



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

João Pedro dos Prazeres Reis

ESTUDOS DE CONDIÇÕES DE IMAGEM NA MIGRAÇÃO
REVERSA NO TEMPO

NITERÓI - RIO DE JANEIRO, BRASIL
17 de setembro de 2019

João Pedro dos Prazeres Reis

ESTUDOS DE CONDIÇÕES DE IMAGEM NA MIGRAÇÃO
REVERSA NO TEMPO

**Trabalho de Conclusão de Curso sub-
metido à Universidade Federal Flumi-
nense, como requisito necessário para
obtenção do grau de Bacharel em Geo-
física**

Orientador: Prof. Dr. Leandro Di Bartolo (ON)
Co-Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos (UFF)

Niterói, 17 de setembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

JOÃO PEDRO DOS PRAZERES REIS

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Geofísica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Leandro Di Bartolo, D. Sc.(ON)

Marco Antonio Cetale Santos, D. Sc.(UFF)

Rodrigo Bijani, D. Sc. (UFF)

Lucas Ferreira Conz Eugenio (ON)

Niterói, 17 de setembro de 2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a minha família por todo o apoio que me foi dado ao longo de toda a minha vida, no que diz respeito aos meus objetivos e sonhos. Agradeço especialmente aos meus pais todo o carinho, pela dedicação empregada em meu desenvolvimento, educação e pelos valores passados.

Gostaria de agradecer aos meus amigos pelos conselhos dados, por todo amor e por inspirar sempre o melhor em mim.

Não obstante, gostaria de agradecer aos meus orientadores Leandro Di Bartolo e Marco Antonio Cetale pela orientação neste trabalho. A Lucas Eugenio e ao professor Rodrigo Bijani por compor a banca de avaliação. Agradeço especialmente ao Leandro Di Bartolo por todos os anos de aprendizado e orientação desde minha iniciação científica à minha formação em geofísica.

Por final, mas de igual importância, aos professores do IGEO, à Universidade Federal Fluminense e ao Observatório Nacional, minha eterna gratidão.

Resumo

A migração sísmica é uma ferramenta de processamento sísmico empregada na construção de uma imagem das interfaces geológicas, que possuem contraste de impedância acústica, genericamente denominadas de refletos sísmicos. A imagem gerada pela migração sísmica será interpretada de forma a construir modelos geológicos do interior da terra. Dentre os principais métodos estudados e utilizados atualmente, a Migração Reversa no Tempo (MRT) se destaca no imageamento de regiões estruturalmente complexas em subsuperfície. O presente trabalho tem como objetivos principais estudar os conceitos relacionados a Modelagem Numérica Acústica e a Migração Reversa no Tempo. Implementar algoritmos de modelagem sísmica e de MRT com diferentes condições de imagem. E, por fim, analisar comparativamente os resultados obtidos. As imagens produzidas apresentaram boa qualidade, no modelo de camadas e no modelo complexo de Hess.

Palavras-chaves: Geofísica Aplicada; Sísmica de Reflexão; Processamento Sísmico; Modelagem Sísmica; Migração Reversa no Tempo; Condição de imagem.

Abstract

Seismic migration is a processing technology deployed in the construction of an image containing the geological interfaces, which comprises acoustic impedance, generically denominated by seismic reflectors. The obtained image is interpreted in order to build an geological model of the Earth's subsurface. Amongst the main seismic migration methods studied or applied, whether in academy or in the industry, the Reverse Time Migration (RTM) shows the best results imaging complex media. This work aims to provide knowledge about the concepts related to Acoustic Numerical Modelling and RTM. Implement algorithms of seismic modeling and RTM with several imaging conditions. And, finally, compare the obtained results. The images presented good quality for the simple layer model and Hess complex model.

Key-words: Applied Geophysics; Reflection Seismic; Seismic Processing; Seismic Modeling; Reverse Time Migration; Imaging condition.

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Relevância	18
1.2	Objetivos	18
2	Teoria	19
2.1	Método sísmico de reflexão	19
2.2	Aspectos básicos da reflexão sísmica	21
2.3	Propagação de ondas elásticas	22
2.3.1	Ondas de corpo	22
2.3.2	Ondas superficiais	24
2.4	Equação da onda acústica	25
2.5	Modelagem numérica acústica	27
2.6	Migração Sísmica	30
2.6.1	Migração pré empilhamento e pós empilhamento	30
2.6.2	Domínios verticais de migração	30
2.6.3	Migração Reversa no Tempo	31
2.7	Condição de imagem	31
2.7.1	Condição de imagem por correlação cruzada	32
2.7.2	Condições de imagem por correlação cruzada normalizada	33
2.7.3	Condição de imagem baseada na iluminação da fonte e do receptor combinadas	34
2.7.4	Filtro Laplaciano	35
3	Método	37
3.1	Modelos sintéticos adotados	37
3.1.1	Modelo de camadas	37
3.1.2	Modelo de Hess com sal	38
3.2	Modelagem acústica	40
3.2.1	Termo fonte	40
3.2.2	Condições de contorno	40
3.2.3	Condições não reflexivas e camada de Cerjan	41
4	Resultados	42
4.1	Modelagem acústica	42
4.1.1	Modelo de camadas	42
4.1.2	Modelo de Hess com Sal	44
4.2	Migração Reversa no Tempo	45
4.2.1	Modelo de camadas	45
4.2.2	Modelo de Hess com sal	48

5 Discussão e resultados 53

Referências 54

Lista de ilustrações

Figura 1 – Seção geológica da Bacia de Campos. Fonte: (CASTRO; PICOLINI, 2015)	17
Figura 2 – Geometrias de aquisição Fonte: Souza e Porsani (2018)	20
Figura 3 – Aquisição sísmica. Fonte: (ROCHA, 2019)	20
Figura 4 – Lei de Snell-Descartes.	21
Figura 5 – Ondas P e S adaptadas de Hill, BROOKS e KEAREY (2009)	23
Figura 6 – Ondas de Rayleigh e Love adaptadas de Hill, BROOKS e KEAREY (2009)	24
Figura 7 – Malha regular Fonte: Bartolo (2013)	28
Figura 8 – Princípio fundamental do imageamento Fonte: Bulcão (2004)	32
Figura 9 – Matriz de iluminação do campo da fonte	34
Figura 10 – Matriz de iluminação do campo do grid de receptores	34
Figura 11 – Matriz de iluminação da fonte e do receptor combinadas	35
Figura 12 – Modelo de camadas	37
Figura 13 – Modelo Hess com sal	39
Figura 14 – Assinatura da fonte representada pela wavelet ricker. Painel (a) representação no tempo e (b) espectro de frequência absoluto. Fonte: Wiki (2019)	40
Figura 15 – Propagação do campo de ondas acústicas para o modelo de camadas	42
Figura 16 – Sismograma sintético tiro número 10. O eixo vertical indica o tempo de registro em segundos e eixo o horizontal o número do receptor.	43
Figura 17 – Campo de ondas para o instante de tempo 4,5 segundos de modelagem.	44
Figura 18 – Sismograma sintético tiro número 80. Mesma definição da figura ??	45
Figura 19 – Condição de imagem por correlação cruzada, as cores escuras representam valores positivos e brancas valores negativos.	46
Figura 20 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte.	46
Figura 21 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do <i>grid</i> dos receptores.	47
Figura 22 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e do <i>grid</i> de receptores combinadas.	47
Figura 23 – Condição de imagem por correlação cruzada.	48
Figura 24 – Condição de imagem por correlação cruzada com filtro laplaciano aplicado.	48
Figura 25 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte.	49

Figura 26 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte com filtro laplaciano aplicado.	49
Figura 27 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do <i>grid</i> dos receptores.	50
Figura 28 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do <i>grid</i> dos receptores com filtro laplaciano aplicado.	50
Figura 29 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e do <i>grid</i> de receptores combinadas.	51
Figura 30 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e <i>grid</i> dos receptores combinadas com filtro laplaciano aplicado.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de modelagem para o modelo simples	38
Tabela 2 – Parâmetros de modelagem para o modelo Hess	39

1 Introdução

O método sísmico de reflexão é um método geofísico empregado no estudo da subsuperfície, amplamente aplicado na exploração de hidrocarbonetos tanto na identificação de novas zonas de acumulação, como no monitoramento de reservatórios quanto no estudo de alocação de novos poços de perfuração. Atualmente o imageamento de estruturas complexas como nas bacias do Pré-Sal é o motivo pelo qual são desenvolvidos novas tecnologias de processamento e modelagem sísmica. A figura 1 demonstra a complexidade estrutural do Pré-Sal no contexto geológico da Bacia de Santos.

