivamente. A equação (3.3.1) é uma aproximação para a onda plana.

Considerando meios com densidade constante, a equação (3.3.6) se transforma na equação (3.3.7), que é utilizada neste trabalho para o cálculo dos coeficientes de reflexão teóricos nas interfaces do modelo.

$$R(\theta_1) = \frac{V_{P2}\cos(\theta_1) - V_{P1}\cos\,(\theta_2)}{V_{P2}\cos(\theta_1) + V_{P1}\cos\,(\theta_2)}\,. \tag{3.3.7}$$

Nas análises apresentadas no capítulo 4 onde são considerados modelos de velocidades simples, os ângulos de incidência podem ser calculados exatamente, de forma analítica. Os modelos utilizados para as análises de AVA foram modelos de camadas plano paralelas.

A figura (3.3.2) mostra o vetor de propagação de uma onda plana P incidente e seu respectivo ângulo de incidência (θ) em relação a normal à interface. Desta forma, o

ângulo de incidência será o arco cuja tangente é a divisão entre a distância da superfície até a interface e a distância da fonte (*offset)*, conforme a equação (3.3.8).

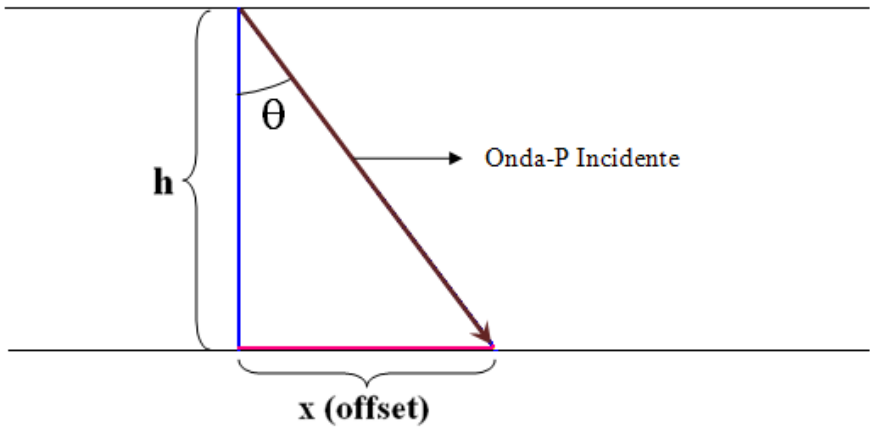


Figura (3.3.2) – Esquema para exemplificar como são calculados analiticamente os ângulos de incidência.

Logo se têm que:

$$\tan(\theta) = \frac{x_1}{h} \ , \tag{3.3.8}$$

e,

$$\theta = arctan\left(\frac{x_1}{h}\right) , \tag{3.3.9}$$

onde h é altura da camada, x_1 é o *offset* e θ é o ângulo de incidência.

O método de cálculo dos ângulos de incidência descrito acima, matematicamente expresso pela equação (3.3.9), pode ser utilizado para a incidência na primeira interface de um modelo de camadas paralelas. Já para as interfaces mais profundas de um modelo de camadas plano paralelas a relação *ângulo - offset* não é linear, tendo que se considerar a distância da fonte (*offset*) da primeira interface e assim sucessivamente para as outras interfaces. Por este motivo, deve-se buscar uma relação entre a posição do refletor com os ângulos de incidência. Desta forma, por cálculos trigonométricos têm-se que:

$$x_2 = h_1.tg(\theta_1) + h_2.tg(\theta_2), \tag{3.3.10}$$

sendo que, pela Lei de Snell,

$$\theta_1 = arcsen\left(\frac{(sen\theta_2).v_1}{v_2}\right). \tag{3.3.11}$$

Substituindo a equação (3.3.11) na (3.3.10), obtêm-se:

$$x_2 = h_1.tg\left(\frac{(sen\theta_2).v_1}{v_2}\right) + h_2.tg(\theta_2), \tag{3.3.12}$$

onde:

h_1 e h_2 são as alturas da primeira e segunda camadas, respectivamente.

x_1 e x_2 são os offsets da primeira e segunda interfaces, respectivamente.

θ_1 é o ângulo incidência na primeira interface

θ_2 é o ângulo de incidência na segunda interface que se quer calcular para cada *offset*.

v_1 e v_2 são as velocidades de propagação da onda para a primeira e para a segunda camada do modelo de velocidades.

Para a construção de gráficos de ângulo *versus* amplitude à partir da segunda interface do modelo é necessário a resolução da equação (3.3.12), ou seja é preciso encontrar as raízes desta equação para a obtenção do ângulo de incidência para cada interface. Este procedimento é análogo para os cálculos dos *offsets* das outras interfaces do modelo.

Capítulo 4

Aplicações

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises das simulações realizadas empregando os esquemas de modelagem e migração sísmica apresentados no capítulo 2 e 3, respectivamente.

Destaca-se que nos exemplos expostos à seguir, as inúmeras imagens em profundidade foram determinadas à partir dos esquemas de Migração Reversa no Tempo propostos, utilizando os diferentes implementações da equação da onda para meios acústicos, apresentados no capítulo 2.

Primeiramente, foram feitos testes de imageamento em um modelo possuindo um domo salino. Este modelo de velocidades foi proposto originalmente pela SEG/EAGE e possui características geológicas semelhantes aos modelos encontrados no Golfo do México em algumas áreas de tectônica salífera da Bacia de Santos. Neste modelo foram feitas simulações utilizando a equação acústica da onda e a equação acústica não reflexiva da onda durante os processos de obtenção da matriz de tempo de trânsito e de migração RTM à fim de comparar a qualidade das imagens obtidas. O principal objetivo de empregar este modelo de geometria complexa nas simulações foi de avaliar a implementação do esquema de Migração RTM de forma cinemática, ou seja, sem a preocupação com as amplitudes obtidas.

Nos exemplos seguintes, foram utilizados modelos mais simples, onde é possível a obtenção de soluções analíticas para avaliar as amplitudes oriundas das imagens geradas nas simulações utilizando os diferentes esquemas de migração RTM apresentados nos capítulos anteriores. Para atingir esse objetivo, foram realizados estudos de AVA (ângulo versus amplitude, descrito na sessão 3.3) em dois modelos de

velocidades com camadas plano-paralelas, distintos. Um dos modelos possui duas camadas paralelas e o outro apresentando cinco camadas paralelas. Os coeficientes de reflexão foram calculados teoricamente em cada interface para fins de comparação com a amplitude da imagem migrada. No processo de modelagem, para a obtenção do sismograma sintético, foi utilizada a Equação Acústica da Onda. Nas etapas de cálculo da condição de imagem (Matriz de Tempo de Trânsito) e Migração Reversa no Tempo foi utilizada a Equação Acústica da Onda, a Equação Acústica Não Reflexiva da Onda e por fim a Equação Acústica da Onda com o esquema de separação do campo de ondas apresentado.

No modelo que possui cinco camadas paralelas também foi feito um estudo, utilizando teoria dos raios, do *offset* máximo em que é possível se obter informações verdadeiras de amplitude. Este estudo foi realizado em todas as interfaces do modelo.

Os resultados das simulações realizadas serão apresentados nas seções seguintes.

4.1 Modelo de Velocidades com Domo de Sal

O modelo com domo de sal utilizado nas modelagens foi proposto pela SEG/EAGE. Porém foi feita uma alteração neste modelo acrescentando um lâmina d'água de 360 m de comprimento, de modo que as dimensões do modelo ficaram 4680 m de extensão horizontal e 1614 m de extensão vertical, e este pode ser visto na figura 4.1.1. O objetivo desta modificação foi o de aplicar a técnica de silenciamento, retirando a onda direta *("mute")* de forma mais eficaz e de aproximar a geologia de tal modelo aos casos característicos existentes nas bacias brasileiras (lâminas d'agua maiores que 300 m de profundidade). O espaçamento da malha utilizado na discretização é de 6 m e o intervalo de tempo é de 0,0002 s, para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade e de redução da dispersão numérica (ver Apêndice 1). Para a propagação do campo de ondas foi utilizada uma fonte explosiva com a freqüência de 30Hz.

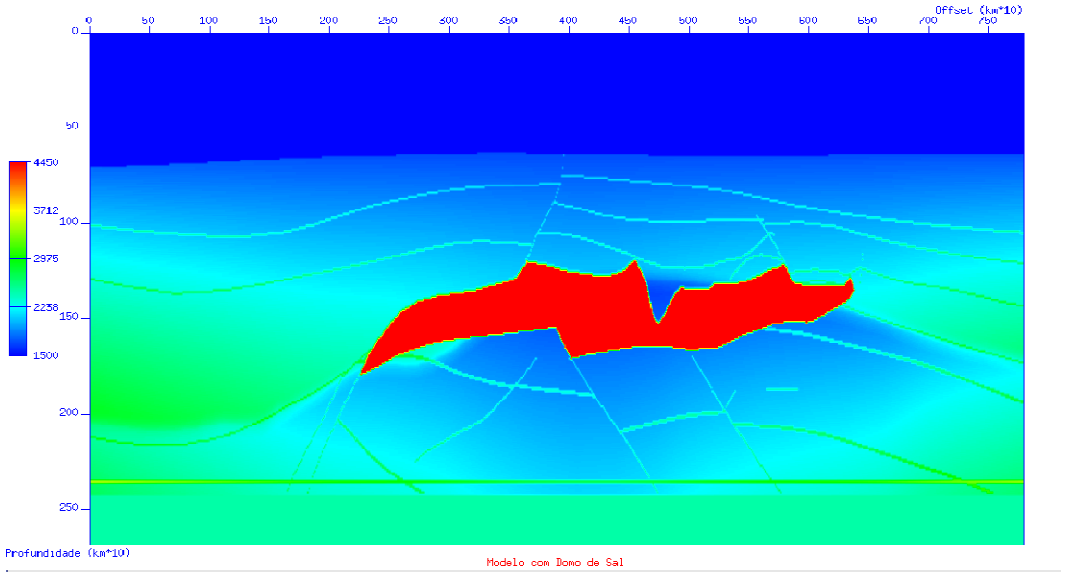
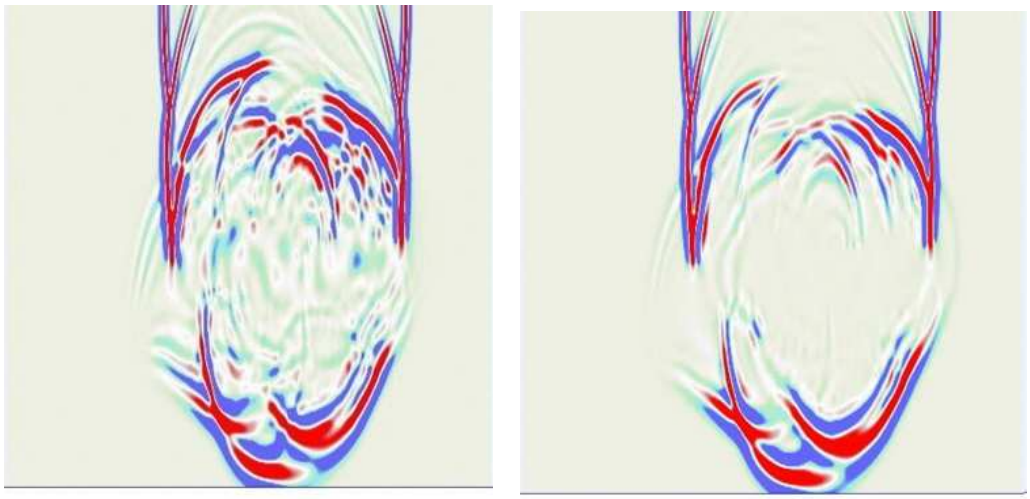


Figura 4.1.1 – Modelo de velocidades bi-dimensional com flanco de sal utilizado na modelagem e no processo de migração sísmica.

Primeiramente foi realizada uma simulação da propagação do campo de ondas com a equação acústica da onda e com a equação não reflexiva da onda, com a fonte posicionada na posição x = 2340 m na superfície do modelo. Esta simulação teve por objetivo comparar a propagação do campo de ondas com as duas equações. Na figura 4.1.2 pode-se observar os snapshots gerados.

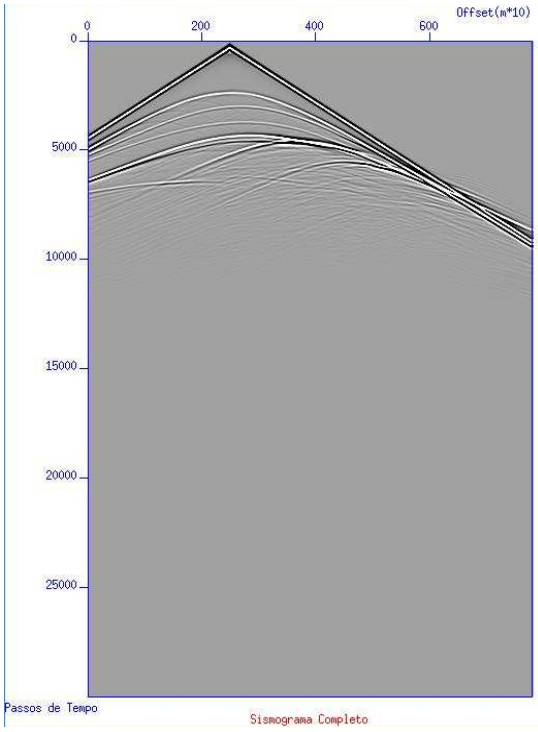


Equação acústica da onda | Equação acústica não reflexiva da onda

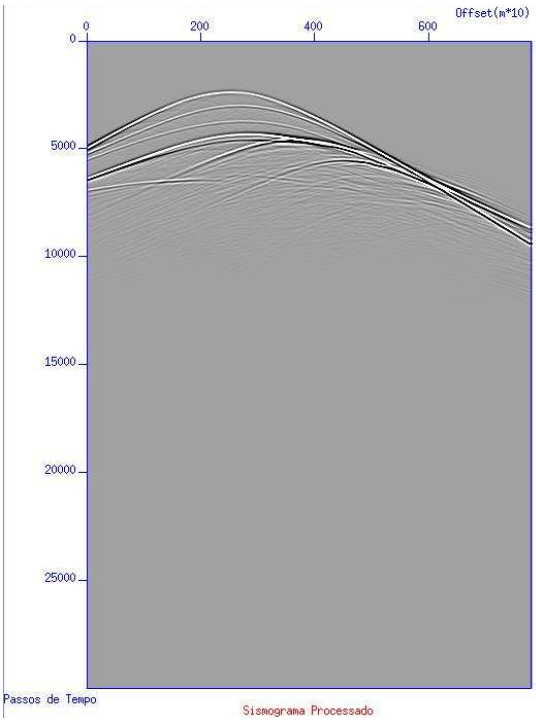
4.1.2 *Snapshots* da propagação do campo de ondas no modelo com domo de sal utilizando a equação acústica da onda e a equaçào não reflexiva da onda.

Fazendo a análise da figura 4.1.2, nota-se que a utilização da equação não reflexiva reduziu de forma significativa as múltiplas reflexões, que são artefatos indesejáveis no processo de migração.

Após esta análise, foi gerado um sismograma sintético utilizando a equação acústica da onda com a fonte posicionada na superfície do modelo nas coordenadas x = 1500 m e z = 18 m. O Sismograma resultante, que pode ser visto na figura 4.1.3, foi pré-processado de modo à aplicar a técnica de silenciamento *("mute")* com o objetivo de retirar a onda direta e encontra-se na figura 4.1.4. Este novo sismograma será utilizado como dado de entrada para o processo de migração reversa no tempo, realizado posteriormente.



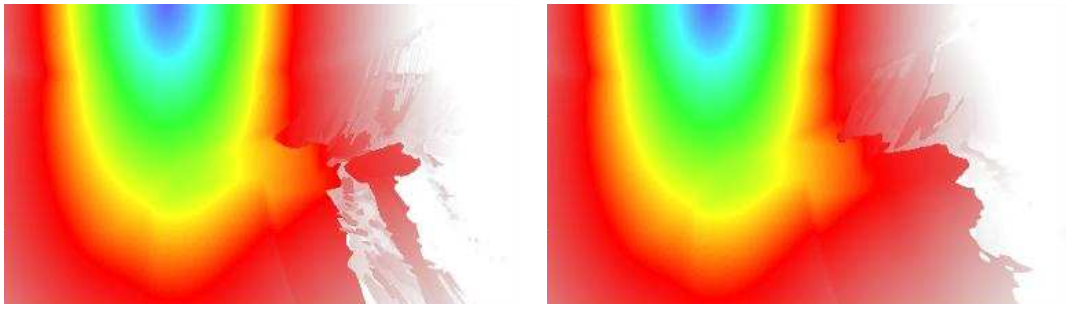
4.1.3 Sismograma sintético proveniente da modelagem utilizando a equação acústica da onda no modelo com intrusão salina modificado da SEG/EAGE.



4.1.4 Sismograma sintético pré-processado proveniente da modelagem utilizando a equação acústica da onda, utilizado para a migração reversa no tempo realizada no modelo com intrusão salina modificado da SEG/EAGE.

Após a realização da modelagem utilizando a equação acústica da onda para a geração do sismograma, foram realizadas simulações para a obtenção da matriz de tempo de trânsito utilizando as equações acústica da onda e acústica não reflexiva da onda. As matrizes de tempo foram extraídas com a mesma posição da fonte e estão representadas na figura 4.1.5.

(a) (b)

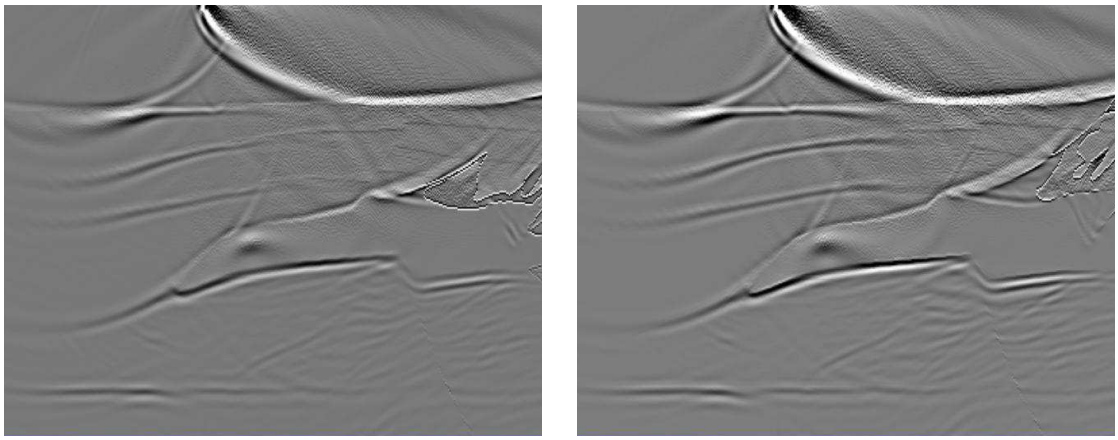


4.1.5 Matrizes de tempo de trânsito no modelo com domo de sal utilizando a equação acústica da onda (a) e a equação não reflexiva da onda (b).

A seguir, foi realizada a Migração Reversa no Tempo, utilizando para a extrapolação do campo de ondas a equação acústica da onda e a equação não reflexiva da onda a fim de gerar as imagens da sub-superfície. Vale lembrar que as análises realizadas neste modelo de geometria complexa têm por objetivo avaliar a qualidade das imagens obtidas sem a preocupação com as amplitudes obtidas nas imagens resultantes.

Na figura 4.3.6 abaixo tem-se as imagens migradas com um tiro dado na superfície do modelo na posição x = 1500 m e z = 18 m utilizando as duas equações citadas acima no processo de migração. As imagens originais foram cortadas com o objetivo de melhorar a análise na região de interesse, próxima à região onde a fonte foi posicionada.

(a) **(b)**

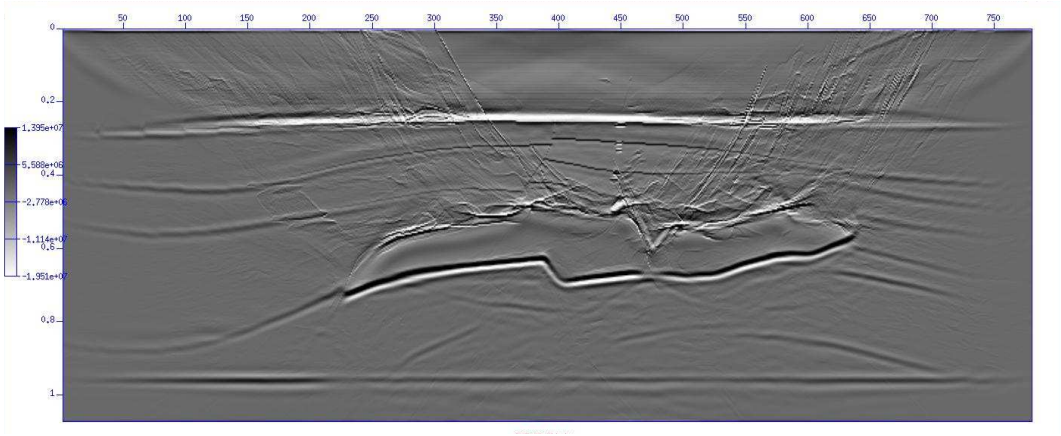


4.1.6 Imagens em profundidade migradas no modelo com domo de sal utilizando a equação acústica da onda (a) e a equação acústica não reflexiva da onda (b).

Analisando as imagens obtidas pode-se concluir que o uso da equação acústica não reflexiva da onda melhorou a qualidade do imageamento, ou seja, as amplitudes dos refletores encontram-se com maior contraste e houve uma pequena redução nos ruídos, o que está de acordo com o resultado esperado. Os ruídos gerados nas imagens se devem ao fato das matrizes de tempo de trânsito também apresentarem ruídos.

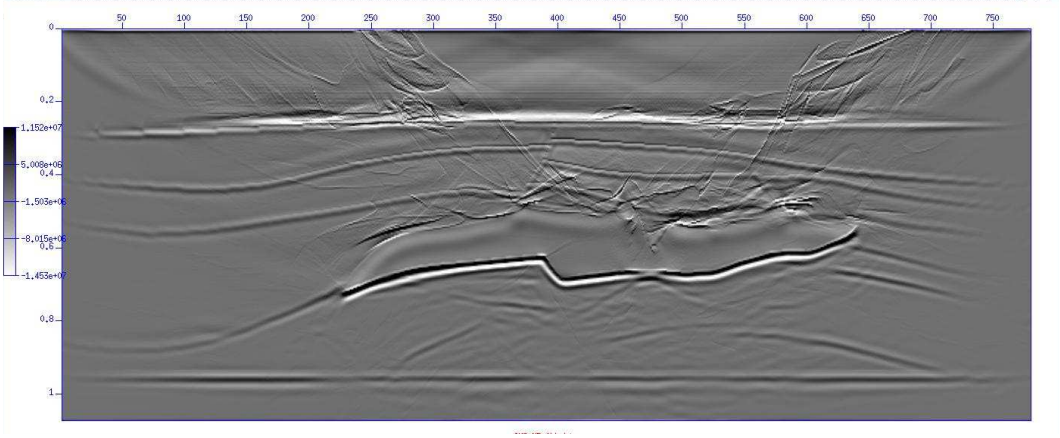
Com o objetivo de analisar melhor a qualidade das imagens geradas utilizando os dois tipos de equações citadas acima, foi feita uma migração reversa no tempo pré-empilhamento e depois as imagens geradas foram somadas para a obtenção da imagem final do modelo completo. Para esta simulação foram gerados sismogramas sintéticos através da modelagem numérica com tiros dados em 780 pontos do modelo. Os sismogramas foram extraídos em 780 receptores localizados no topo do modelo na figura 4.1.1. em 30000 passos de tempo. Após esse procedimento foi realizado o cálculo das matrizes de tempo de trânsito para cada um dos 780 tiros. Depois foi realizada a Migração Reversa no Tempo à partir dos dados obtidos. E por último as imagens migradas foram somadas para a obtenção do imageamento do modelo completo.

A figura 4.1.7 abaixo mostra a imagem migrada e empilhada utilizando a equação acústica da onda.



4.1.7 Imagem em profundidade final, resultante do empilhamento das 780 imagens provenientes da aplicação do Esquema de Migração Reversa no Tempo, através de 780 tiros dados na superfície do modelo, empregando a equação acústica da onda em todas as simulações realizadas no modelo com flanco de sal bi-dimensional da SEG-EAGE.

A figura (4.1.8) abaixo mostra a imagem migrada e empilhada utilizando a equação acústica não reflexiva da onda.



4.1.8 Imagem em profundidade final, resultante do empilhamento das 780 imagens provenientes da aplicação do Esquema de Migração Reversa no Tempo, através de 780 tiros dados na superfície do modelo, empregando a equação acústica não reflexiva da onda nas fases de obtenção da matriz de tempo de trânsito e na migração realizadas no modelo com flanco de sal bi-dimensional da SEG-EAGE.

As imagens obtidas nas figuras (4.1.7) e (4.1.8) foram plotadas na mesma escala de cores.. Nota-se nitidamente a melhora na qualidade na imagem final com o uso da equação não reflexiva da onda em comparação à obtida com o uso da equação acústica da onda. Um procedimento que poderia melhorar a qualidade das imagens finais e reduzir os ruídos é o de utilização de outra condição de imagem no processo de migração reversa no tempo, como por exemplo a condição de imagem de correlação cruzada ou suas variações. Não foi realizado nenhum processamento nas imagens obtidas (silenciamento) e este tipo de procedimento poderia vir a melhorar a qualidade das mesmas, reduzindo os ruídos nas imagens.

4.2. Modelo de Velocidades com Duas Camadas Paralelas

Neste tópico serão apresentadas as análises realizadas referentes à aplicação dos diversos esquemas de Migração Reversa no Tempo apresentados nos capítulos anteriores, empregando operadores acústicos em um modelo simples de duas camadas paralelas.

Nesse estudo foram analisados a amplitude extraída da imagem migrada e o coeficiente de reflexão analítico para o modelo de velocidades com duas camadas paralelas. O modelo utilizado é idêntico ao proposto por CHATTOPADHYAY & McMECHAN (2008) , possuindo velocidade de propagação na camada superior igual a 2100m/s e na camada inferior igual a 2150m/s (Figura 4.2.1). O objetivo principal é analisar as amplitudes da imagem migrada, obtidas utilizando a condição de imagem de tempo de excitação na migração reversa no tempo com as diversas equações da onda (equação acústica da onda, equação acústica não reflexiva da onda e equação acústica da onda com separação do campo de ondas utilizando somente o campo descendente) em um modelo de velocidades sem suavização. Este estudo compara explicitamente os coeficientes de reflexão estimados dependentes do ângulo com seus valores computados analiticamente.

O modelo possui 8,6 km de extensão horizontal e 1,3 km de extensão vertical. A profundidade do refletor é de 800 m. O espaçamento da malha (*grid*) utilizado na discretização é de 10 m e o intervalo de temo é de 0,0004 s, para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade e não dispersão numérica (ver Apêndice 1). Foi utilizada uma fonte explosiva com a freqüência de 30Hz. Um sismograma sintético (figura 4.2.2.) foi extraído em 860 receptores localizados no topo do modelo na figura 4.2.1. em 10000 passos de tempo à partir de um tiro dado pela fonte sísmica na posição x = 1500m na superfície do modelo em z = 10 m.

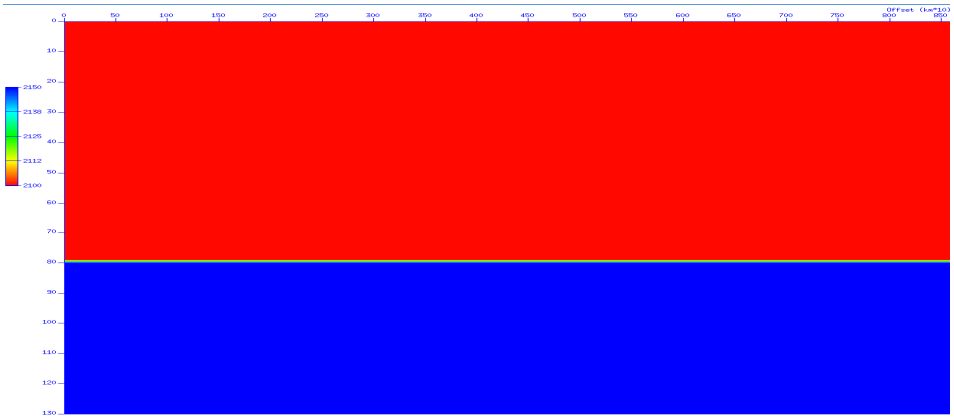


Figura 4.2.1 – Modelo bi-dimensional com duas camadas paralelas utilizado para gerar os dados sísmicos

O sismograma sintético obtido na modelagem (figura 4.2.2) foi pré-processado antes da migração. A onda direta foi retirada *("mute")* e as bordas foram atenuadas com o objetivo de reduzir efeitos de borda indesejáveis no processo de migração [CHANG & McMECHAN, 1986]. Após estes procedimentos aplicados ao sismograma original obteve-se o sismograma sintético que ser visto na figura 4.2.3, o qual foi utilizado em todas os esquemas de Migração Reversa no Tempo realizados para o modelo em questão. As imagens estão na mesma escala.

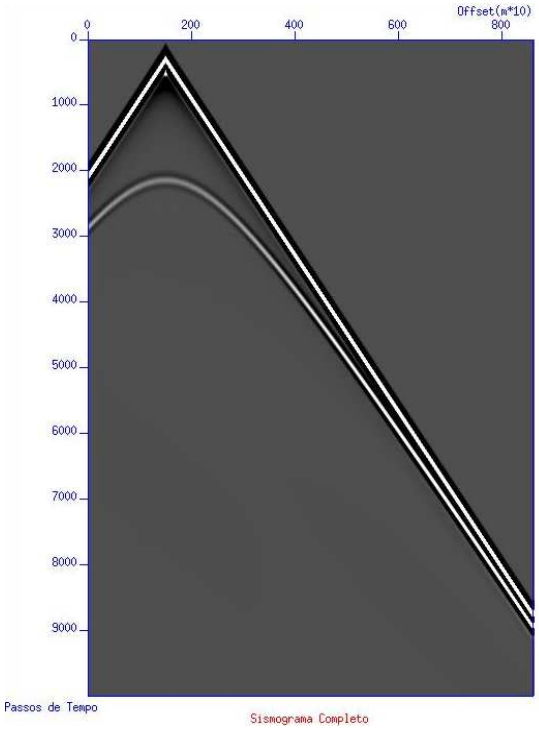


Figura 4.2.2 – Sismograma sintético proveniente da modelagem utilizando a equação acústica da onda.

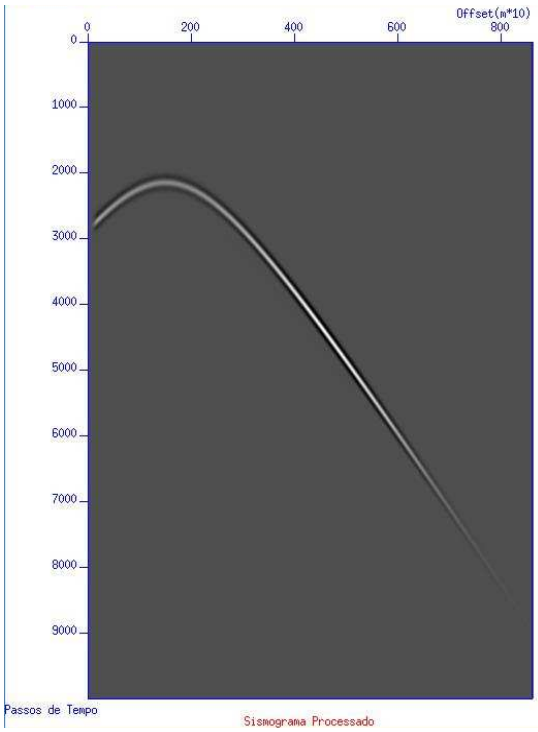


Figura 4.2.3 – Sismograma sintético pré-processado proveniente da modelagem utilizando a equação acústica da onda.

As Imagens 4.2.4, 4.2.5 e 4.2.6 foram obtidas após a realização da Migração Reversa no Tempo utilizando a equação acústica da onda, a equação acústica não reflexiva da onda e a equação acústica da onda com separação do campo de ondas utilizando somente o campo descendente, respectivamente. Estas equações foram utilizadas tanto para o cálculo da Condição de Imagem de Tempo de Excitação quando para a depropagação do campo de ondas.