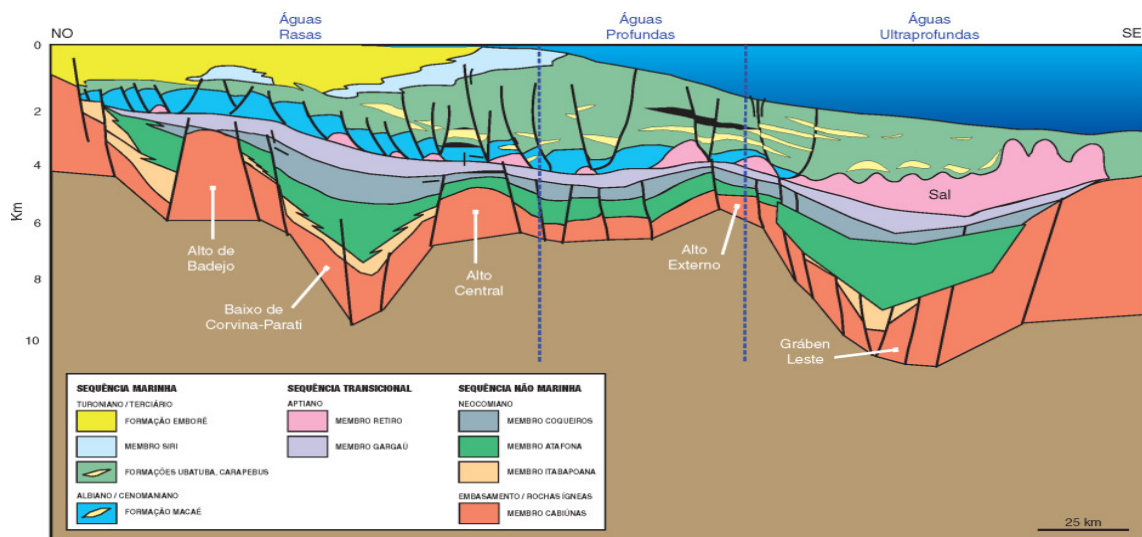


Figura 1 – Seção geológica da Bacia de Campos. Fonte: (CASTRO; PICOLINI, 2015)

Como em geral os problemas envolvendo a Equação da Onda em meios complexos não possuem solução analítica, deve-se adotar um esquema de aproximação numérica para o problema. Os principais métodos de modelagem podem ser divididos, segundo Carcione, Herman e Kroode (2002), nas seguintes categorias: Métodos Diretos, Métodos Integrais e Métodos de Traçamento de Raios. Dentre os Métodos Diretos destaca-se o Método das Diferenças Finitas, utilizado no presente trabalho como ferramenta de aproximação numérica da equação da onda acústica. Tais aproximações são ferramentas de simulação de fenômenos físicos e que tem como objetivo entender mais a fundo o problema direto sísmico e aplicar tais simulações em problemas geofísicos como a migração sísmica como será mostrado neste trabalho.

Por sua vez a migração de dados sísmicos é a etapa final da longa cadeia de processamento sísmico e tem como objetivo posicionar os eventos registrados nos dados sísmicos em suas posições corretas em subsuperfície e colapsar difrações. O resultado da migração sísmica é uma seção da subsuperfície que será interpretada geologicamente

numa etapa posterior e servirá como controle de qualidade para fluxos de construção de modelos de velocidade. Nesse contexto a Migração Reversa no Tempo (MRT), proposto pela primeira vez por Baysal, Kosloff e Sherwood (1983), é um algoritmo de migração sísmica capaz de produzir imagens em modelo geológicos complexos contendo interfaces apresentando alto mergulho e grande contraste de impedância acústica.

1.1 Relevância

Devido a necessidade de explorar regiões cada vez mais complexas em busca de novas acumulações de hidrocarbonetos, esforços tem sido empregados para produzir imagens precisas e de qualidade elevada utilizando tecnologias como *Full-Wave Form Inversion* e MRT que comprovam sua capacidade em revelar detalhes em contextos geológicos que os métodos comumente empregados, como a tomografia sísmica e a migração Kirchhoff, falham. Tais esforços se justificam porque as imagens produzidas na etapa de migração são utilizadas em outras áreas dentro de uma cadeia produtiva para tomadas de decisão, definir riscos exploratórios e extrair conhecimento geológico da região em estudo. Entretanto artefatos são observados nas imagens migradas utilizando a MRT. Isto se dá devido a elementos indesejáveis que podem estar contidos na condição de imagem escolhida, como o ruídos de baixa frequência que podem mascarar refletores contidos na imagem. Por isso são propostas novas condições de imagem com o objetivo de melhorar os resultados obtidos pelas condições de imagem convencionais como a correlação cruzada, como visto em Bulcão (2004) e Silva (2009).

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a teoria básica de propagação de ondas na qual se baseiam a sísmica de reflexão e a migração sísmica. Em seguida implementar os algoritmos de modelagem acústica 2D e a Migração Reversa no Tempo com diferentes condições de imagem utilizando aproximações numéricas através do Método das Diferenças Finitas.

De modo geral, destacam-se os seguintes objetivos:

- Implementar o algoritmo de Modelagem Acústica
- Implementar a MRT com diferentes condições de imagem
- Aplicar o filtro Laplaciano nas imagens migradas
- Analisar comparativamente os diferentes resultados obtidos

2 Teoria

2.1 Método sísmico de reflexão

O método sísmico de reflexão é um dos vários métodos que compõem a Geofísica. O método consiste em propagar um pulso controlado na superfície da Crosta terrestre, gerando ondas que se propagam em sentido ao interior da Terra e registrar, na superfície, os pulsos das ondas que foram refletidos ou difratados em subsuperfície.

A sísmica de reflexão possui três grandes componentes: a aquisição sísmica, o processamento sísmico e a interpretação sísmica (YILMAZ, 2001). A aquisição sísmica é a parte do método sísmico dedicada ao registro do dado sísmico. Esta área da geofísica utiliza uma fonte de um pulso sísmico e receptores sísmicos que registram as amplitudes das reflexões ao longo de um tempo de registro (figura 3). As fontes comumente utilizadas para aquisições terrestres são o *Vibroseis* e dinamites, já para aquisições marinhas são utilizadas canhões de ar comprimido como fonte sísmica.

Os receptores para aquisições terrestres são chamadas de geofones e são desenvolvidos para registrar os modos de onda P e S, assim como as componentes de propagação da ondas como os campos de velocidade, de deslocamento nas partículas e suas projeções verticais e horizontais. Para aquisições marinhas são utilizados receptores que podem estar localizados na coluna d'água chamados de hidrofones que medem as ondas compressoriais, podem ser utilizados também *nodes* ou *ocean bottom cables(OBC)* que são receptores fixados no fundo oceânico e que podem registrar todos os campos de onda que são registrados no caso terrestre.

A forma como os receptores estão distribuídos espacialmente com respeito a fonte é chamado de geometria de aquisição, as geometrias de aquisição usuais são a geometria *end-on* (Fig.2(a)) e *split-spread* (Fig.2(b)).

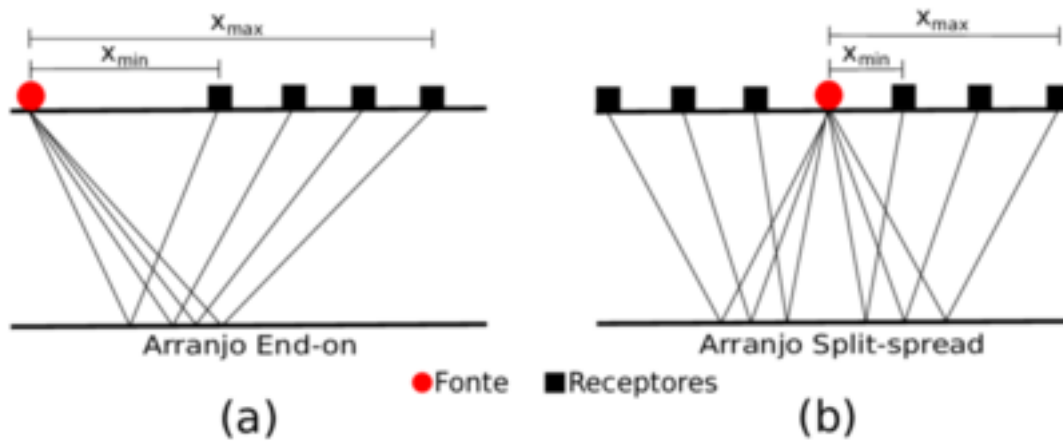


Figura 2 – Geometrias de aquisição Fonte: Souza e Porsani (2018)

O processamento sísmico é responsável pela análise e manipulação do dado sísmico, com a finalidade de aumentar a razão sinal/ruído, recuperar a refletividade do meio e aumentar a resolução inicial do dado. O objetivo final do processamento sísmico é produzir uma imagem da subsuperfície a partir do dado adquirido.

A interpretação sísmica tem como finalidade a atribuição de significado geológico às imagens geradas pelo processamento sísmico originando um modelo geológico à partir do dado processado.