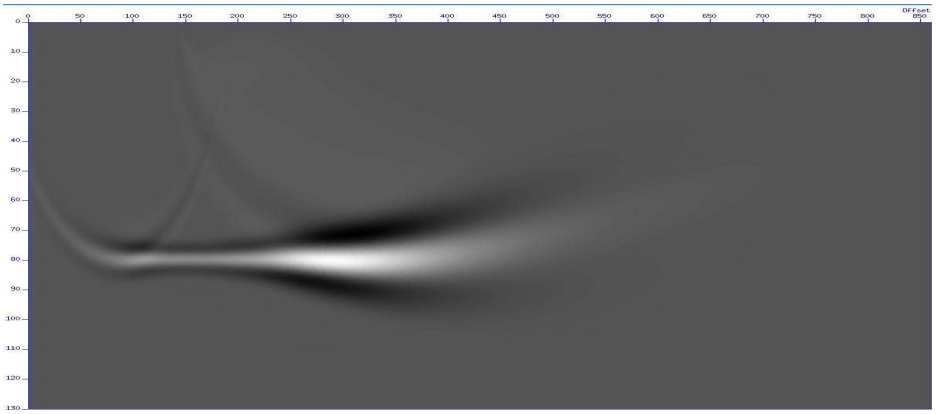


Figura 4.2.4 - Imagem e profundidade final obtida a partir do Processo de Migração Reversa no Tempo com a Implementação da Equação Acústica da Onda.

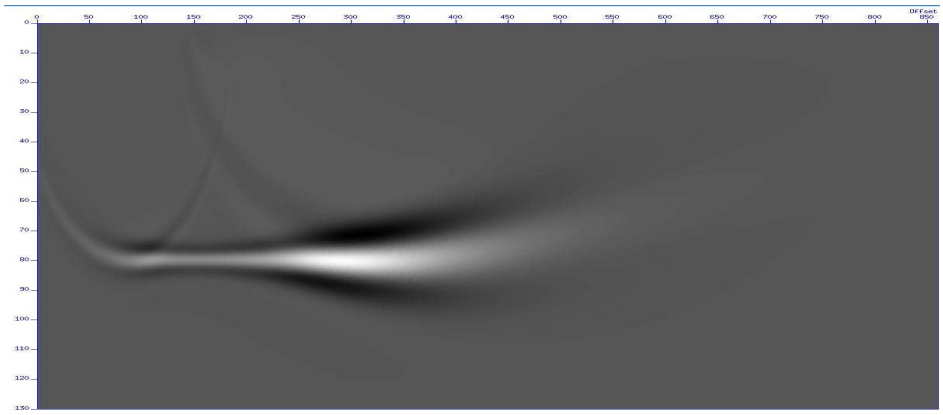


Figura 4.2.5 - Imagem e profundidade final obtida a partir do Processo de Migração Reversa no Tempo com a Implementação da Equação Acústica Não Reflexiva da Onda.

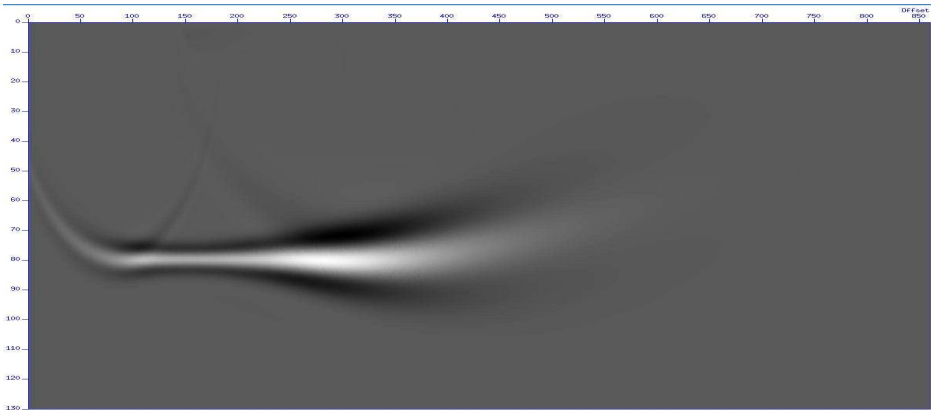


Figura 4.2.6 - Imagem e profundidade final obtida a partir do Processo de Migração Reversa no Tempo com a Implementação da Equação Acústica da Onda com o esquema de separação do campo de ondas.

Observando as imagens geradas com os diversos esquemas de migração, percebe-se que as imagens ficaram equivalentes devido ao modelo de velocidade ser simples e não apresentar grandes variações de velocidades. O principal objetivo, neste trabalho, da utilização deste modelo nos processos de migração é fazer a análise de AVA e não comparar as imagens obtidas.

Foi aplicado um procedimento para escalar as amplitudes das imagens com o valor teórico para o ângulo de incidência normal com o objetivo de terem o mesmo

coeficiente de reflexão no ângulo zero que o teórico (CHATTOPADHYAY & McMECHAN, 2008). O ângulo crítico para este modelo é 77,62^{o}. O coeficiente de reflexão nas figura (4.2.7) foi plotado em função do ângulo de incidência. Os ângulos de incidência foram obtidos analiticamente, conforme esquema apresentado na seção 3.3.

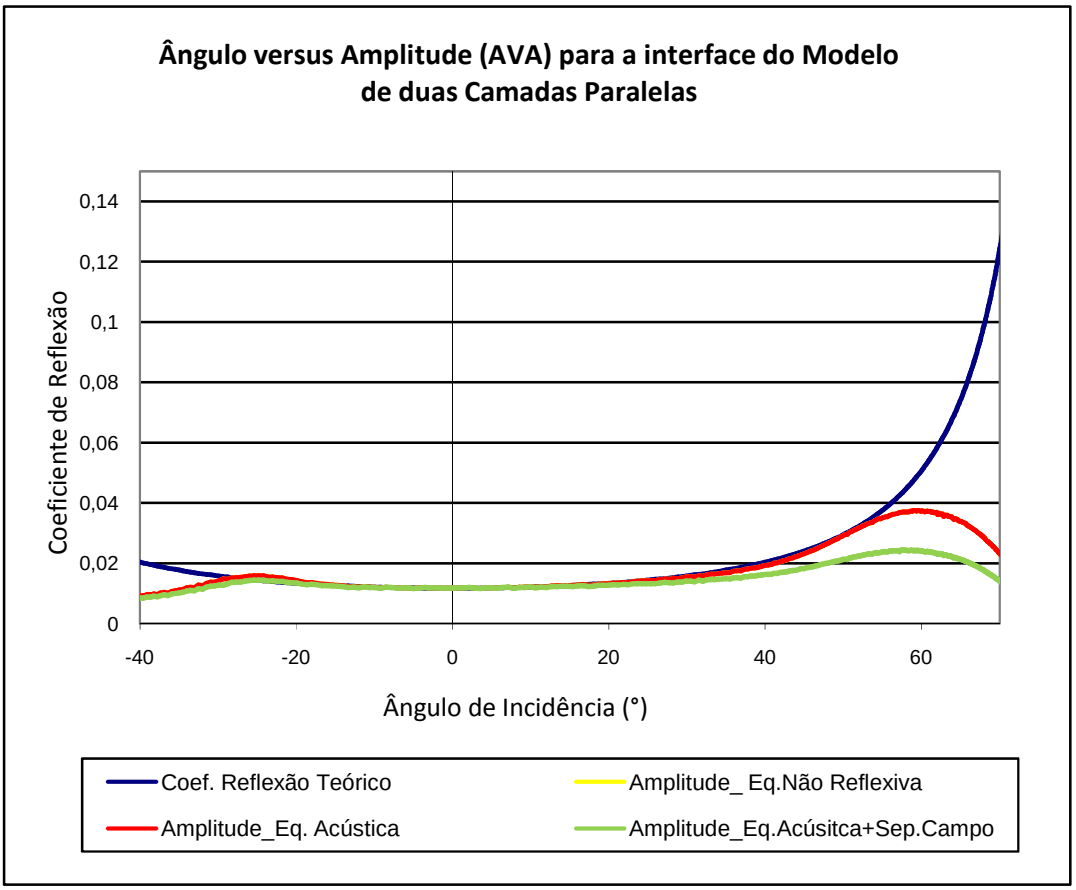


Figura 4.2.7 – Amplitudes da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência onde foi utilizada a condição de imagem de tempo de excitação e a equação acústica da onda, a equação acústica não reflexiva da onda e a equação acústica da onda com separação do campo de ondas utilizando somente o campo descendente.

Observando-se o gráfico 4.2.7 nota-se que no caso de adoção da equação acústica da onda e da equação acústica não reflexiva da onda nos esquemas de migração as curvas de amplitudes acompanharam a curva da teoria até ângulos próximos de 60º. Os gráficos com o uso destas equações ficaram equivalentes, o que gerou uma superposição entre eles. Já no esquema com a utilização apenas do campo de ondas descendente, as curvas de amplitudes acompanharam a curva da teoria até ângulos

próximos de 30º. Isso se deve ao fato do esquema de separação do campo de ondas ter sido aplicado considerando apenas a direção descendente (vertical) e com isso ocorre que não são consideradas ondas que incidem com inclinações diferentes pelo modelo à medida que se aumenta o *offset*.

Observando o resultado obtido por CHATTOPADHYAY & McMECHAN (2008) no gráfico da figura 4.2.8, nota-se que os resultados encontrados neste trabalho para a comparação das amplitudes das seções migradas (figura 4.2.7) ficaram mais condizentes com os coeficientes de reflexão obtidos teoricamente no modelo em relação aos obtidos neste artigo.

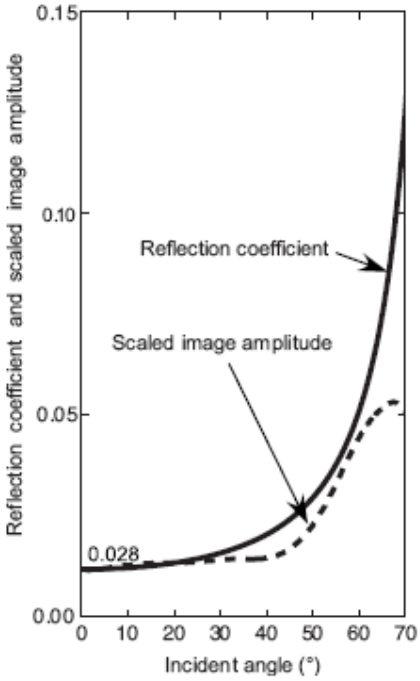


Figura 4.2.8 – Amplitudes da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência onde foi utilizada a condição de imagem de tempo de excitação e a equação acústica da onda. Gráfico extraído de CHATTOPADHYAY & McMECHAM (2008).

Os resultados das análises de amplitudes apresentados mostraram boa correlação com os coeficientes de reflexão teóricos, o que encorajou a aplicação dos mesmos esquemas de migração em um modelo de velocidades com maior número de interfaces. Estas análises serão apresentadas na seção 4.3.

4.3 Modelo de Velocidades com Cinco Camadas Paralelas

Neste tópico serão apresentadas as análises realizadas referentes à aplicação dos diversos esquemas de Migração Reversa no Tempo apresentados nos capítulos anteriores, considerando o meio de propagação como acústico utilizando um modelo de velocidades com cinco camadas paralelas. Neste modelo foi feito um estudo de AVA (ângulo versus amplitude) nas suas quatro interfaces, além de análises de suavização do sismograma e do ângulo de incidência máxima no qual se é possível obter informações sísmicas do ponto de interesse.

O modelo utilizado nas simulações possui 5000 m de extensão horizontal e 3000 m de extensão vertical. A profundidade dos refletores são, em relação à profundidade, respectivamente, 600 m, 1100 m, 1605 m e 2100 m. As velocidades compressionais no modelo são 2000 m/s, 2100 m/s, 2200 m/s, 2300 m/s e 2500 m/s, respectivamente. O espaçamento da malha (*grid*) de discretização é de 5 m e o intervalo de tempo é de 0,0004 s, para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade e de redução da dispersão numérica (ver Apêndice A). Foi empregada uma fonte explosiva tipo Ricker com a freqüência de 30Hz. Um sismograma sintético (figura 4.3.2.) foi extraído em 1001 receptores localizados no topo do modelo na figura (4.3.1) em 10000 passos de tempo, com a fonte posicionada na posição x = 2500 m na superfície do modelo.

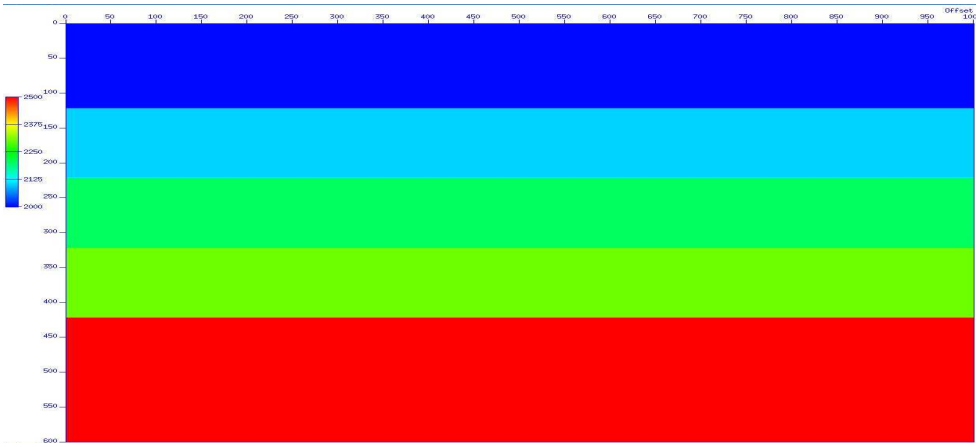


Figura 4.3.1 – Modelo bi-dimensional com quatro camadas paralelas utilizado para gerar os dados sísmicos

O sismograma sintético obtido na modelagem foi pré-processado antes da migração. A onda direta foi retirada *("mute")* e as bordas foram atenuadas com o objetivo de reduzir efeitos de borda indesejáveis no processo de migração. Para a atenuação do sismograma empregou-se a expressão de uma curva exponencial com o valor de 0.01 para o fator de escala do último traço. A expressão utilizada para a realização deste procedimento foi a equação 4.3.1. Tal expressão deve ser aplicada nas bordas esquerda e direita do sismograma para efetivar a atenuação.

$$f_{P(i)=}e^{-[fat(N-i)]^2}, \tag{4.3.1}$$

onde i é a posição da malha e *fat* é o fator amortecedor, N é o número de pontos da malha para a borda de amortecimento e f é o fator multiplicativo para atenuar as bordas co sismograma.

Foram realizados vários testes de suavização das bordas do sismograma, variando-se o número de traços à serem atenuados, com o objetivo de analisar a influência desse amortecimento nos gráficos de análise de amplitude versus ângulo (AVA).

As bordas do sismograma obtido na modelagem foram atenuadas em 50, 100, 200 e 300 traços e depois foi realizada a migração reversa no tempo com o uso de cada um dos 4 sismogramas obtidos. Neste caso foi empregada somente a equação acústica da onda, pois o objetivo não era a comparação de diferentes implementações, mas sim, a verificação da influência do amortecimento das bordas do sismograma nos resultados finais a fim de escolher a melhor suavização possível para as próximas simulações. Estes sismogramas sintéticos pré-processados podem ser vistos na figura 4.3.2 abaixo:

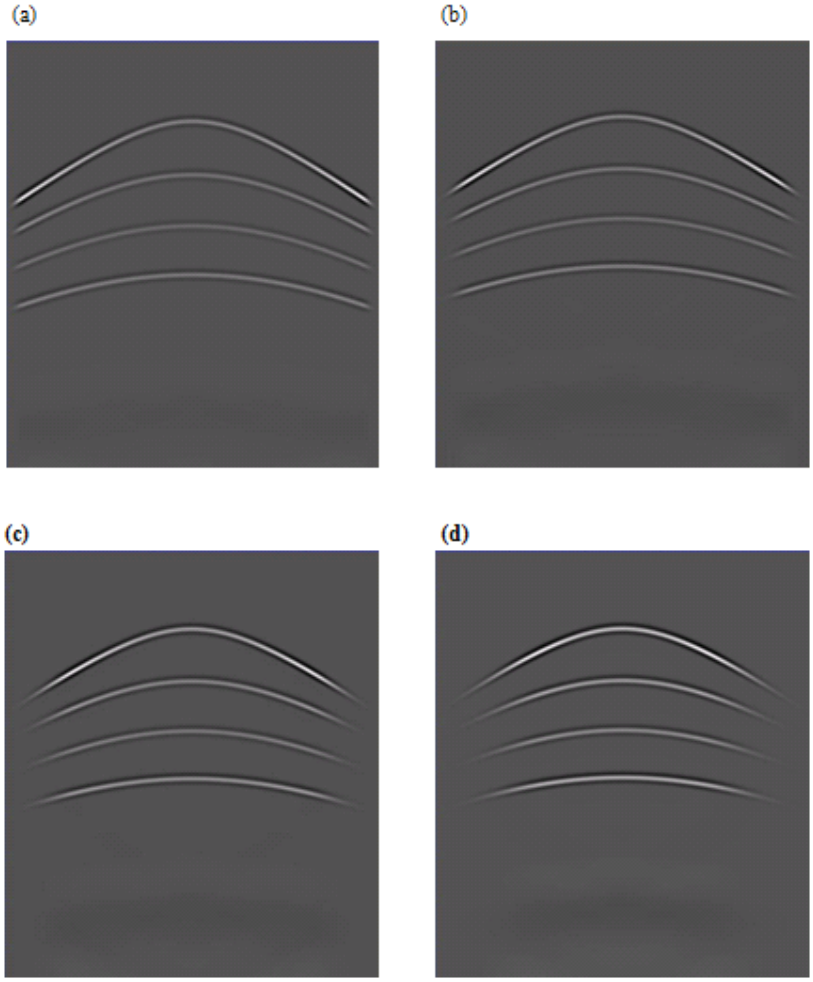


Figura 4.3.2 – Sismogramas utilizados para a migração reversa no tempo realizada. Os sismogramas foram atenuados em 50 (a), 100 (b), 200 (c) e 300 (d) traços nas laterais para reduzir os efeitos de bordas.