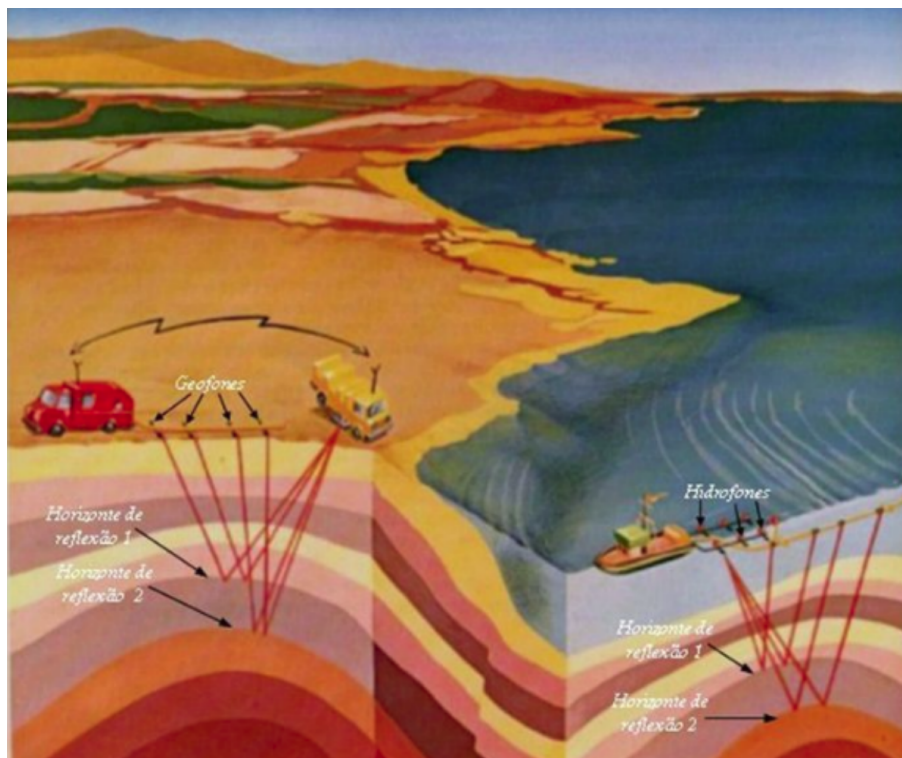


Figura 3 – Aquisição sísmica. Fonte: (ROCHA, 2019)

2.2 Aspectos básicos da reflexão sísmica

No momento em que o pulso sísmico se propaga em subsuperfície, a frente de onda viaja por diferentes camadas que estão no domínio da crosta terrestre. Quando a frente de onda incide sobre uma interface entre camadas com diferentes propriedades elásticas parte da energia contida nesta onda se divide, de forma que uma parte da frente da onda será transmitida e outra parte será refletida. A depender do ângulo de incidência é possível determinar os ângulos de reflexão e transmissão ao qual a onda sísmica estará sujeita com respeito a reta normal à interface. A Lei de Snell-Descartes no sentido da sísmica de reflexão, relaciona as velocidades sísmicas dos materiais com o ângulo de incidência, transmissão e reflexão ao qual um ponto da frente de onda está sujeito quando ultrapassa uma interface. De forma sucinta a Lei de Snell-Descartes afirma que a quantidade $pv_i = \frac{\sin \theta_i}{v_i}$ se mantém constante ao longo de retas. Vale a pena ressaltar que esta descrição não prevê as conversões entre os modos de propagação sísmica que podem ocorrer nas interfaces.

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (1)$$

Uma consequência direta desta identidade é que se $v_2 > v_1$ e se conhecermos o ângulo de incidência, podemos afirmar que o ângulo de transmissão será maior do que o ângulo de incidência (Fig4), de forma que a identidade se mantenha. Analogamente o contrário ocorre quando $v_2 < v_1$.

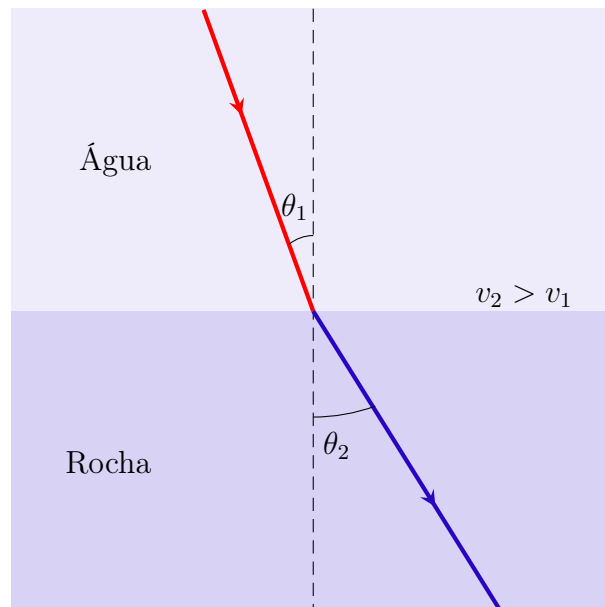


Figura 4 – Lei de Snell-Descartes.

A lei de Snell-Descartes também fornece uma análise do ângulo máximo de incidência da onda para que ainda sejam possíveis gerar reflexões. Este ângulo é conhecido como ângulo crítico. O ângulo crítico é definido como sendo o limite que a partir do qual a energia

refletida é nula, isto é $\theta_2=90^\circ$. A partir do ângulo crítico a onda se propaga inteiramente na interface do meio, a energia que esta onda transmite é denominada na Sísmica de Reflexão como energia pós crítica e está relacionada a propagação das *Diving Waves* que estão incorporadas em algoritmos modernos como de FWI.

As equações de Zoeppritz (ZOEPPRITZ, 1919) que descrevem o coeficiente de reflexão acústica para qualquer ângulo de incidência, um importante caso particular desta equação quantifica o coeficiente de reflexão para incidência normal (HILL; BROOKS; KEAREY, 2009 apud ZOEPPRITZ, 1919) dado pela fórmula :

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (2)$$

Onde o símbolo ρ representa a densidade da camada, v representa a velocidade de propagação da onda sísmica no meio e I representa a impedância acústica da camada. O coeficiente de reflexão varia dentro do intervalo $[-1,1]$, R apresenta valores positivos quando a rocha abaixo possui impedância acústica maior do que a rocha sobrejacente e valores negativos para o caso oposto. Tal fato demonstra a contribuição da litologia no evento sísmico registrado no traço sísmico podendo-se extrair significado geológico á partir do sinal sísmico. de maneira que se a refletividade apresentar valores positivos significa que a compactação das litologias na direção vertical é predominante. Para refletividades negativas pode-se deduzir que a litologia abaixo possui uma velocidade sísmica menor do que a sobrejacente, tal caso ocorre em topos de reservatórios que tem como selante a Halita.

2.3 Propagação de ondas elásticas

As ondas sísmicas são ondas mecânicas que, em meios homogêneos, se propagam esfericamente a partir de uma fonte pontual. Se o material sujeito a perturbação causada pela passagem da onda estiver sujeito a deformações dentro de seu regime elástico, isto é, a deformação sofrida pelo material é restituída completamente, podemos caracterizar a propagação da onda no meio em termos de suas constantes elásticas e da densidade. As ondas sísmicas podem ainda ser categorizadas entre ondas de corpo e ondas de superfície (HILL; BROOKS; KEAREY, 2009).

2.3.1 Ondas de corpo

As ondas de corpo (Fig.5) são ondas que se propagam através de todo o volume do material sujeito a passagem da onda sísmica, as ondas de corpo são divididas entre as ondas compressionais ou primárias ou P e as cisalhantes ou secundárias ou S. As ondas P se propagam paralelamente ao eixo de propagação da onda, fazendo com que o movimento

das partículas do meio sejam paralelos ao eixo de propagação. A velocidade da onda P é dada pela seguinte expressão:

$$V_P = \sqrt{\frac{\kappa + \mu}{\rho}}$$

Sendo κ o módulo de compressibilidade do material sujeito a passagem da ondas, sendo μ o módulo de cisalhamento e ρ representando a densidade do material. As ondas S são ondas que se propagam transversalmente com relação ao eixo do movimento das partículas do meio. As ondas S provocam cisalhamento simples em materiais sólidos, visto que líquidos Newtonianos possuem constante de cisalhamento nula devido a ausência de viscosidade. A velocidade da onda S é dada pela expressão:

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

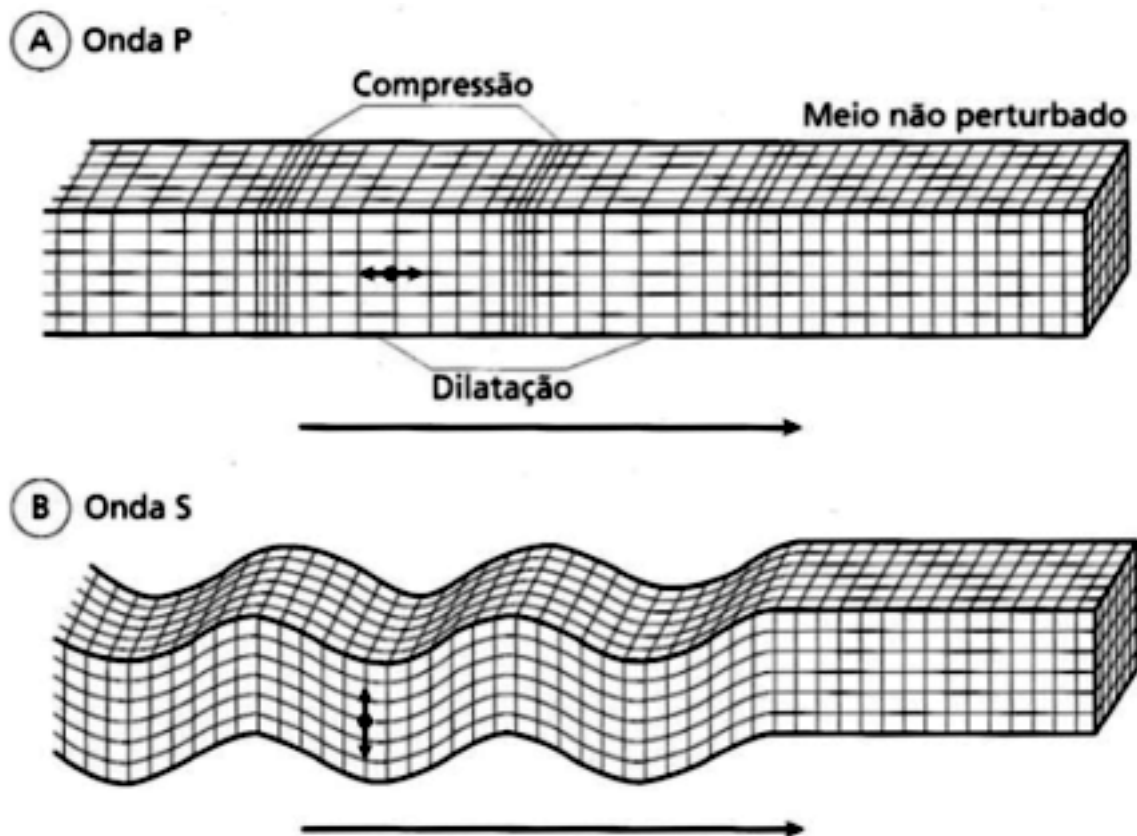


Figura 5 – Ondas P e S adaptadas de Hill, BROOKS e KEAREY (2009)

Analisando as expressões anteriores é possível observar que as ondas P possuem maior velocidade que as ondas S e que as velocidades das ondas de corpo só dependem das propriedades elásticas do meio para qualquer frequência em particular, ou seja, a propagação das ondas sísmicas desta forma caracteriza bem os meios não dispersivos.

Teorias de propagação que incorporam os efeitos de dispersão sísmica são conhecidas como teorias visco-elásticas. O método sísmico de reflexão foi desenvolvido baseado somente na propagação das ondas P em meios não dispersivos, devido a simplicidade no planejamento da aquisição sísmica assim como no uso de sensores sísmicos que necessitavam registrar apenas a componente vertical de movimento do meio.

2.3.2 Ondas superficiais

As ondas superficiais são ondas que estão limitadas a propagação na superfície do material sujeito a passagem da onda sísmica. As ondas superficiais estão divididas entre as ondas de Rayleigh e de Love (Fig.6). As ondas de Rayleigh são ondas que se propagam entre duas interfaces do material, o movimento das partículas sujeito a passagem das ondas de Rayleigh descrevem elipses num plano perpendicular a passagem da onda. As ondas de Love são ondas S polarizadas, causando um movimento no plano da superfície do meio em que a onda de Love se propaga e perpendicularmente a propagação. As ondas de Rayleigh são mais lentas que as ondas de corpo e quando se propagam na Terra são ondas dispersivas, as ondas de Love são dispersivas e possuem velocidade intermediária com respeito ao intervalo de velocidade das ondas S em todo o meio.

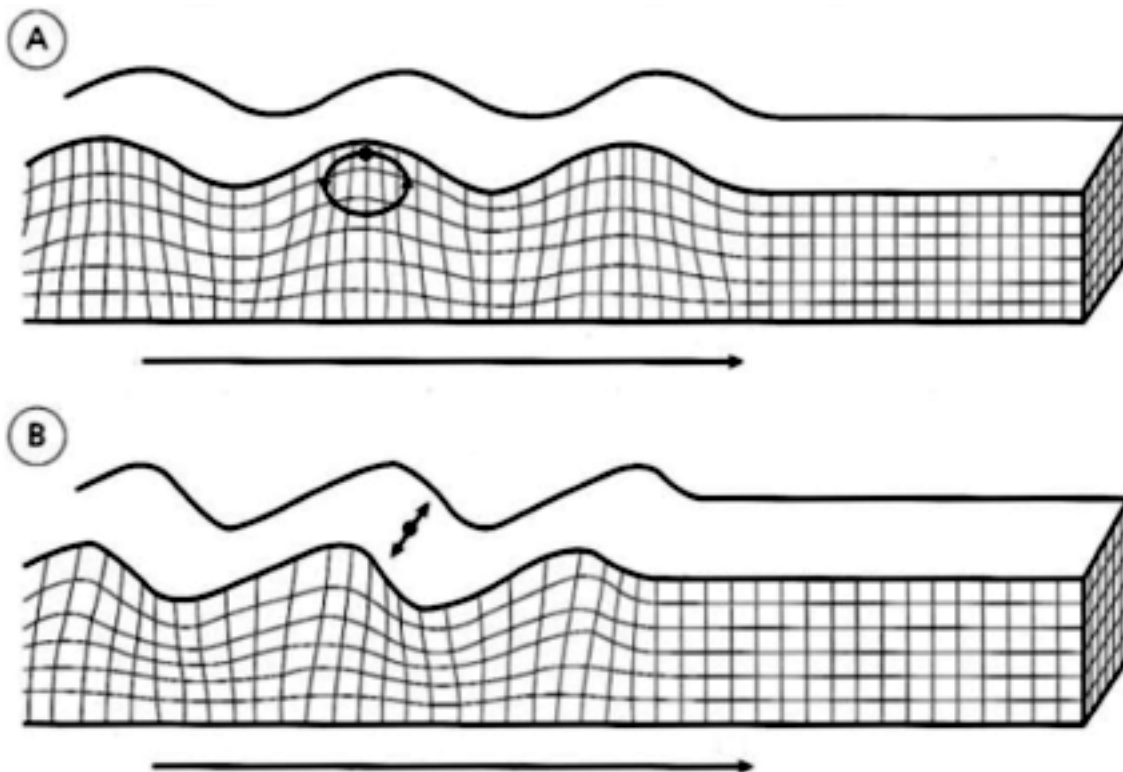


Figura 6 – Ondas de Rayleigh e Love adaptadas de Hill, BROOKS e KEAREY (2009)

2.4 Equação da onda acústica

A equação da onda acústica é um modelo matemático que explica a física das ondas compressionais ou ondas P apresentadas no capítulo anterior. É importante ressaltar que modelos mais completos são capazes de descrever os outros tipos de ondas apresentadas, embora a formulação acústica seja tradicionalmente a mais usada pelo método sísmico de forma a produzir resultados satisfatórios. O surgimento da onda acústica é causada pela perturbação da densidade em um meio material, esta perturbação causada nas vizinhanças de um volume de massa provoca um aumento de pressão numa região de espaço e rarefação na região vizinha. Estas pressões e rarefações vão se alternando no espaço longitudinalmente em relação ao movimento das partículas afetadas pelas perturbações (NUSSENZVEIG, 2018).

O modelo matemático que descreve a propagação de uma onda acústica pode ser derivado à partir da Lei de Hook descrita para materiais como em Ferreira (2011). A Lei de Hook relaciona as tensões aplicadas a um material e a deformação provocada, expressa pela equação:

$$P = -\kappa(\nabla \cdot u) \quad (3)$$

Derivando a equação (3) com relação ao tempo temos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa \frac{\partial(\nabla \cdot u)}{\partial t}$$

Aplicando a propriedade de comutatividade dos operadores lineares:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\kappa \nabla \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

Dividindo a igualdade por κ e considerando $\frac{\partial u}{\partial t} = v$ obtemos:

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot v = 0 \quad (4)$$

A equação (4) é conhecida como equação da continuidade linear homogênea, isto é, um sistema que não está sujeito a injeção de massa.

A partir da segunda Lei de Newton temos:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\nabla P \quad (5)$$

Dividindo por ρ temos:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho} \nabla P$$

$$v_t + \frac{1}{\rho} \nabla P = 0 \quad (6)$$

A equação (6) é conhecida por equação do movimento.

A equação da onda homogênea pode ser obtida utilizando as equações da continuidade e do movimento apresentadas. Basta derivar a equação (4) em relação ao tempo:

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\nabla \cdot v_t$$

E combinar a equação (6) na expressão obtida acima:

$$\frac{1}{\kappa} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla P \right)$$

Assim já obtemos a expressão para a equação da onda com densidades variáveis. Esta equação é conhecida por ser utilizada nas formulações de amplitude verdadeira nos algoritmos de Migração Sísmica.