As imagens obtidas à partir da migração reversa no tempo utilizando cada uma dos sismogramas sintéticos com as suavizações apresentadas anteriormente ficaram equivalentes, porém este amortecimento influenciou de forma significativa as amplitudes da imagem para a análise de AVA, conforme pode-se observar no gráfico apresentado na figura (4.3.3) para a primeira interface do modelo.

Em todos os gráficos as amplitudes das imagens migradas foram reescaladas variando-se as curvas de amplitude para ter o mesmo coeficiente de reflexão no ângulo zero que o teórico com o objetivo de tornar possível a comparação com os resultados

analíticos. Este mesmo procedimento foi utilizado por CHATTOPADHYAY & McMECHAN (2008).

As linha vermelhas pontilhadas nos gráficos representam o ângulo de incidência máxima no qual pode-se obter informações de coeficiente de reflexão, considerando o dispositivo de aquisição empregado.

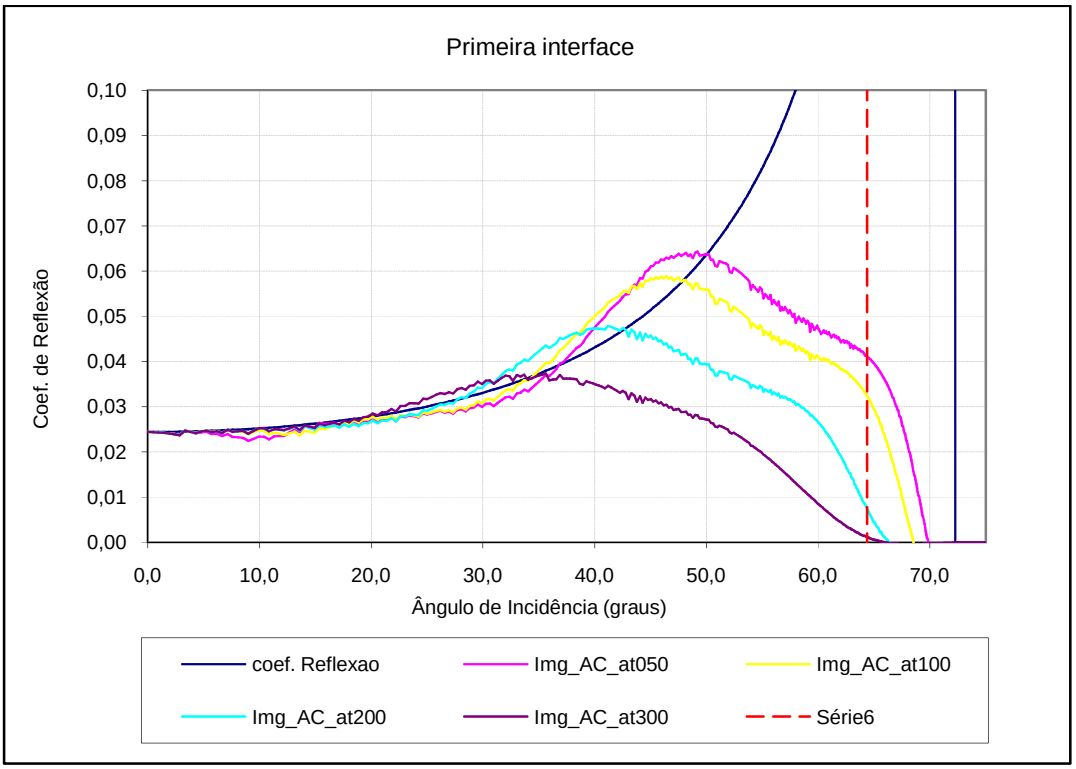


Figura 4.3.3 –Amplitudes na primeira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência. As curvas mostram a amplitudes obtidas das diversas imagens geradas com os sismogramas com diferentes suavizações, 50, 100, 200 e 300 traços.

Analisando o gráfico 4.3.3, nota-se que o aumento do número de pontos de suavização nas bordas do sismograma não melhorou a preservação das amplitudes e sim prejudicou a análise por causa da perda de informação devido à este amortecimento.

Por este motivo, nos esquemas de migração apresentados à seguir se utilizou o sismograma com suavização de 50 traços nas laterais em todas as simulações, mostrado na figura 4.3.2.a.

Foram analisados os resultados da aplicação nos processos de obtenção da Condição de Imagem e de Migração Reversa no Tempo a equação acústica da onda, a equação acústica não reflexiva da onda e a equação acústica da onda com separação do campo de ondas utilizando somente o campo descendente. As imagens em profundidade obtidas com cada um destes esquemas podem ser vistas nas figuras 4.3.4. Estas foram as imagem finais utilizadas para a obtenção dos coeficientes de reflexão nas interfaces, e sua subseqüente comparação com os coeficientes de reflexão teóricos obtidos analiticamente.

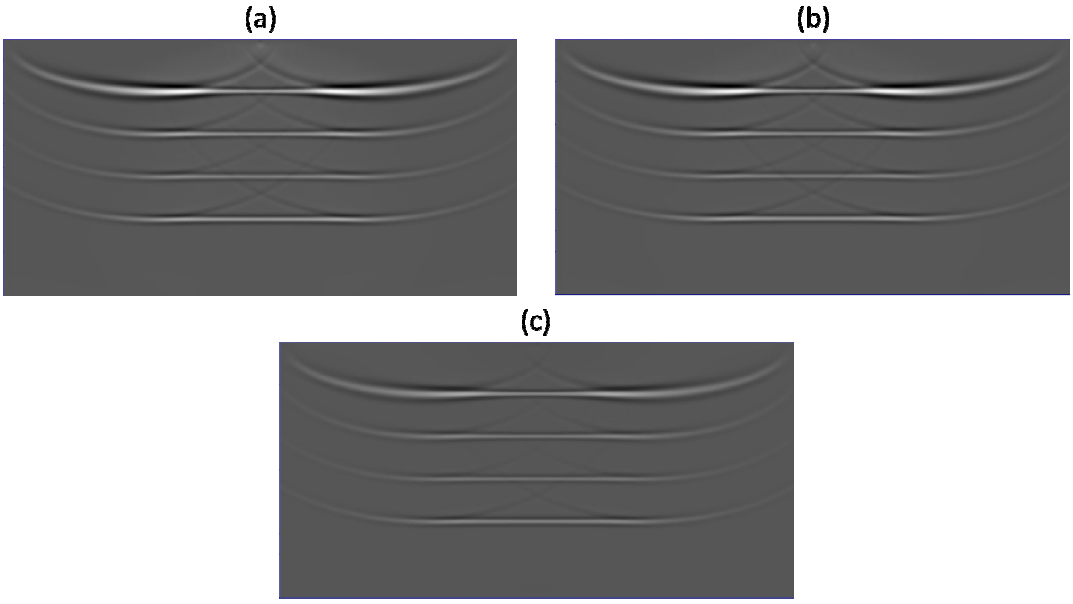


Figura 4.3.4 - Imagem e profundidade final obtida à partir do Processo de Migração Reversa no Tempo com a Implementação da Equação Acústica da Onda (a), a equação Acústica Não Reflexiva da Onda (b) e a Equação Acústica da Onda com Separação do Campo de Ondas (c) para o Modelo de cinco camadas paralelas.

As imagens obtidas se mostraram equivalentes devido à simplicidade de um modelo de camadas paralelas. Porém no esquema de separação do campo de ondas a imagem mostrou uma redução dos artefatos característicos do processo de migração.

A partir dos valores das amplitudes das imagens migradas (figura 4.3.4) foram gerados gráficos comparando-se os coeficientes de reflexão teóricos e as amplitudes nas interfaces da matriz da imagem em profundidade. Os cálculos dos coeficientes de

reflexão teóricos foram realizados analiticamente (vide seção 3.3.1). Para a obtenção dos ângulos de incidência foi utilizado o mesmo esquema apresentado na seção 3.3, sendo que para as segunda, terceira e quarta camadas o cálculo foi realizado considerando a geometria do modelo, ou seja, somando-se a distância de incidência da onda ao *offset*.

Nas figuras 4.3.5, 4.3.6, 4.3.7 e 4.3.8 estão plotados os gráficos de estudo de AVA para a primeira, segunda, terceira e quarta interfaces, respectivamente, do modelo com os três diferentes esquemas de migação reversa no tempo apresentados. O ângulo máximo para o qual se consegue obter informações de amplitude para cada interface, considerando o dispositivo de aquisição empregado do modelo utilizado, é 64,3º para a primeira interface, 50,3 º para a segunda interface, 40,2 º para a terceira interface e 33,2º para a quarta interface.

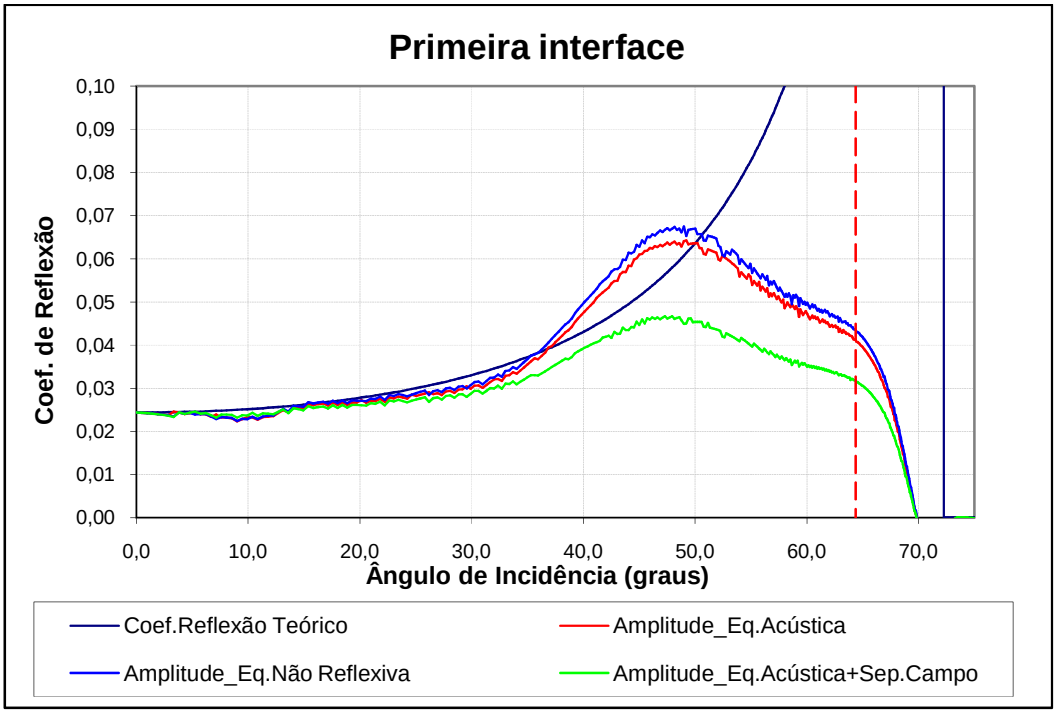


Figura 4.3.5 – Amplitudes na primeira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência.

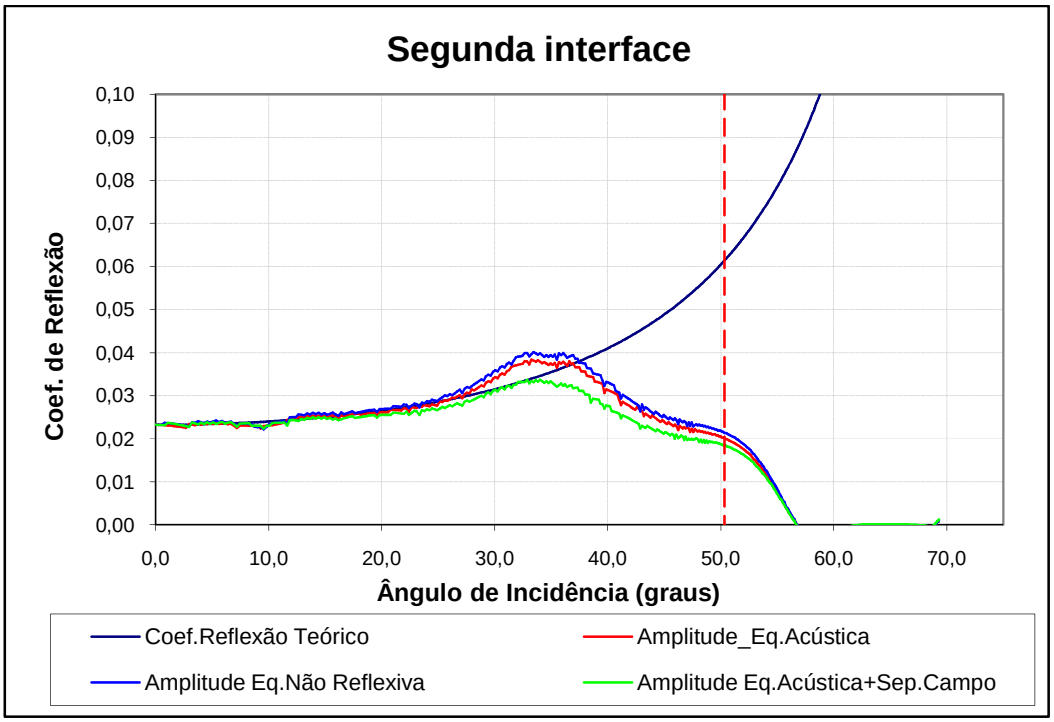


Figura 4.3.6 – Amplitudes na segunda interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência.

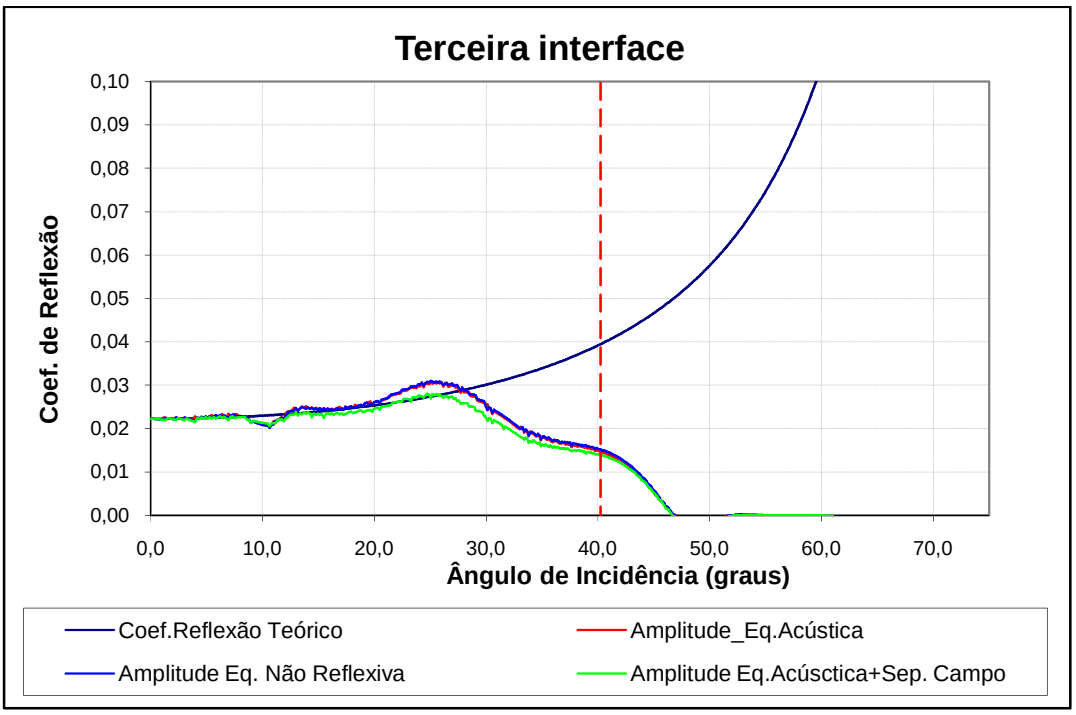


Figura 4.3.7 – Amplitudes na terceira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência.