Multiplicando a igualdade por κ temos:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \kappa \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla P \right)$$

Aplicando as propriedades do operador gradiente:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \kappa \left[\nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) \cdot \nabla P + \left(\frac{1}{\rho} \right) \nabla \cdot \nabla P \right]$$

Fazendo $\kappa = \rho c^2$ e $\nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = -\frac{\nabla \rho}{\rho^2}$

Obtemos:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \rho c^2 \left[-\left(\frac{\nabla \rho}{\rho^2} \right) \cdot \nabla P + \left(\frac{1}{\rho} \right) \nabla \cdot \nabla P \right]$$

Manipulando algebricamente:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left[-\left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right) \cdot \nabla P + \nabla \cdot \nabla P \right]$$

Sabendo que $\nabla \cdot \nabla P = \nabla^2 P$:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = c^2 \left[- \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right) \cdot \nabla P + \nabla^2 P \right]$$

Dividindo por c^2 :

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \nabla^2 P - \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right) \cdot \nabla P$$

Desprezando o gradiente de densidades:

$$\left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right) \cdot \nabla P = 0$$

Chegamos a:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0$$

Descrevendo o operador ∇ em coordenadas cartesianas (x,z):

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

Finalmente temos a expressão para a equação homogênea da onda acústica em duas dimensões para gradientes de densidade desprezível:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (7)$$

Quando o sistema está sujeito a atuação de uma fonte pontual podemos escrever (7) como:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = f(t) \quad (8)$$

2.5 Modelagem numérica acústica

Os problemas envolvendo a propagação de ondas em meios complexos muitas vezes não possuem solução analítica, sendo necessário o emprego de aproximações numéricas para obter a solução. Existem uma variedade de métodos numéricos empregados na solução da equação da onda. O Método Direto das Diferenças Finitas (MDF) é empregado na solução de diversas equações diferenciais em áreas como a Geofísica, a Engenharia e a Física. O MDF é empregado para transformar uma equação diferencial em uma equação de operadores de diferenças. Os operadores de diferenças atuam sobre os pontos discretos do domínio modelo, discretizado numa malha de pontos representando o domínio da

solução numérica. Desta maneira a expressão dos operadores de diferenças finitas surge da definição da malha de discretização do modelo. No presente trabalho os operadores de diferenças finitas foram discretizados numa malha de pontos regulares (fig.7), com o mesmo espaçamento para os pontos discretos $[x_i, z_i]$ que representam o malha numérica de propagação da onda, isto é, o modelo de velocidades. Portanto cada ponto da malha discreta representa um valor do modelo de velocidades utilizado. As aproximações de diferenças finitas e a malha regular foi utilizada tanto na modelagem de dados, quanto na MRT. Foram usados operadores de diferenças finitas de quarta ordem no espaço e segunda ordem no tempo.

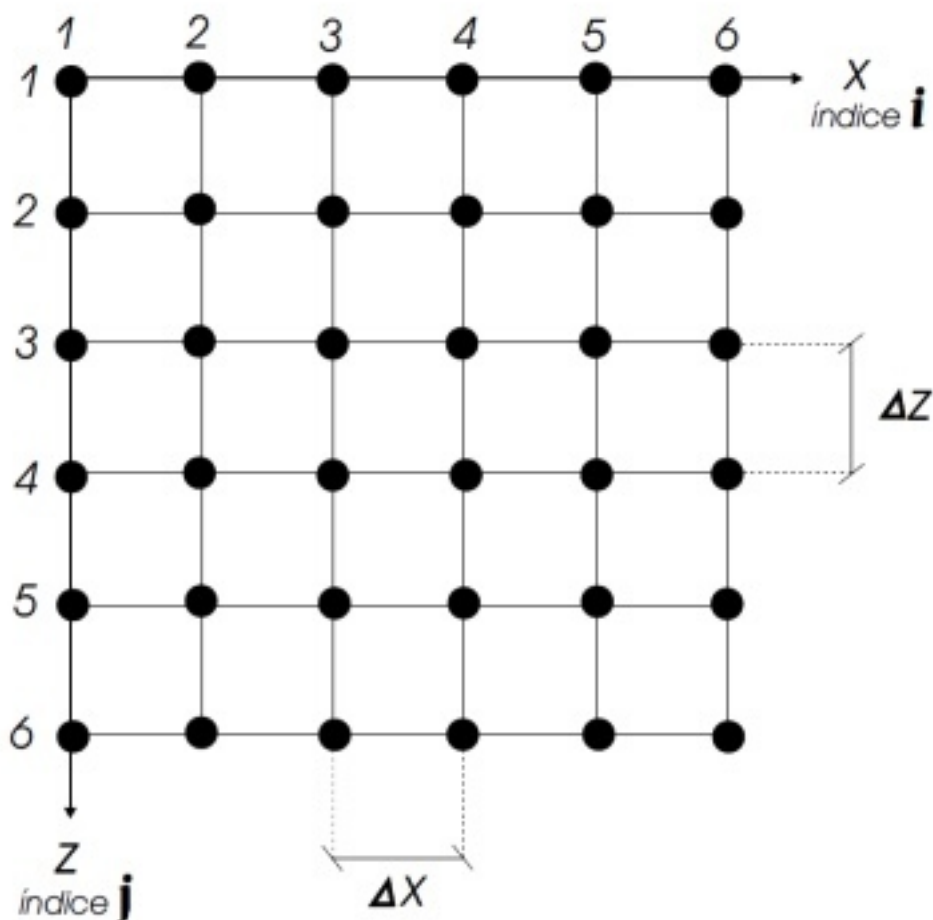


Figura 7 – Malha regular Fonte: Bartolo (2013)

Uma vez calculados os operadores de diferenças, é possível substituí-los na equação diferencial original, gerando sua aproximação numa equação de diferenças finitas. Os operadores são nomeados pela ordem da aproximação desejada, no caso da equação acústica da onda são comumente empregados os operadores de segunda e quarta ordem para as derivadas espaciais e segunda ordem para a derivada temporal. No presente trabalho foi usada a formulação explícita em segunda ordem no tempo e quarta ordem no

espaço, dada por:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{-p_{i-2} + 16p_i - 30p_i + 16p_{i+1} - p_{i+2}}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{p^{k-1} - 2p^k + p^{k+1}}{\Delta t^2}$$

Utilizando as duas equações obtidas podemos escrever a equação da onda como uma equação de diferenças finitas:

$$\begin{aligned} \frac{p_{i,j}^{k-1} - 2p_{i,j}^k + p_{i,j}^{k+1}}{\Delta t^2} &= \frac{c_{i,j}^2}{12h} (-p_{i-2,j}^k + 16p_{i,j}^k - 30p_{i,j}^k + 16p_{i+1,j}^k - p_{i,j+2}^k \\ &\quad - p_{i,j-2}^k + 16p_{i,j}^k - 30p_{i,j}^k + 16p_{i,j+1}^k - p_{i,j+2}^k) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{i,j}^{k+1} &= \frac{c_{i,j}^2 \Delta t^2}{12h} [-(p_{i-2,j}^k + p_{i,j-2}^k + p_{i+2,j}^k + p_{i,j+2}^k) + 16(p_{i-1,j}^k + p_{i,j-1}^k + p_{i+1,j}^k \\ &\quad + p_{i,j+1}^k) - 60p_{i,j}^k] + 2p_{i,j}^k - p_{i,j}^{k-1} \end{aligned}$$

O MDF dá origem a esquema explícito condicionalmente estável, isto é, que depende de critérios para que seja estável. A seguir, são dados os critérios de estabilidade e dispersão numérica que se deve obedecer para que a solução seja adequada:

O critério de não dispersão numérica, restringe o espaçamento físico entre os pontos da malha dado pela relação empírica:

$$h \leq \frac{v_{min}}{\alpha f_c}$$

O critério de estabilidade garante que a solução irá convergir, e define o passo de tempo máximo envolvido na modelagem, dado por:

$$d_t \leq \frac{h}{\beta v_{max}}$$

Os parâmetros α e β podemos assumir diferentes valores, dependendo da aproximação numérica utilizada. Os valores utilizados nesse trabalho foram $\alpha = 5$ e $\beta = 4$ de acordo com Alford, Kelly e Boore (1974), tanto no algoritmo de modelagem quanto no algoritmo da MRT.