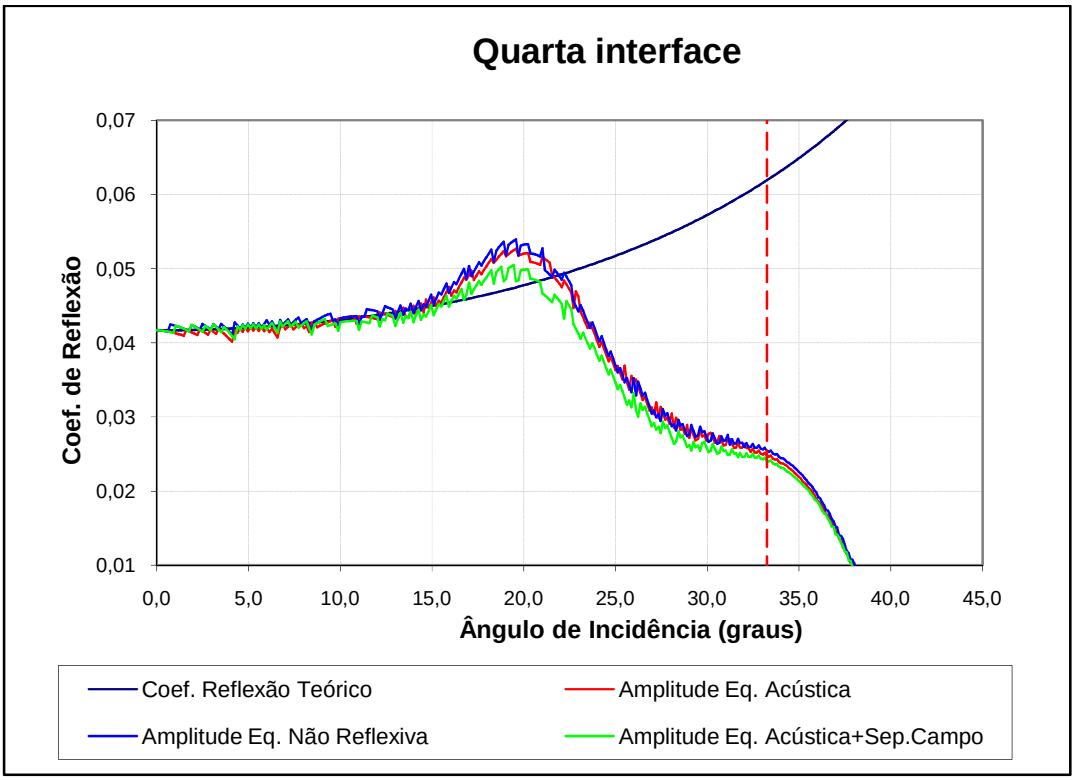


Figura 4.3.8 – Amplitudes na quarta interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência.

Nota-se que, quanto mais profunda a camada menor é o ângulo no qual se consegue obter informações do ponto de interesse. Isto se deve também ao fato de haver um *offset* máximo no qual é possível se obter informações das camadas em sub-superfície (vide seção 3.3.2).

Com o objetivo de analisar melhor esta questão do ângulo máximo de incidência onde se consegue obter informações do ponto de interesse, foi feito um estudo de como a distância da fonte (*offset*) influencia no ângulo máximo no qual se consegue obter informações para estudos de sísmica de reflexão no modelo de cinco camadas plano paralelas utilizado neste trabalho. Dependendo das variações do ângulo de incidência em função das velocidades das camadas podem não haver imageamento e informações de refletividade no ponto de interesse.

Não se pode esperar que dados sísmicos forneçam amplitudes verdadeiras de ângulos de incidência que não atinjam a superfície, ou seja não foram registrados nos

sismogramas durante as processos de aquisição ou modelagem sísmica. Esta idéia deve estar clara quando se deseja obter informações relacionadas com o ângulo de incidência à partir de dados sísmicos.

Foram originados gráficos no software Excel através da teoria de traçamento de raios, considerando o modelo proposto nesta seção. Na teoria dos raios, os coeficientes de reflexão e transmissão governam as amplitudes do raio quando este reflete ou se transmite através de uma interface. Isto ocorre porque na vizinhança da interface, esta se comporta como plano tangente e a frente de onda do raio incidente pode ser considerada, aproximadamente, uma frente de onda plana.

As figuras 4.3.9, 4.3.10, 4.3.11 e 4.3.12 mostram o esquema de traçamento de raios (*ray traycing)* para a primeira, segunda, terceira e quarta interfaces do modelo, respectivamente. Tais figuras foram geradas considerando um intervalo de ângulo de 5 graus e os raios foram gerados tendo-se como origem o ponto sobre o refletor em profundidade.

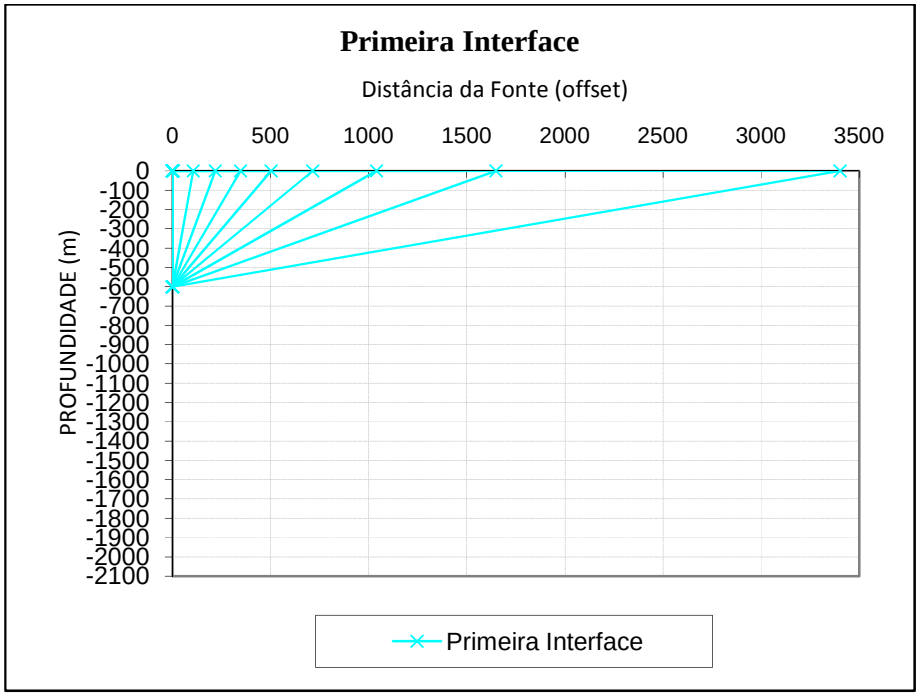


Figura (4.3.9) – Esquema de traçamento de raios para a primeira interface

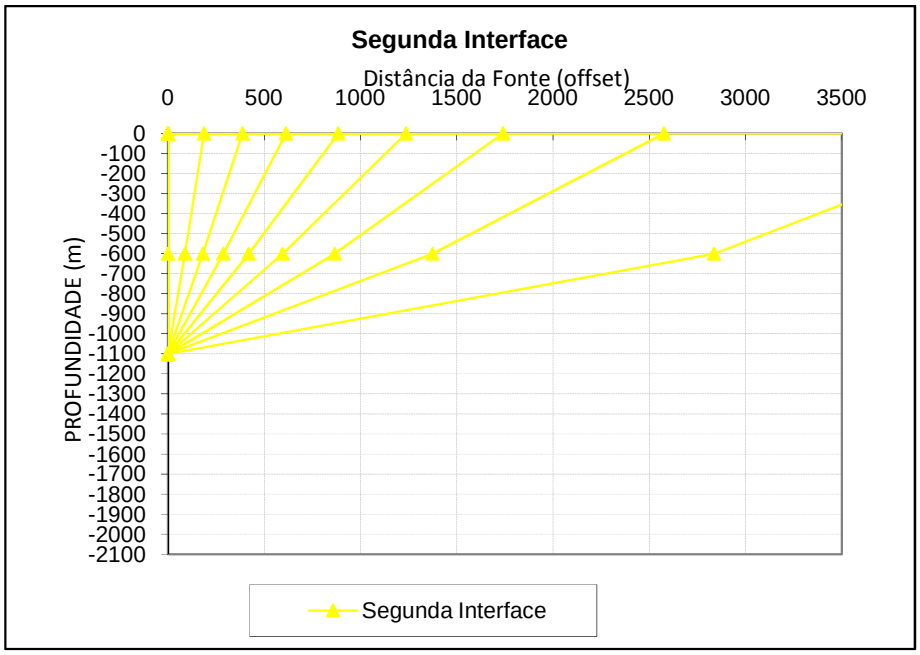


Figura (4.3.10) – Esquema de traçamento de raios para a segunda interface

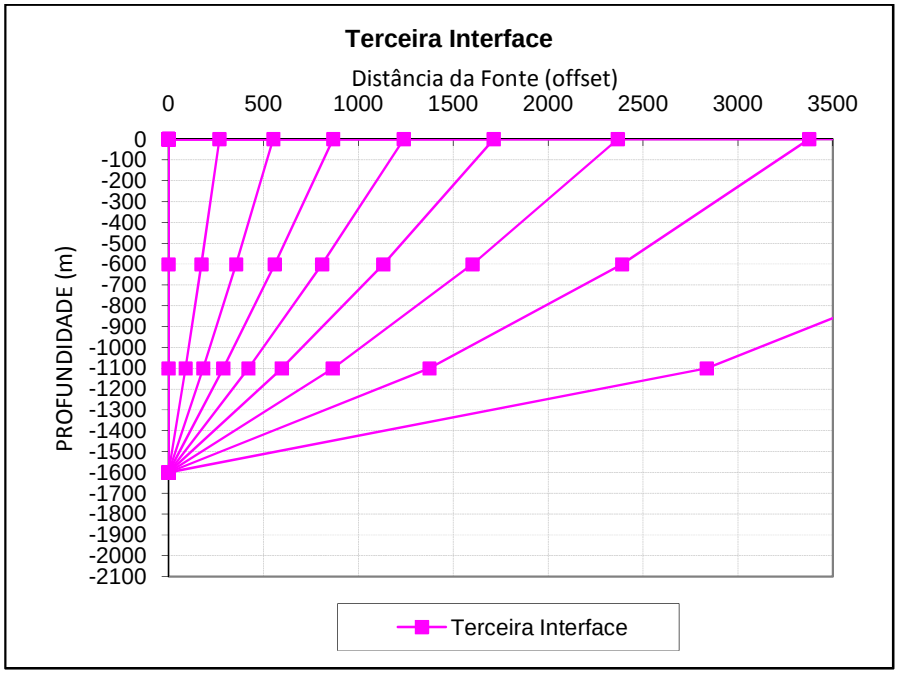


Figura (4.3.11) – Esquema de traçamento de raios para terceira interface

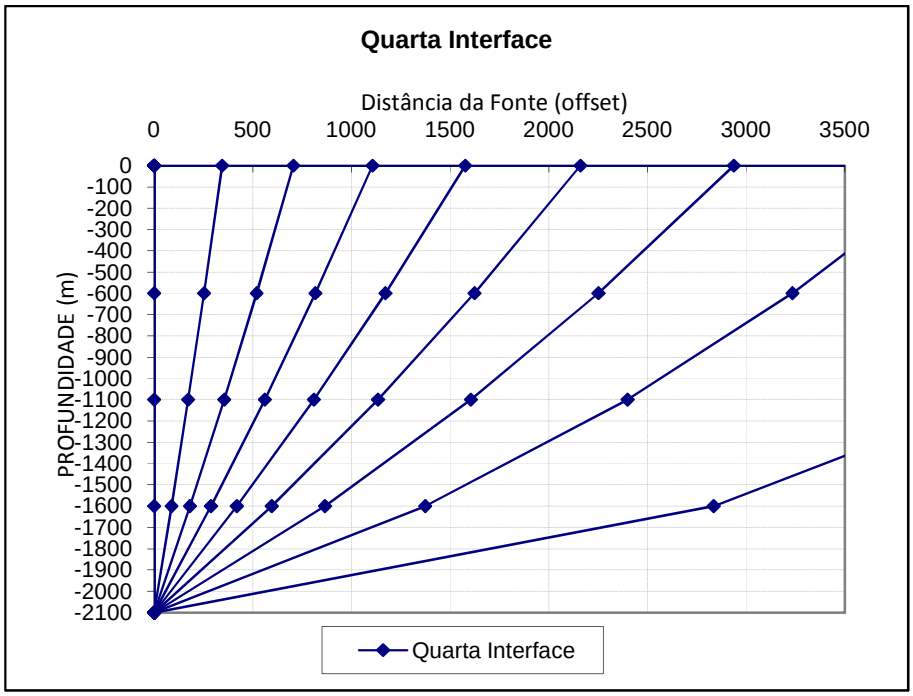


Figura (4.3.12) – Esquema de traçamento de raios para a quarta interface

Este estudo mostrou que a relação entre ângulos de incidência e as distâncias entre fonte e receptor influenciam fortemente na análise de AVA. E que não é possível se obter amplitudes de reflexão em posições acima de ângulos que não atinjam a superfície. Através deste tipo de análise é possível fornecer informações de definição dos parâmetros de aquisição necessários para a obtenção de informações de determinado ponto de interesse em sub-superfície.

Com base no estudo realizado, para a melhoria dos resultados obtidos e aumento deste ângulo, o modelo de velocidades foi estendido horizontalmente para uma análise de AVA mais condizente com os coeficientes de reflexão teóricos. Desta forma, o tamanho horizontal do modelo foi dobrado e o novo modelo ficou com 10000 m de comprimento e 3000 m de profundidade. A posição em profundidade das interfaces não foi alterada.

Nas figuras 4.3.14, 4.3.15, 4.3.16 e 4.3.17 estão plotados os gráficos de estudo de AVA para a primeira, segunda, terceira e quarta interfaces, respectivamente, do modelo estendido com os três diferentes esquemas de migação reversa no tempo apresentados. O ângulo máximo em que se consegue obter informações de amplitude para cada interface deste modelo, considerando o dispositivo de aquisição empregado

do modelo utilizado, é 76,5º para a primeira interface, 69,3º para a segunda interface, 61,6 º para a terceira interface e 54,8 º para a quarta interface. Nota-se que o aumento do comprimento do modelo influenciou de forma significatica o ângulo de incidência máximo o qual se pode ter informações do ponto de interesse observado nas diversas interfaces do modelo estendido.

Nota-se que na primeira interface da imagem ocorreu interferência dos artefatos da migração, o que prejudicou a análise de AVA. Isto pode ser visto claramente nas imagens migradas com os três esquemas de migração propostos na figura 4.3.13.

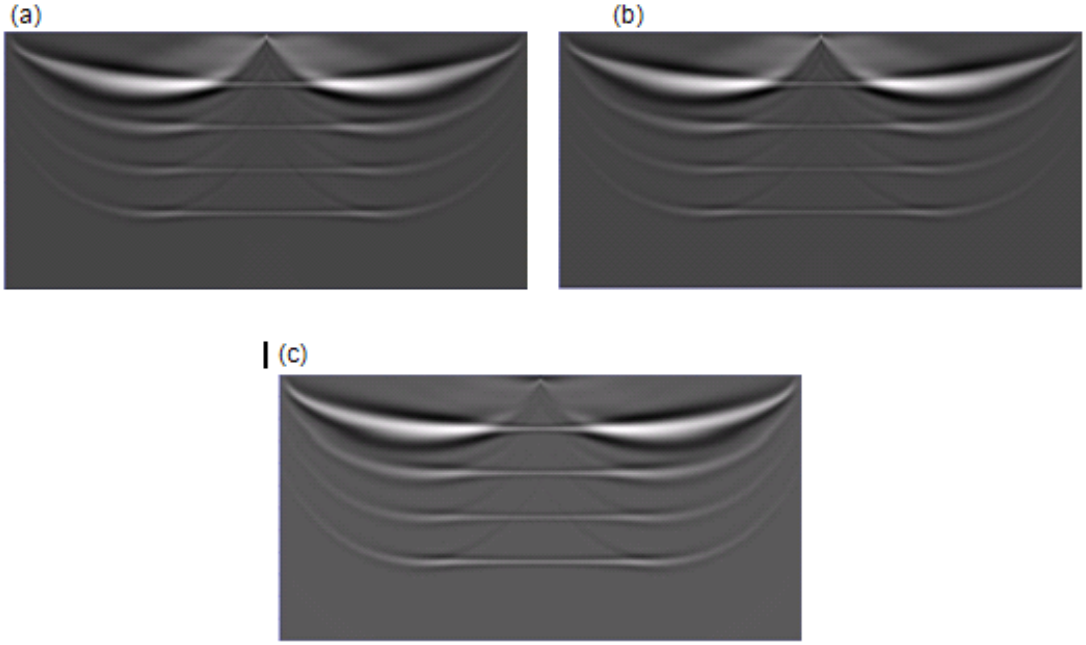


Figura 4.3.13 - Imagem e profundidade final obtida à partir do Processo de Migração Reversa no Tempo com a Implementação da Equação Acústica da Onda (a), a equação Acústica Não Reflexiva da Onda (b) e a Equação Acústica da Onda com Separação do Campo de Ondas (c) para o Modelo de cinco camadas paralelas extendido.