2.6 Migração Sísmica

A migração sísmica é uma das etapas finais da longa cadeia de processamento sísmico, esta etapa é responsável por posicionar os traços sísmicos nas posições em subsuperfície em que foram gerados, colapsar difrações e aumentar a resolução espacial, produzindo uma imagem da subsuperfície. A Migração Reversa no Tempo ou simplesmente MRT é um algoritmo two-way de migração baseado na equação completa da onda, permitindo que efeitos causados pela propagação da onda em meios complexos sejam incorporados no princípio fundamental do imageamento (CLAERBOUT, 1971). A MRT não se limita ao imageamento de refletores com elevada inclinação, elevado contraste de impedância acústica e nem a múltiplos traçados de raios. Portanto a MRT se destaca em meio a algoritmos one-way e os baseados no traçamento de raios, como a migração phase-shift e a migração Kirchhoff. Os algoritmos de migração podem ser divididos em três categorias segundo Yilmaz (2001):

- Os algoritmos baseados na solução integral da equação escalar da onda
- Os algoritmos baseados nas aproximações de diferenças finitas
- Os algoritmos implementados no domínio da frequência-número de onda

2.6.1 Migração pré empilhamento e pós empilhamento

A migração sísmica pode ser realizada à partir dos dados pré-empilhamento ou pós-empilhamento, a migração pré-empilhamento é mais custosa computacionalmente mas não requer o conhecimento da velocidade RMS das camadas em subsuperfície. Já a migração pós-empilhamento necessita de uma seção empilhada como input para a migração além de um modelo de velocidades, necessitando de um conhecimento prévio da velocidade RMS subsuperfície, fazendo com que a migração pós empilhamento seja mais sensível a erros de velocidade.

2.6.2 Domínios verticais de migração

Em relação ao domínio de imageamento, os algoritmos de migração em geral podem resultar em seções com o eixo vertical em tempo ou em profundidade. A migração em tempo utiliza uma velocidade constante para cada ponto imagem e portanto considera os traçados de raio como retas ao longo do modelo de velocidades, uma de suas limitações se dá quando a região a ser imageada em subsuperfície possui acentuado contraste lateral de velocidades uma vez que as velocidades utilizada na migração são constantes para cada ponto migrado.

Já a migração em profundidade utiliza velocidades intervalares que podem variar de ponto a ponto no modelo de velocidades e portanto realiza a migração num modelo

estrutural mais aproximado da terra, permitindo que sejam incorporados modelos de velocidades mais complexos, não estando limitados a um campo de velocidades em particular. Por isso a migração em profundidade é o algoritmo mais estável utilizado como ferramenta de imageamento de subsuperfície.

2.6.3 Migração Reversa no Tempo

A migração reversa no tempo é composta por três etapas: propagação direta da onda, propagação reversa da onda e aplicação da condição de imagem. A MRT não se utiliza de aproximações para simplificar o campo de ondas como a migração Kirchhoff e a migração pelo traçado de raio, por isso a MRT é um método poderoso. Os possíveis artefatos contidos ao final da MRT, em geral, não são relativos às aproximações da propagação de ondas, mas sim são devidos a elementos indesejáveis no princípio fundamental de imageamento (LEVEILLE et al., 2011).

A MRT pre stack é efetuada por tiros e seu resultado é uma imagem sísmica em profundidade, a MRT pode ser dividida em três fases distintas: A modelagem direta, a propagação reversa no tempo e a etapa de imageamento. Cada uma dessas etapas é realizada por cada perfil de tiro dado sobre a região na qual se deseja obter uma sessão migrada. Portanto uma característica deste algoritmo é a dependência do custo computacional em função do número de tiros dados.

A MRT utiliza um modelo de velocidades e os dados de tiro como entrada em seu algoritmo. O modelo de velocidades pode ser um modelo fictício que simula um cenário geológico chamado de modelo sintético, ou pode-se utilizar um modelo de velocidades proveniente de uma Tomografia sísmica ou de uma FWI no caso de dados reais.

A primeira etapa é a modelagem direta cujo campo de ondas é propagado da fonte até os receptores. A segunda etapa consiste na propagação dos campos de onda registrados pelos receptores no sentido reverso do tempo, à partir das posições dos receptores na superfície do modelo de velocidades. Durante a depropagação aplica-se a condição de imagem entre os campos de onda direto e depropagado.

2.7 Condição de imagem

O princípio fundamental do imageamento é tal como definido por (CLAERBOUT, 1971) “O refletor existe nos pontos da subsuperfície onde a primeira chegada da onda descendente coincide num tempo e no espaço com a onda ascendente”, a figura 8 ilustra o conceito citado.

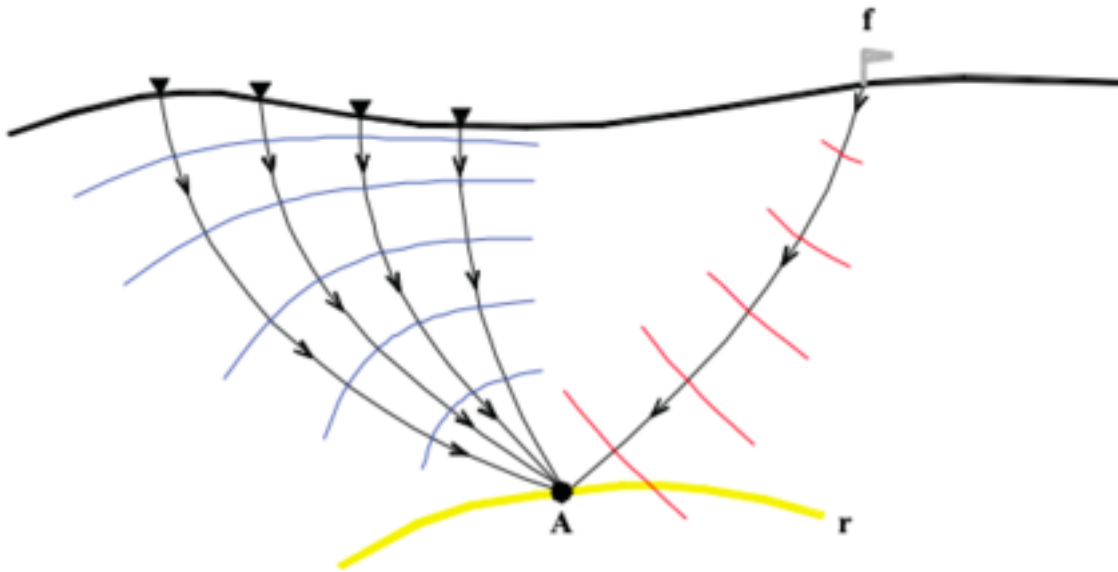


Figura 8 – Princípio fundamental do imageamento Fonte: Bulcão (2004)

A partir desse princípio fundamental foram formuladas as chamadas condições de imagem. As condições de imagem são formulações matemáticas que utilizam elementos da propagação de ondas como o tempo de trânsito e a amplitude do campo de ondas, por exemplo, para definir a existência de pontos imagem nas interfaces do modelo de velocidades.

A condição de imagem por correlação cruzada (WHITMORE; LINES, 1986) é a formulação mais empregada atualmente nos algoritmos de MRT, devido a sua estabilidade computacional e a por sua capacidade de posicionar os traços sísmicos corretamente em subsuperfície. Entretanto novas condições de imagem vem sendo desenvolvidas para melhorar os resultados obtidos no emprego da MRT, pois a qualidade da imagem sísmica é um limitante de etapas posteriores como a tomografia sísmica e a interpretação sísmica.

Portanto o desenvolvimento de novas condições de imagem é fundamental para avanços na exploração de regiões complexas em subsuperfície como o Pré-Sal brasileiro.

2.7.1 Condição de imagem por correlação cruzada

A condição de imagem por correlação cruzada é a condição de imagem convencional aplicada a MRT (BIONDI; SHAN, 2002). A imagem é obtida através da correlação entre o campo produzido por uma única fonte na superfície e o campo gerado pelo grid dos receptores. A imagem empilhada equivalente a correlação cruzada é obtida somando ao

longo de uma linha sísmica as fontes(s) definidas por:

$$I(z, x) = \sum_s S_s(t, z, x) R_s(t, z, x) \quad (9)$$

2.7.2 Condições de imagem por correlação cruzada normalizada

A condição de imagem anteriormente apresentada é uma boa aproximação da condição de imagem idealmente desenvolvida por (CLAERBOUT, 1971), entretanto é bastante suscetível a formação de ruído retroespalhado causado pelo aspecto simétrico do campo da fonte e do *grid* de receptores causando distorções na imagem obtida. Uma forma de atenuar tais efeito na imagem final é ponderar a correlação cruzada pelos termos de iluminação da fonte e do receptor (KAELIN; GUITTON, 2006):

$$I(z, x) = \sum_s \frac{\sum_t S_s(t, z, x) R_t(t, z, x)}{\sum_t S_s^2(t, z, x)} \quad (10)$$

$$I(z, x) = \sum_s \frac{\sum_t S_s(t, z, x) R_t(t, z, x)}{\sum_t R_s^2(t, z, x)} \quad (11)$$

Pode-se computar cada termo de iluminação separadamente à condição de imagem para ter uma ideia da contribuição que cada termo possui na condição de imagem. As figuras 9 e 10 apresentam a matriz de iluminação para um único tiro no modelo Hess, tanto do campo da fonte quanto do grid de receptores.

A matriz de iluminação da fonte sugere que a energia da fonte está mais concentrada próxima da posição do tiro e se espalha suavemente para as regiões mais afastadas da posição do tiro. Então pode-se esperar que a contribuição do termo de iluminação da fonte irá contribuir nas regiões do modelo nas vizinhanças das posições de tiro e menos nas partes profundas do modelo utilizado.