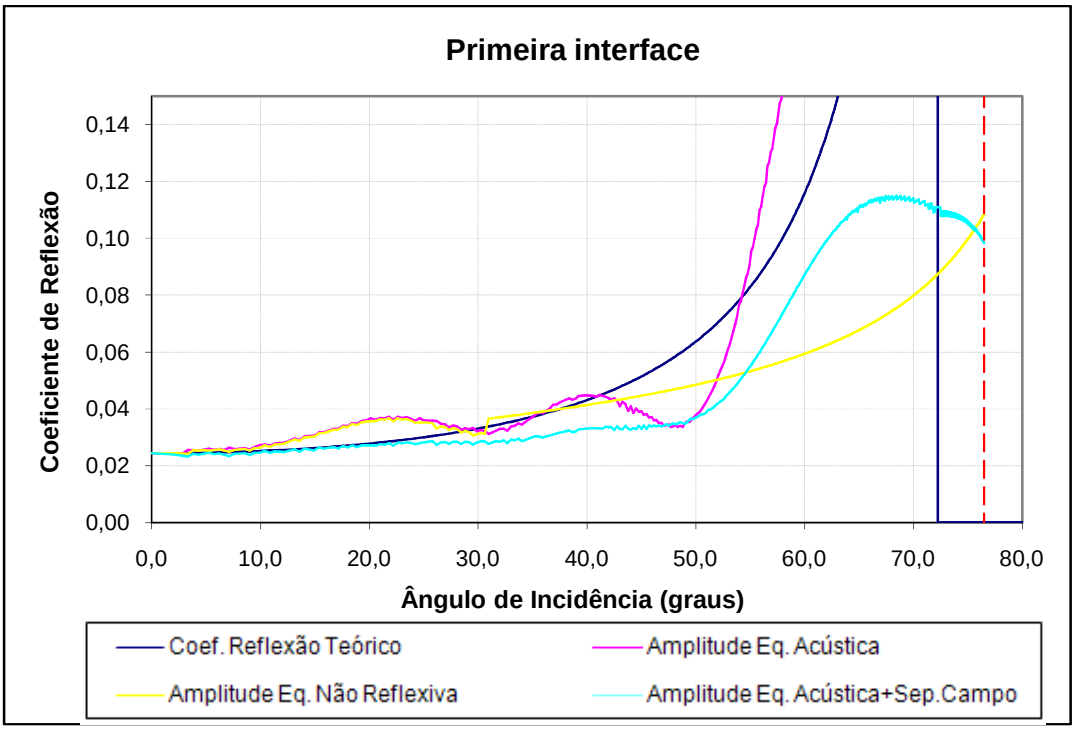


Figura 4.3.14 – Amplitudes na primeira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência para o modelo estendido.

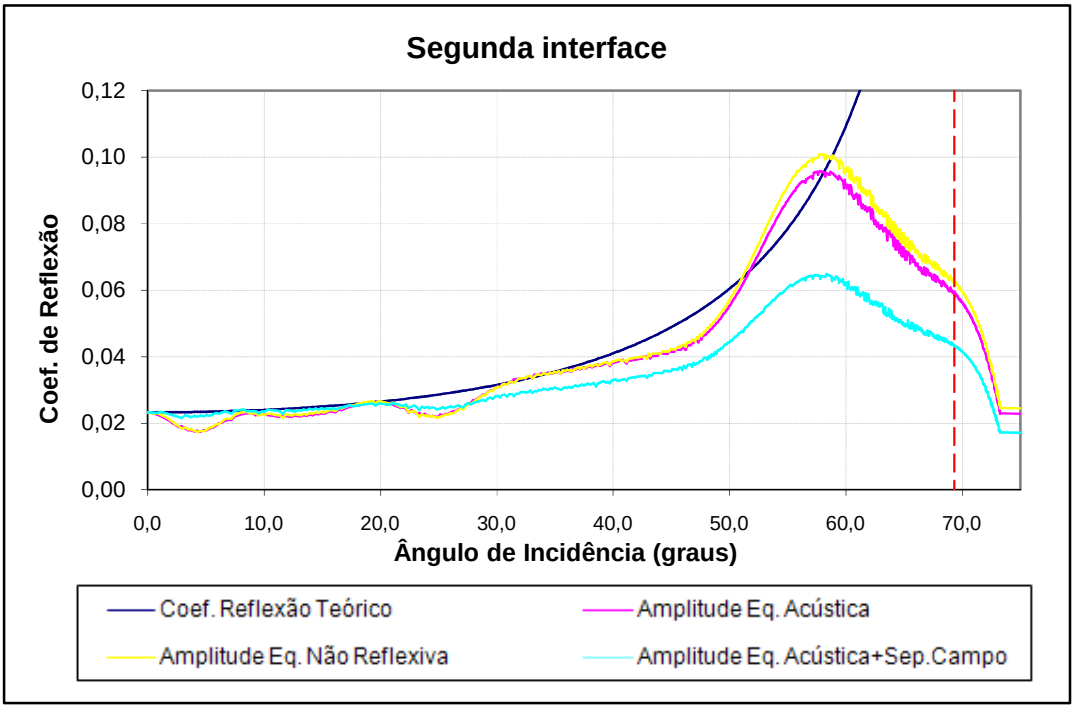


Figura 4.3.15 – Amplitudes na segunda interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência para o modelo estendido.

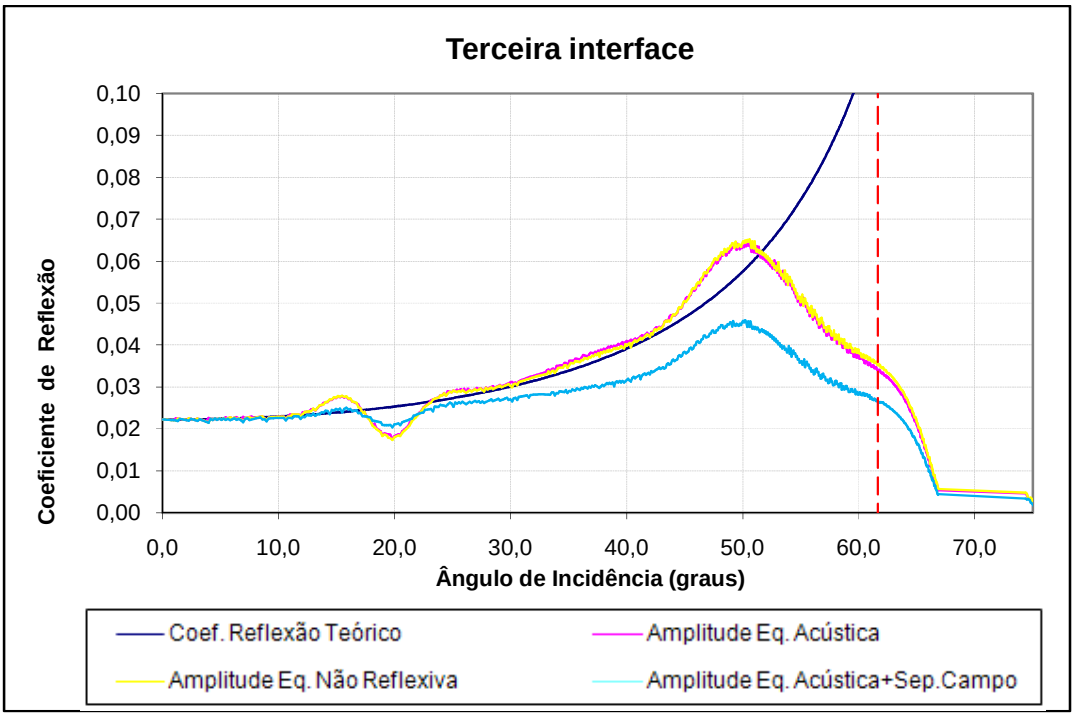


Figura 4.3.16 – Amplitudes na terceira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência para o modelo estendido..

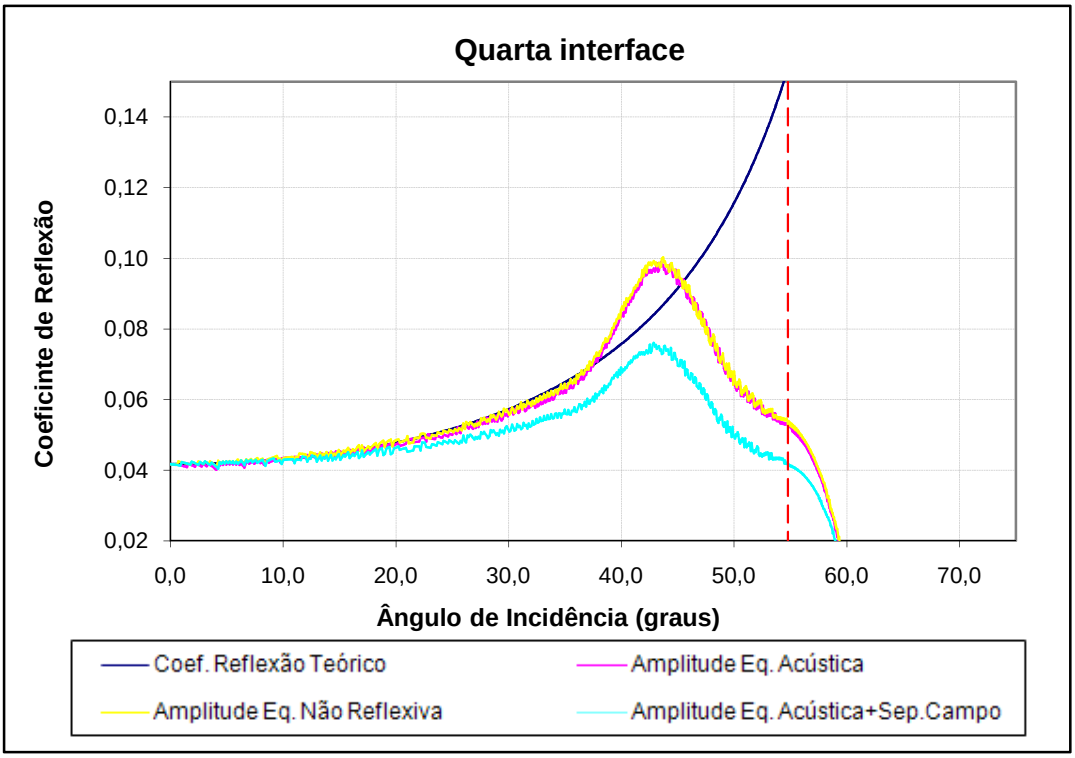


Figura 4.3.17 – Amplitudes na terceira interface da imagem migrada e coeficiente de reflexão analítico em função do ângulo de incidência para o modelo estendido.

Analisando-se os resultados obtidos, nota-se que para o modelo estendido se observou gráficos de AVA mais condizentes com os coeficientes de reflexão teóricos, principalmente nas camadas mais profundas onde não ocorreu interferência dos artefatos de migração nas amplitudes das imagens obtidas, e houve o aumento dos ângulos de incidência máxima em todas as camadas.

Assim como os resultados apresentados para o modelo de duas camadas paralelas, o uso da equação Acústica da Onda e da Acústica Não Reflexiva da Onda mostraram resultados equivalentes e condizentes com os coeficientes de reflexão teóricos, o que mostra que a Migração Reversa no Tempo com o uso destas duas equações para a extrapolação do campo de ondas pode ser utilizada para estudos e análises de AVA.

Já o esquema que utiliza a Equação Acústica da Onda com a implementação da Separação do Campo de Ondas na direção descendente não apresentou tão bons resultados. Isso se deve ao fato deste esquema ter sido utilizado contemplando somente as ondas que viajam verticalmente na direção descendente e não consideram-se as ondas que viajam em direções inclinadas.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões dos resultados apresentados, além de sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Resultados

Foram implementados algoritmos de Migração Reversa no Tempo utilizando três diferentes esquemas de implementação da Equação Completa da Onda, a Equação Acústica Não Reflexiva da Onda, a Equação Acústica da Onda e a Equação Acústica da Onda com Separação do Campo de Onda na direção descendente, os quais foram aplicados em três modelos de velocidades distintos. Dois desses modelos de velocidades são modelos simples com camadas plano paralelas, onde foram feitos gráficos de AVA para cada uma de suas interfaces. O objetivo desse estudo foi o de verificar se as amplitudes das seções migradas correspondiam aos coeficientes de reflexão obtidos analiticamente. Para o modelo de geometria geologicamente complexa com intrusão salina proposto pela SEG-EAGE foram aplicadas a Equação Acústica da Onda e a Equação Acústica Não Reflexiva da Onda com o objetivo de analisar a qualidade das imagens obtidas sem a preocupação com as amplitudes da seção migrada.

De forma geral, os resultados para as análises de AVA nos dois modelos de camadas paralelas utilizados apresentaram boa correlação com os resultados dos coeficientes de reflexão teóricos para as diversas interfaces dos modelos de velocidades analisados, evidenciando que as amplitudes oriundas dos esquemas de Migração

Reversa no Tempo podem ser adotadas para análises de amplitude versus ângulo (AVA) e amplitude versus *offset* (AVO).

Os resultados apresentados mostraram também, que o uso da Equação Acústica da Onda e da Equação Acústica Não Reflexiva da Onda no esquema de Migração Reversa no Tempo proporcionaram melhores resultados na preservação de amplitudes para análise de AVA do que o emprego do esquema de Separação do Campo de Ondas. Isso se explica devido ao fato de o esquema de Separação Direcional interferir na resposta da análise de AVA, pois considerou-se apenas ondas viajando verticalmente na direção descendente e não as ondas que viajam lateralmente.

Observou-se ainda que a influência da geometria do dispositivo de aquisição pode interferir de forma significativa nas análises de AVA. É necessário identificar o ângulo de incidência máximo no qual se obtém dados sísmicos na superfície, de acordo com o ponto refletor de interesse. Tal observação evidencia o cuidado que deve ser tomado para a correta definição dos parâmetros de aquisição de acordo com o ponto de interesse.

Nas migrações realizadas utilizando o modelo de sal da SEG-EAGE foram utilizadas a Equação Acústica da Onda e a Equação Acústica Não-Reflexiva da Onda. Não foi aplicado nenhum tipo de procedimento nas imagens finais nem nas seções sísmicas pré-empilhadas para a melhoria da qualidade das mesmas. Observando-se as imagens geradas à partir dessa duas implementações nota-se que a Equação Acústica Não-Reflexiva da Onda apresentou melhor qualidade na imagem e aumento das amplitudes da imagem do que a Equação Acústica da onda.

5.2. Trabalhos futuros

Como extensão deste trabalho, têm-se as seguintes sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- Aplicação dos diferentes esquemas utilizados neste trabalho para imageamento de estruturas complexas e subseqüente análise de AVA nestas estruturas.

- Extensão da análise realizada considerando-se meios elásticos empregando-se a Migração RTM para este meio.
- Avaliação do Método de Migração Reversa no Tempo na preservação de amplitudes com a aplicação da condição de imagem de Correlação Cruzada
- Aplicação da técnica de imageamento através da composição de sismogramas, tais como: *Areal Shot Profile* [BERKHOUT,1992], *Wave Synthesys* [BOECHAT,2007]
- Implementação da Equação Acústica da Onda com o esquema de Separação Direcional levando-se em conta a direção de propagação do campo de ondas ascendentes.
- Implementação da Equação Acústica da Onda para meios heterogêneos e realização de estudo de AVA nas imagens resultantes.
- Realização de estudos de iluminação ([HUBRAL,1997], [ALVES *et al*] e [LUO,2004]) em conjunto com análises de AVA verificando a possibilidade de se efetuar as duas análises de forma conjunta.

Referências Bibliográficas

ALDUNATE, G. C., PESTANA, R. C., STOFFA, P. L., 2004. "*Migração Sísmica 2-D Pré-Epilhamento em Profundidade com Operadores de Extrapolação "Split-Step'"*". Revista Brasileira de Geofísica, 22, 153-161.

ALFORD R, KELLY K & BOOR D. 1974. "*Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation*". Geophysics, 6, 834-842.

ALVES, C.G., BULCÃO, A., FILHO, D. M. S., THEODORO, C. E., SANTOS, L. A., GALLOTTI, M. A. G., 2008. "*Target Illumination Analysis Using Wave Equation*", SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting, pp. 163-167.

ANDRADE, A. C. J., PESTANA, R., VIVAS, F. A.., 2007. "*Migração de Turning Waves Através das Equações da Onda Unidirecionais: Implementação da Migração PSPI para Turning Waves*". 10º Congresso Internacional da SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil.

BAYSAL, E., KOSLOFF, D. & SHERWOOD, J. W. C., 1983. "*Reverse Time Migration*", Geophysics, 48, pp. 1514-1525.

BAYSAL, E., KOSLOFF, D. & SHERWOOD, J. W. C., 1984, "*A two-way nonreflecting wave equation*", Geophysics, 49, pp.132-14.

BERKHOUT, A. J., 1992. "*Areal Shot Record Technology*", Journal of Seismic Exploration , 1, pp.251-264.

BLACKSTOCK, D. T., 2000. "*Fundamentals of Physical Acoustics*", J. Wiley, USA.

BOECHAT, J. B., 2007. "*Migração Reversa no Tempo Empregando 3-D Orientada ao Alvo por Síntese de Frentes de Onda*". Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

BORDING, R.P., LINES, L.R.., LINES, L.R., 1997. "*Seismic Modeling and Imaging whit the Complete Wave Equation*", Course Notes Series, n. 8, Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma, USA.

BULCÃO, A., SOARES FILHO, D.M., MANSUR, W.J., 2003a. "*Cabo de Fundo Oceânico (O.B.C): Emprego de Múltiplas para o Imageamento de Estruturas Complexas em Sub-uperfície*". 8º Congresso Internacional da SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil.

BULCÃO, A., SOARES FILHO, D.M., MANSUR, W.J., 2003b. "*Migração Reversa no Tempo com Operadores Elásticos: Imageamento dom Vários Modos de Ondas*". 8º Congresso Internacional da SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, Brasil.

BULCÃO, A., 2004. "*Modelagem e Migração Reversa no Tempo Empregando Operadores Elásticos e Acústicos*". Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

BULCÃO, A., SOARES FILHO, D. M., MANSUR, W. J., 2007. "*Improved Quality of Images Using Reverse Time Migration*", SEG/San Antonio Annual Meeting, pp. 2407-2411.

BURNETT, R.C., 1989. "*Seismic amplitude anomalies and AVO analysis at Mestena Grande Field*", SEG Expanded Abstracts, pp. 690-694.

CARCIONE, M.J., FINETTI, R.I., GEI, D., 2003. "*Seismic Modeling Study of Earth's Deep Crust*", Geophysics, 68, pp. 656-664.

CASTAGNA, J.P., BACKUS, M.M., 1993."*Offset-dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis*". IG series, V.8. SEG.

CERJAN, C., KOSLOFF, D., KOSLOFF, R., e RESHEF, M., 1985. "*A Nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equation*". Geophysics, 50, pp. 705-708.

CHATTOPADHYAY, S., McMECHAN, G. A., 2008. "*Imaging conditions for prestack reverse-tim*e *migration*". Geophysics , 73, pp. 81-89.

CUNHA, P. E. M., 1997. "*Estratégias Eficientes Para Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento 3-D em Profundidade pelo Método das Diferenças Finitas*", Dissertação de Mestrado da Universidade Federal da Bahia, CPGG/UFBA, Bahia, Brasil.

DENG, F., McMECHAN, G., 2007. "*True Amplitude prestack depth migration*", Geophysics, 72, pp. 155-166.

DUARTE, O. O., 2003. "*Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia*", Ed. Petrobrás, 2ª ed.

FARIA, E. L., 1986. "*Migração Antes do Empilhamento Utilizando Propagação Reversa no Tempo*", Dissertação de Mestrado da Universidade Federal da Bahia, CPGG/UFBA, Bahia, Brasil.

FICHMAN, S., 2005. "*Modelagem Sísmica em Meios Acústicos, Elásticos e Poro-Elásticos*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

GELFAND, V., NGUYEN, H., LARNER, K., WHITMORE, D., 1986. "*Seismic lithologic modeling of amplitude versus offset data*", SEG Expanded Abstracts.

GRAFF, K.F., 1975. "*Wave Motion in Elastic Solids*", Dover Publications, INC., Nova York.

GRAY, S.H., ETGEN, J., DELLINGER, J., WHITMORE, D., 2001. "*Seismic Migration Problems and Solutions*", Geophysics, 66, pp.1622-1640.

HUBRAL, P., HOECHT, G., JAEGER, R., 1999. "*Seismic Illumination*", The Leading Edge, 18, pp.1268-1271.

LUO, M., J. CAO, X. XIE, R.-S. WU, 2004. "*Comparison of illumination analyses using one-way and full-wave propagators*", 74th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 67–70.

LOEWENTAL, D., MUFTI, I. R., 1983. "*Reverse time migration in the spatial frequency domain*", Geophysics, 48, 627-635.

LOEWENTAL, D., HU, L., 1991. "*Two Methods for computing the imaging condition for common-shot prestak migration*", Geophysics, 56, 380-399.

MARTINS, E. O., 2003. "*Modelagem Sísmica em Meios Complexos*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

McMECHAN, G. A., 1983. "*Migration by extrapolation by time dependent boundary values*", Geophysical Prospecting, 31, 413-420.

MUFTI, I.R., 1990. "*Large Scale Three-Dimensional Seismic Models and their Interpretative Significance*", Geophysics, 55, pp. 1166-1182.

NUSSENZVEIG, H.M., 1996."*Curso de Física Básica – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*". Ed.Edgard Blücher, 3ªed., V. 2.

OSTANDER, W.J., 1984. "*Plane wave reflection coefficients for gas and sands at nonormal angles of incidence* ", Geophysics, 49, pp. 1637-1648.

PINHEIRO, S. T., 2007. "*Estudo Comparativo entre Dois Métodos de Migração - RTM e PSPI - Aplicado a Modelos Acústicos*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RESNICK, J. R., LARNER, K. 1987. "*Amplitude versus offset analysis in the presence of dip*", SEG Expanded Abstracts, 617-620.

REYNOLDS, A. C., 1978. "*Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems*", Geophysics, 43, 1099-1110.

SANTOS, R.H.M., 2002. "*Modelagem acústica bidimensional usando diferentes parametrizações do campo de velocidade*".

SAVA, P., HILL, S. J., 2009. "*Overview and classification of wavefield seismic imaging methods*", The Leading Edge, 28, 170-183.

SILVA, R. P.. 1995. "*Uso da migração reversa no tempo para estimar velocidades e migrar* "*turning waves*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

SILVA, B. M., 2006. "*Migração RTM, PSPI e SPLIT-STEP de Registros de Múltiplas Fontes: Imageamento Sísmico Em Meios Com Altos Contrastes de Velocidade*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, J. J., 2002. "*Migração Reversa no Tempo: Resolução em Levantamentos Sísmicos Interpoços*". Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, J. J., 2009. "*Migração Reversa no Tempo Na Determinação da Amplitude de Reflexão em Função do Ângulo de Incidência*". Tese de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SNYDER, A.G., KELEY, D.J., WROLSTAD, K.H. 1989. "*Direct detection using AVO, Central Graben, North Sea*", SEG Expanded Abstracts, 700-701.

THOMAS, J. E., 2001. "*Fundamentos de Engenharia de Petróleo*". Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.

VASQUEZ, A. C. R., OLIVEIRA, A. S., TYGEL, M., 2003. "*Recuperação de Atributos Sísmicos Utilizando Migração para Afastamento Nulo*". Brasilian Journal of Geophysics, 20, 59-65.

YU, G., 1985. "*Offset amplitude variation and controlled amplitude processing*", Geophysics, 50, 2697-2708.

Apêndice 1

Modelagem sísmica

A modelagem sísmica é uma das ferramentas mais efetivas na exploração e explotação de petróleo e gás. Em resumo, a modelagem sísmica objetiva [FICHMAN,2005]:

i. avaliar as possibilidades e limitações do método sísmico;
ii. otimizar os parâmetros de aquisição com base no interesse geológico;
iii. gerar dados sísmicos sintéticos para a avaliação de novas metodologias de inversão e imageamento;
iv. verificar o quanto os modelos sintéticos honram os dados sísmicos de campo, na etapa de interpretação.

Problemas de modelagem na exploração geofísica geralmente lidam com estruturas ou estratificações complexas, caracterizadas por interfaces irregulares separando unidades litológicas. Desta forma, para que um algoritmo de modelagem numérica seja considerado eficaz ele deve ao contrário de uma opção trabalhosa de múltiplos processamentos sobre várias regiões homogêneas conectadas pelas condições de contorno, aproximar estas condições nas interfaces automaticamente.

O método de solução por diferenças finitas [ALFORD ET AL, 1974] para a equação da onda acústica, princípio básico dos processos de modelagem e migração, é a abordagem mais difundida, sendo geralmente tomada como método de prova para a comparação com resultados de novos métodos propostos.

O método de discretização por diferenças finitas, utilizado nesta dissertação, será descrito no próximo tópico.

A.1.1. Modelagem Acústica 2D por Diferenças Finitas

Na modelagem acústica são consideradas apenas as ondas compressionais, já que em um meio acústico não há a propagação de ondas cisalhantes.

Para a reprodução da propagação de ondas acústicas em sub-superficíe é utilizada a equação diferencial da onda em duas dimensões, que representa o comportamento do campo de onda acústico com variações no espaço e no tempo, e também é conhecida como equação acústica da onda:

$$\frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial t^2} = 0 \qquad (A.1.1)$$

onde *P(x,z,t)* é o campo de onda, *x* e *z* são as coordenadas espaciais, *t* é a coordenada temporal e *c* é o módulo da velocidade.

Porém a equação (A.1.1) é homogênea, para o caso de ausência de fontes. E na Modelagem Sísmica é necessária uma fonte para gerar o pulso sísmico, que com a solução das equações, será propagado no modelo. Para isso é utilizada uma fonte impulsiva $f(t)$. E a equação da onda com a presença do termo fonte fica:

$$\frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 P(x,z,t)}{\partial t^2} = f(t)\delta\left(x - x_f\right)\delta\,(z - z_f) \qquad (A.1.2)$$

onde a posição da fonte é representada por x_f e z_f e a função $\delta\left(x - x_f\right)$ e $\delta\,(z - z_f)$ é a função delta de Dirac que representa uma função impulsiva na posição de detonação da fonte.

Para simular o termo fonte nas modelagens numéricas é utilizada uma função matemática (*f(t)*) que apresenta determinada variação ao longo do tempo. Podem ser utilizados diversos tipos de fontes para tal fim, porém é conveniente que estas funções possuam algumas características especiais. Dentre estas características está o fato de que esta função matemática deve ser limitada no domínio do tempo e no domínio da freqüência. Isto é, esta função possui valores não nulos apenas em uma determinada região do seu domínio. A limitação no domínio do tempo tem o intuito de simular uma fonte explosiva e a limitação no domínio da freqüência tem por objetivo manter o controle sobre a freqüência máxima a qual o modelo numérico está sujeito, denominada freqüência de corte (f_{corte}). O grau de refinamento da discretização é influenciado por esta freqüência.

A função fonte utilizada para se gerar os sinais sísmicos, neste trabalho, é a derivada segunda da Gaussiana. Esta função representa uma fonte explosiva usada na investigação sísmica e é limitada em tempo e em freqüência. Este tipo de função foi implementada anteriormente por [CUNHA,1997]. A equação (A.1.3) abaixo é a função fonte $f(t)$, derivada segunda da Gaussiana:

$$f(t) = [1 - 2\pi(\pi.f_c.t)]^2 e^{-\pi(\pi.f_c.t)^2} \qquad (A.1.3)$$

onde f_c é a freqüência central da fonte.

A figura (A.1.1), abaixo, representa a fonte sísmica do modelo, onde o eixo x é a amplitude e o eixo y o número de passos de tempo:

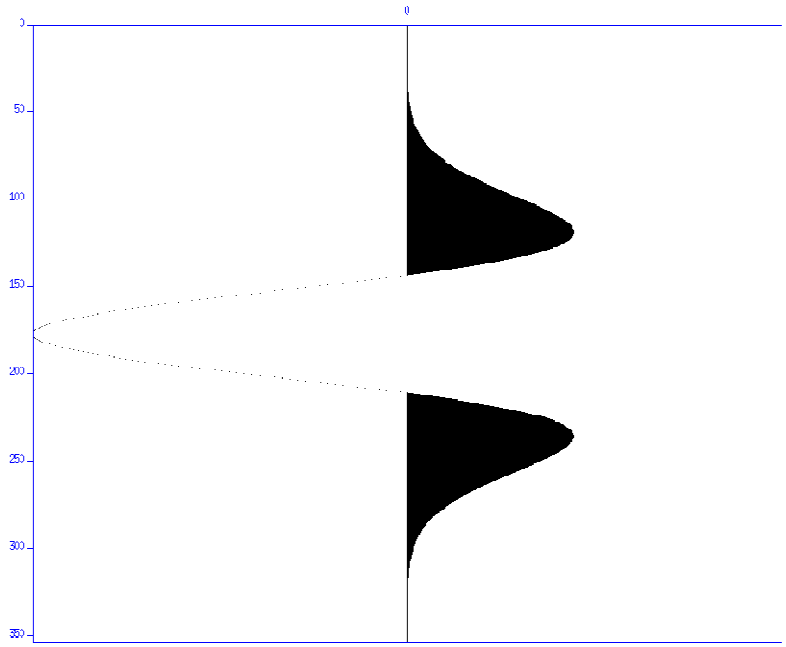


Figura A.1.1 – Função fonte – Derivada segunda da Gaussiana.

Para que a simulação possa ser computacionalmente possível, o modelo utilizado precisa ter limites dimensionais, o que gera reflexões indesejáveis nas bordas. Por isso se faz necessário um tratamento de bordas absortivas para compensar essa descontinuidade artificial. Neste trabalho o tratamentos das bordas utilizado foi o proposto por [CERJAN,1985] e [REYNOLDS,1978]. As condições propostas por CERJAN e REYNOLDS utilizadas juntas se mostram bastante efetivas no tratamento das bordas.

Para a discretização da equação acústica da onda é utilizado o Método de Diferenças Finitas (MDF).

Métodos de soluções numéricas por diferenças finitas para a equação da onda foram estudados por ALFORD (1974), que comparou os resultados dos trabalhos usando o método de diferenças finitas (MDF) com resultados analíticos. O MDF atinge um alto grau de aproximação, desde que se tenha uma grade suficientemente fina.

Neste trabalho emprega-se a formulação tradicional do MDF, a qual utiliza uma malha de pontos regularmente espaçados para a discretização do domínio. É feita uma aproximação das derivadas espaciais e temporais por operadores de Diferenças Finitas

obtidos por uma expressão de Taylor truncada, usando pontos vizinhos em diferenças ponderadas. Este método possibilita o desenvolvimento de algoritmos, com base na equação da onda, para o estudo de geometrias complexas [SANTOS,2002].

No MDF podem ser obtidas diferentes expressões para as aproximações das derivadas, de acordo com a ordem do erro cometido por essas aproximações.

Na discretização das derivadas parciais das equações, foram utilizadas aproximações em décima e segunda ordem, respectivamente para as derivadas espaciais e temporais. Para a dedução dessas fórmulas, pode-se considerar, sem perda de generalidade, o caso unidimensional com uma malha de pontos igualmente espaçados. Assim aproxima-se um domínio de natureza contínua por um grupo de pontos discretos.

Depois da discretização a função é expandida em Série de Taylor em torno de um ponto "i", considerando diferentes pontos em sua volta de acordo com a aproximação desejada. Assim, são obtidas equações que envolvem os valores da função e suas derivadas em diferentes pontos da malha (*grid*). Simplificando essas equações são obtidas expressões relacionando os valores das derivadas com o da função em pontos diferentes.