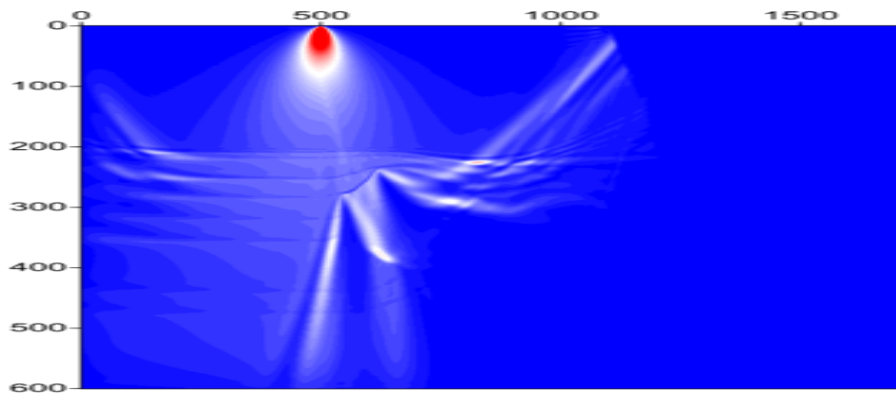


Figura 9 – Matriz de iluminação do campo da fonte

Já a matriz de iluminação do grid de receptores indica que a energia do campo dos receptores é sensível a contrastes de velocidade, uma vez que seu trajeto está alinhado na direção dos fortes contrastes presentes no modelo. Tal fato sugere que o termo de iluminação do grid de receptores irá beneficiar estruturas afetadas por elevados contrastes de velocidade.

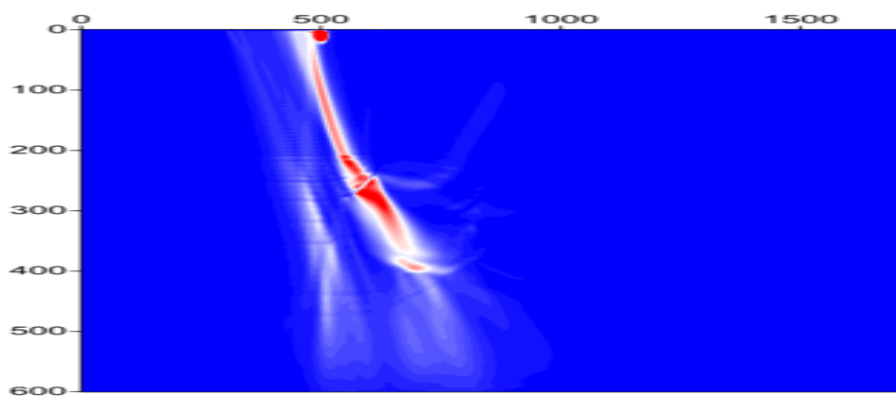


Figura 10 – Matriz de iluminação do campo do grid de receptores

2.7.3 Condição de imagem baseada na iluminação da fonte e do receptor combinadas

Considerar termos de iluminação na condição de imagem convencional é uma forma de atenuar os artefatos e melhorar a qualidade da imagem migrada. O termo de iluminação da fonte se mostra capaz de atenuar os artefatos do lado da fonte e melhorar a qualidade

da imagem com relação a correlação cruzada convencional, já o termo de iluminação do receptor é capaz de valorizar as reflexões profundas. É evidente, portanto, que cada termo de iluminação possui sua contribuição na condição de imagem separadamente. Então combinar tais efeitos seria capaz de incorporar as qualidades de ambos os termos de iluminação na condição de imagem. Com o objetivo de melhorar o imageamento em regiões Yang et al. (2018) utilizou o conceito de iluminação bi-direcional, utilizado para melhorar a estimativa do gradiente da Full-Wave Form Inversion (CHEN et al., 2013) e introduziu a expressão:

$$E(z, x) = \sqrt{R_s^2(t, z, x)S_s^2(t, z, x)}$$

Esta expressão é o termo de iluminação bi-direcional incluindo múltiplos receptores. Ponderando a correlação convencional chegamos a expressão:

$$I(z, x) = \sum_s \frac{\sum_t S_s(t, z, x)R_t(t, z, x)}{\sum_t \sqrt{R_s^2(t, z, x)S_s^2(t, z, x)}} \quad (12)$$

Assim como na metodologia anteriormente descrita pode-se visualizar a matriz de energia da iluminação combinada do campo da fonte e do grid de receptores, como mostra a figura 11. A matriz de iluminação no modelo Hess demonstra que a condição de imagem acima incorpora as contribuições de cada termo de iluminação individuais em uma só condição de imagem.

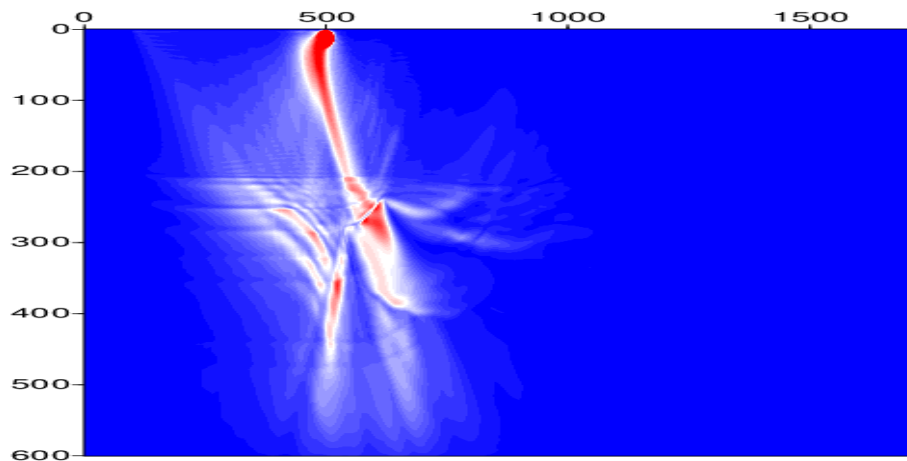


Figura 11 – Matriz de iluminação da fonte e do receptor combinadas

2.7.4 Filtro Laplaciano

Devido ao ruído de baixa frequência presente nas imagens migradas obtidas através do algoritmo de MRT é aplicado o filtro laplaciano no domínio da imagem. Tal ruído de baixa frequência é originado pelos campos refletidos à partir dos campos direto e

depropagado no modelo de velocidades, tais campos refletidos não são responsáveis pelo imageamento das estruturas presentes no modelo de velocidades e seu resultado é um ruído que deteriora a qualidade da imagem. Dificultando a interpretação sísmica e a construção de modelos geofísicos proveniente de tomografia e FWI. O filtro laplaciano em duas dimensões atua nos pontos da imagem migrada $I(x, y)$ e é definido por:

$$I_f(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \quad (13)$$

Onde I_f denota a imagem filtrada pelo laplaciano.

3 Método

Neste capítulo serão discutidos os principais métodos empregados para atingir os objetivos deste trabalho. Todos os procedimentos e técnicas utilizados, bem como os parâmetros empregados, tanto na aplicação da modelagem dos dados quanto na MRT serão apresentados em detalhes. As primeiras seções deste capítulo abordam os métodos de modelagem e migração empregados. As últimas seções descrevem os procedimentos empregados no condicionamento do dado de entrada para a MRT e as condições de imagem empregadas na migração.

3.1 Modelos sintéticos adotados

Os dados utilizados para testar o algoritmo de MRT foram gerados sinteticamente através da modelagem numérica acústica. Nesta seção, o modelo de camadas (fig.13), o modelo de Hess com sal (fig.12), e os parâmetros tanto para o modelo de camadas (tabela1) e modelo Hess com sal (tabela2) utilizados na modelagem numérica são apresentados, tanto o modelo mais simples. O modelo de camadas é composto por 2 camadas horizontais e representativo de três litologias com distintas velocidades compressoriais, o modelo de Hess com sal simula uma região mais complexa contendo um corpo de sal e um reservatório trapezoidal por este corpo.

3.1.1 Modelo de camadas

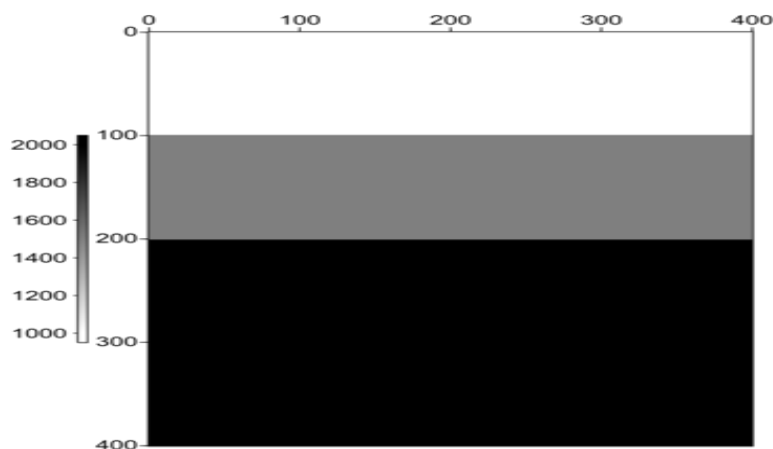


Figura 12 – Modelo de camadas

Parâmetros de modelagem	
Dimensões do modelo	(401,401)
Frequência de corte	45 Hz
Tempo de simulação	2 s
Passo de tempo	0.5 ms
Passos de tempo	4000
ΔX	5 m
ΔZ	5 m
Número de tiros	20
Geometria de aquisição	End-on
Número de canais	40
Tamanho do cabo	200 pontos do modelo
Posição inicial da fonte	ponto (100,1)

Tabela 1 – Parâmetros de modelagem para o modelo simples

3.1.2 Modelo de Hess com sal

O modelo Hess é um modelo de velocidades complexo concebido pela Society of Exploration Geophysicists (SEG), este modelo emula regiões complexas em subsuperfície com a presença de Halita. Este é um bom modelo para simular os resultados de uma migração sísmica em bacias sedimentares controladas por tectônica de sal, como o pré-sal brasileiro. Vale ressaltar que o modelo utilizado possuía originalmente 921 pontos nas horizontal, mas foi estendido lateralmente 400 pontos à direita e à esquerda para que a região definida para o imageamento fosse totalmente coberta. Isto é do ponto 400 ao ponto 1321 do modelo. Posteriormente a migração MRT a imagem foi cortada para suas dimensões originais.

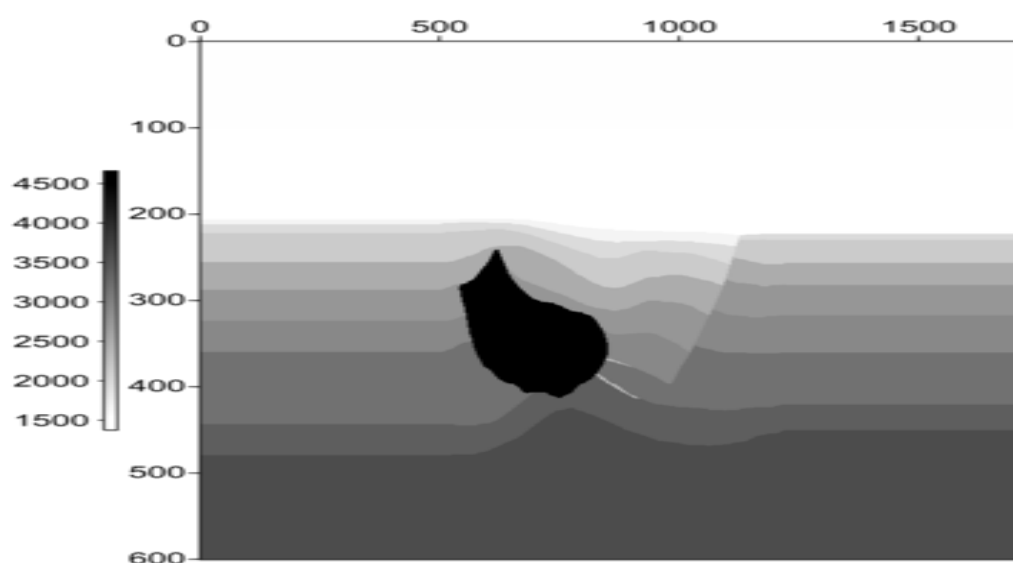


Figura 13 – Modelo Hess com sal

Parâmetros de modelagem	
Dimensões do modelo	(1721,601)
Frequência de corte	20 Hz
Tempo de simulação	9 s
Passo de tempo	0.8 ms
Passos de tempo	11278
ΔX	18 m
ΔZ	18 m
Número de tiros	100
Geometria de aquisição	End-on
Número de canais	200
Tamanho do cabo	400 pontos do modelo
Posição inicial da fonte	ponto (500,3)

Tabela 2 – Parâmetros de modelagem para o modelo Hess

3.2 Modelagem acústica

O modelo acústico utilizado é uma aproximação do caso isotrópico em duas dimensões negligenciando o gradiente de densidades. O efeito de desprezar o gradiente de densidades atua sobre a representação da refletividade na seção migrada em termos de amplitude mas não viola o princípio fundamental do imageamento fazendo desta uma aproximação válida.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) = f(t)$$

3.2.1 Termo fonte

Foi escolhido um termo fonte para representar o pulso emitido pela fonte sísmica, representado pela *titwavelet* Ricker (fig.14). A wavelet Ricker, nomeada em homenagem a Norman H. Ricker (1896-1980), é definida matematicamente através da expressão:

$$F(t) = [2\pi (\pi f_c t_d)^2 - 1] \exp [-\pi (\pi f_c t_d)^2]$$

A sua transformada de Fourier é dada por:

$$F(\omega) = \frac{2\omega^2}{\pi^2 f_c^3} \exp \left[\frac{-\omega^2}{\pi f_c^2} \right]$$

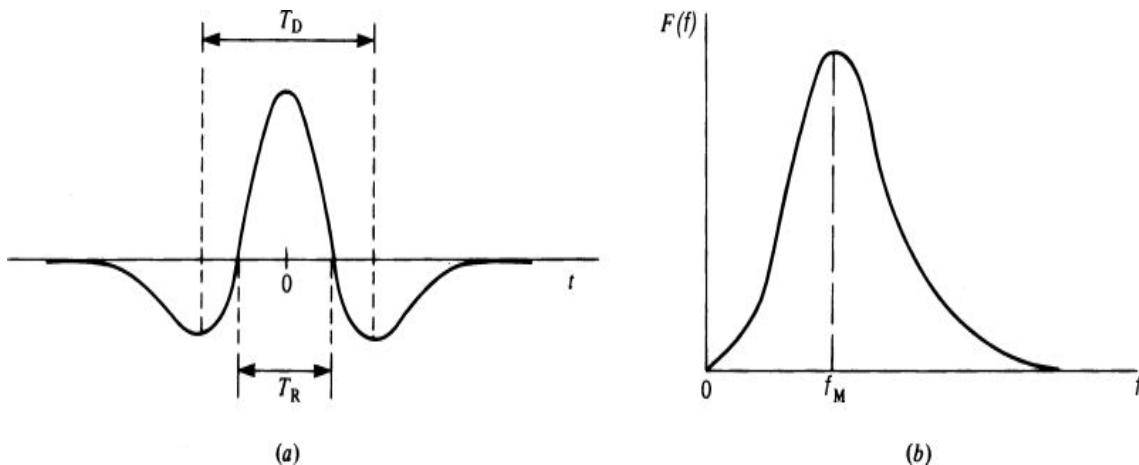


Figura 14 – Assinatura da fonte representada pela wavelet ricker. Painel (a) representação no tempo e (b) espectro de frequência absoluto. Fonte: Wiki (2019)

3.2.2 Condições de contorno

Segundo a teoria de equações diferenciais para que o sistema de equações diferenciais tenha solução única em um domínio em particular é necessário impor condições iniciais e

condições de contorno. O problema da propagação de onda em questão estará sujeito a condições de contorno ditas naturais e essenciais, conhecidas como condições de Dirichlet e Neumann na superfície do modelo como ocorre na natureza e permitindo-se simular as múltiplas de superfície e o ghost na modelagem.

$$P(\vec{x}, t = 0) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \hat{n}}(\vec{x}, t = 0) = 0 \quad (15)$$

Condições não-reflexivas propostas por Reynolds (1978) serão aplicadas nas demais bordas do modelo de velocidades, esta condição de contorno é utilizada em meios semi-finitos com o intuito de não gerar reflexões na borda do modelo, simulando uma propagação de onda mais realística na Terra na qual podemos assumir um meio infinito, isto é, as ondas se propagam infinitamente nas coordenadas horizontais com respeito a propagação da onda. Esta condição de contorno será combinada a uma camada de amortecimento da amplitude do campo de ondas.

$$\frac{d}{dx_i} \pm \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

onde x_i representa a variável x ou a variável z , caso a borda seja, respectivamente lateral ou a borda inferior.

3.2.3 Condições não reflexivas e camada de Cerjan

Como dito na seção anterior a condição de Neumann é combinada a uma camada de amortecimento, para atenuar os campos acústicos que se propagam na direção das bordas não reflexivas do modelo semi-finito. A camada de amortecimento utilizada foi proposta por Cerjan (CERJAN et al., 1985), em que se aplica um fator de decaimento de forma a atenuar a amplitude do campo acústico da forma:

$$f(k) = \exp [-(f(n - k))^2],$$

onde, f é o fator de amortecimento, n é o número de pontos discretos envolvidos no cálculo do amortecimento e k é a distância da borda em pontos.

No presente trabalho foi adotado $n=100$ $k=100$ e $F=7.5$ tanto na modelagem numérica quanto no algoritmo de MRT.

4 Resultados

Nesse capítulo, serão apresentados os resultados da modelagem de dados sintéticos e do algoritmo de MRT com diferentes condições de imagem.

Pode-se observar o campo de ondas que se propaga no modelo de Hess com sal através da visualização de cada instante