As expressões abaixo representam as aproximações para as derivadas de primeira ordem, ao longo da direção x, em torno do ponto "i", obtidas através da expansão em Série de Taylor, retiradas de [BULCÃO,2004]:

$$\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=i} = \frac{1}{\Delta x}(f_i - f_{i-1}) + O(\Delta x) \qquad diferenças\ atrasadas \qquad (A.1.4)$$

$$\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=i} = \frac{1}{\Delta x}(f_{i+1} - f_i) + O(\Delta x) \qquad diferenças\ adiantadas \qquad (A.1.5)$$

$$\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=i} = \frac{1}{2\Delta x}(f_{i+1} - f_{i-1}) + O(\Delta x^2) \qquad diferença\ central \qquad (A.1.6)$$

$$\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=i} = \frac{1}{12\Delta x}(-f_{i+2} + 8f_{i+1} - 8f_{i-1} + f_{i-2}) + O(\Delta x^4) \qquad (A.1.7)$$

Já as expressões abaixo representam as aproximações para as derivadas de segunda ordem:

$$\left.\frac{d^2f}{dx^2}\right|_{x=i} = \frac{1}{\Delta x^2}\left(f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}\right) + O(\Delta x^2) \qquad (A.1.8)$$

$$\left.\frac{d^2f}{dx^2}\right|_{x=i} = \frac{1}{12\Delta x^2}\left(-f_{i+2} + 16f_{i+1} - 30f_i + 16f_{i-1} - f_{i-2}\right) + O(\Delta x^4) \quad (A.1.9)$$

$$\left.\frac{d^2f}{dx^2}\right|_{x=i} = \frac{1}{12\Delta x^2}\left(-f_{i+3} - 27f_{i+2} + 270f_{i+1} - 490f_i + f_{i-3} - 27f_{i-2} + 270f_{i-1}\right) + O(\Delta x^6) \qquad (A.1.10)$$

$$\left.\frac{d^2f}{dx^2}\right|_{x=i} = \frac{1}{25200\Delta x^2}\left(+8f_{i+5} - 125f_{i+4} + 1000f_{i+3} - 6000f_{i+2} + 4200f_{i+1} - 73766f_i + 8f_{i-5} - 125f_{i-4} + 1000f_{i-3} - 6000f_{i-2} + 4200f_{i-1}\right) + O(\Delta x^{10}) \qquad (A.1.11)$$

É possível fazer a analogia dessas expressões para obtê-las nas outras direções, sendo que considera-se o espaçamento da malha (*grid*) Δx = Δz = h, para o caso de duas dimensões espaciais. Estas aproximações devem ser substituídas na equação acústica da onda, na ordem desejada, para a implementação da modelagem acústica computacional. Para o caso muito utilizado pelos pesquisadores, de quarta ordem no espaço e segunda ordem no tempo a equação da onda discretizada (A.1.8), fica:

$$P_{i,k}^{n+1} = -\frac{1}{12}C(i,k)\left[P_{i-2,k}^n + P_{i+2,k}^n + P_{i,k-2}^n - 16\left(P_{i-1,k}^n + P_{i+1,k}^n + P_{i,k-1}^n + P_{i,k+1}^n\right) + 60P_{i,k}^n\right] - P_{i,k}^{n-1} + 2P_{i,k}^n + f(n)\delta\left(x - x_f\right)\delta\left(z - z_f\right) \qquad (A.1.12)$$

Onde

$$C(i,k) = \left(\frac{V_{i,k}\Delta t}{h}\right)^2$$

Sendo P(x,z,t), o campo de onda acústica.

E para o caso em décima ordem no espaço e segunda ordem no tempo, que foi utilizado neste trabalho, a equação da onda discretizada (A.1.9), fica:

$$\begin{aligned} P_{i,k}^{n+1} = -C(i,k)\big[&+8P_{i+5,k}^{n} - 125P_{i+4,k}^{n} + 1000P_{i+3,k}^{n} - 6000P_{i+2,k}^{n} + 4200P_{i+1,k}^{n} \\ &- 73766P_{i,k}^{n} + 8P_{i-5,k}^{n} - 125P_{i-4,k}^{n} + 1000P_{i-3,k}^{n} - 6000P_{i-2,k}^{n} \\ &+ 4200P_{i-1,k}^{n} + 8P_{i,k+5}^{n} - 125P_{i,k+4}^{n} + 1000P_{i,k+3}^{n} - 6000P_{i,k+2}^{n} \\ &+ 4200P_{i,k+1}^{n} - 73766P_{i,k}^{n} + 8P_{i,k-5}^{n} - 125P_{i,k-4}^{n} + 1000P_{i,k-3}^{n} \\ &- 6000P_{i,k-2}^{n} + 4200P_{i,k-1}^{n}\big] - P_{i,k}^{n-1} + 2P_{i,k}^{n} \\ &+ f(n)\delta(x - x_f)\delta(z - z_f) \end{aligned} \qquad (A.1.13)$$

Onde

$$C(i,k) = \frac{12}{25200}\left(\frac{V_{i,k}\Delta t}{h}\right)^2$$

Quando o campo de onda refletido retorna à superfície ele é gravado em um sismograma para posteriormente ser efetuada a migração.

A.1.2. Condições de Estabilidade e Dispersão Numérica

Como no MDF o cálculo das derivadas envolvidas nas equações diferenciais é feito através de aproximações de maior ou menor precisão, pode ser gerado erro no resultado numérico. No caso da equação da onda esse erro é chamado de dispersão numérica e se apresenta na forma de oscilações no pulso sísmico.

As dimensões da malha são de suma importância para que a dispersão fique dentro de limites aceitáveis na simulação e para que não ocorra instabilidade nas soluções numéricas obtidas através do Método das Diferenças Finitas.

Para que não ocorra excessiva dispersão de energia [MUFTI,1990] o máximo valor do espaçamento da malha deve ser satisfeito pela relação (A.1.1), abaixo:

$$h \leq \frac{V_{min}}{\alpha . f_{corte}} \qquad (A.1.14)$$

Onde:

h é o espaçamento entre os pontos da malha, considerando-se $h = \Delta x = \Delta z$

Δt é o intervalo de tempo para o avanço da solução numérica

f_{corte} é freqüência de corte da fonte sísmica

V_{min} é a mínima velocidade de propagação presente no modelo analisado.

α é o numero mínimo de pontos da malha por comprimento de onda, considerando os valores de velocidade mínima de propagação e a freqüência de corte.

Neste trabalho foi feito um estudo à fim de avaliar o efeito da dispersão de energia em um modelo de camada única com velocidade igual à 2500 m/s e freqüência igual à 45Hz posicionada no centro do modelo. Para isso o parâmetro α foi variado de 2 à 6. As figuras A.1.1 à A.1.6 mostram os snapshots correspondentes à cada α :

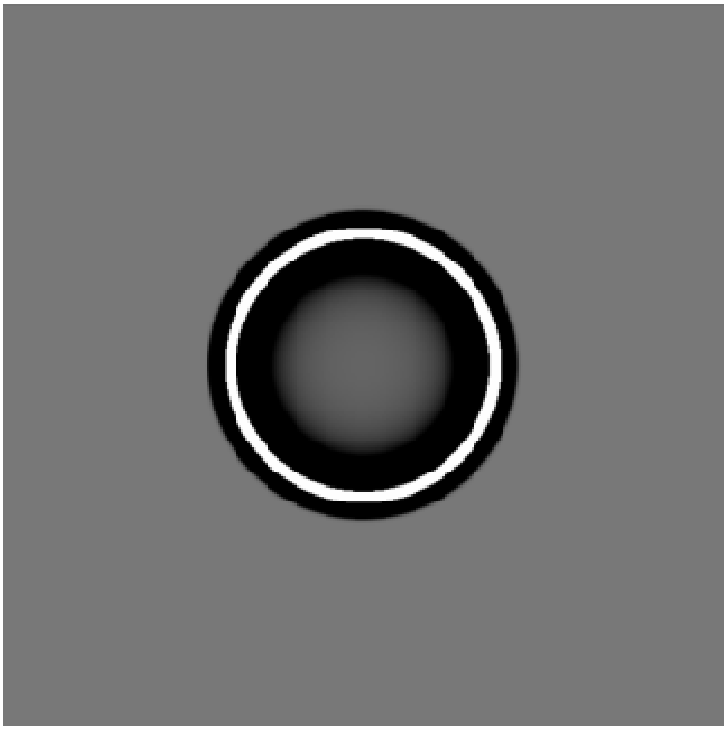


Figura A.1.1.: Snapshot em modelo homogêneo com o parâmetro α=6.

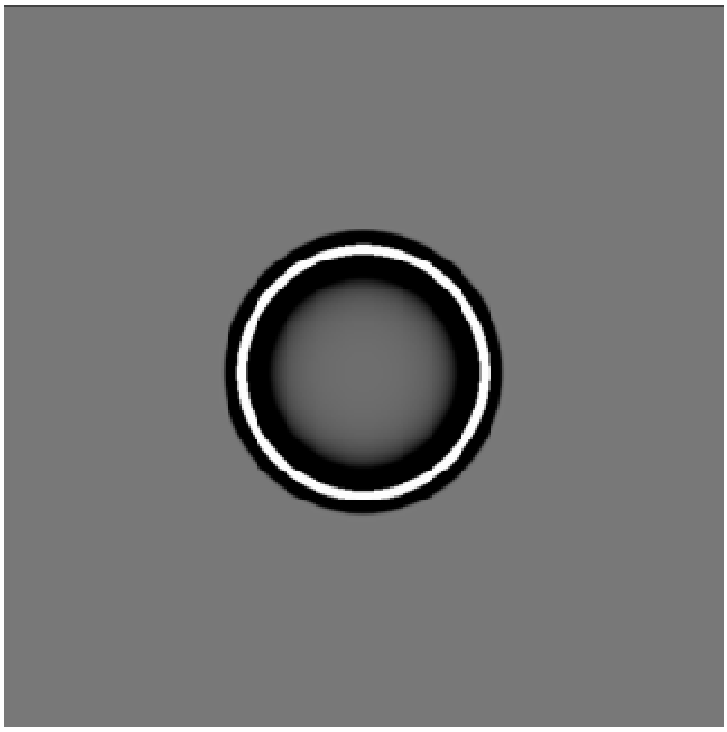


Figura A.1.2.: Snapshot em modelo homogêneo com o parâmetro α=5.

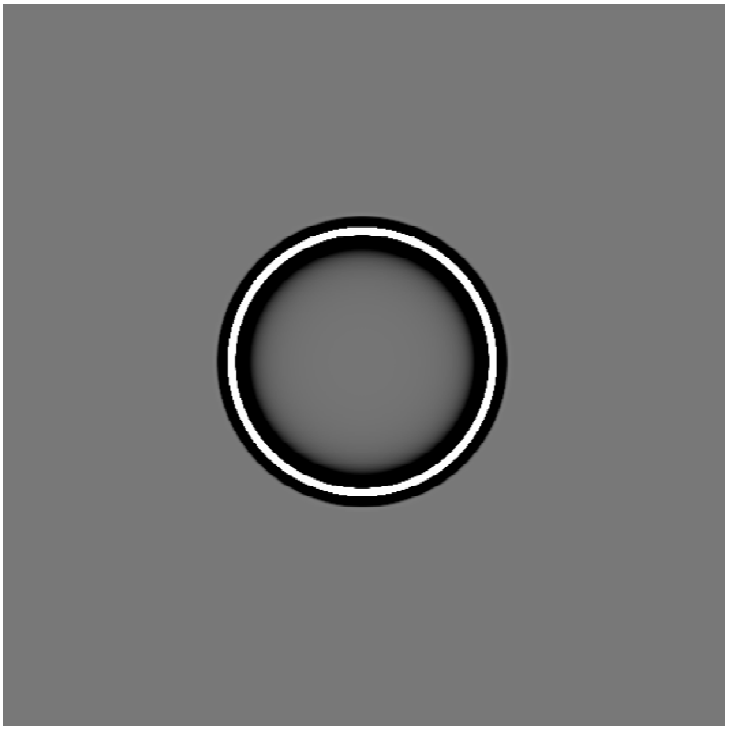


Figura A.1.3.: Snapshot em modelo homogêneo com o parâmetro α=4.

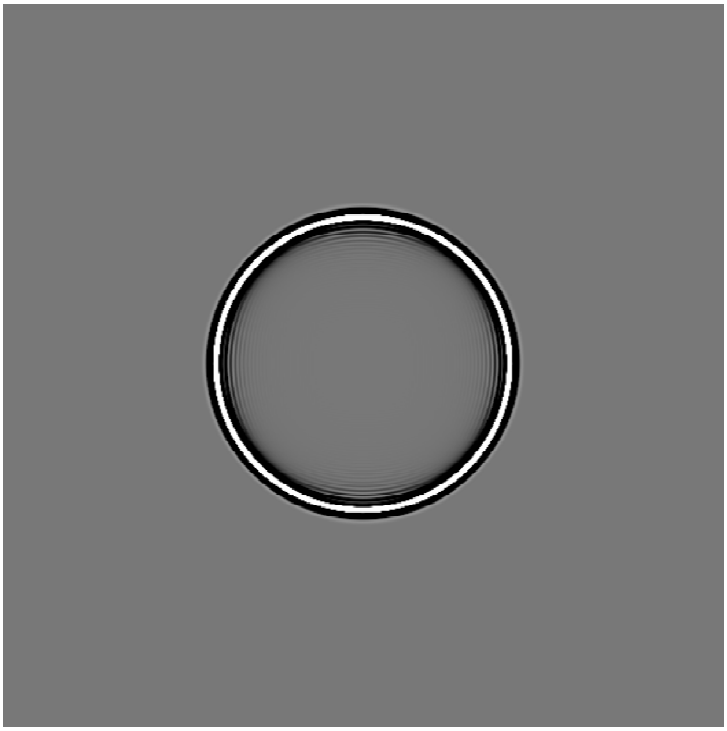


Figura A.1.4.: Snapshot em modelo homogêneo com o parâmetro α=3.

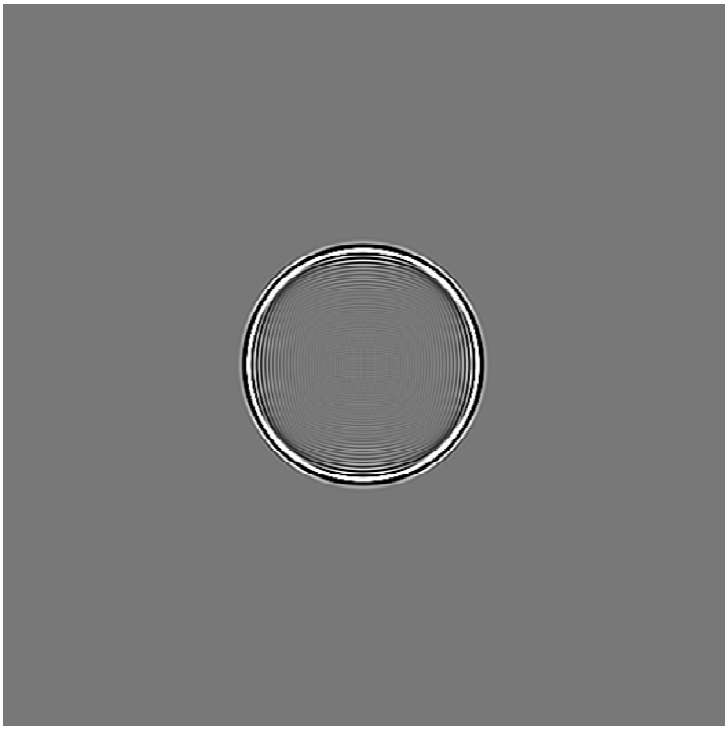


Figura A.1.5.: Snapshot em modelo homogêneo com o parâmetro α=2.

Observando-se as figuras A.1.1, A.1.2, A.1.3, A.1.4 e A.1.5 dos campos de ondas propagados com a variação do parâmetro α nota-se que ocorreu aumento significativo da dispersão numérica à partir de alfa menor que 4.

Outro problema importantíssimo a ser considerado é o da estabilidade numérica. Dentro de certos limites a solução da equação da onda por meio do método de diferenças finitas é um processo estável [FARIA,1986]. E para que não ocorra instabilidade, a relação (A.1.15) deve ser satisfeita:

$$\Delta t \leq \frac{h}{\beta . V_{max}} \quad , \qquad (A.1.15)$$

onde

h é o espaçamento entre os pontos do grid, considerando-se $h = \Delta x = \Delta z$

Δt é o intervalo de tempo para o avanço da solução numérica

V_{max} é a máxima velocidade de propagação presente no modelo analisado.

β é definido da mesma forma que α.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas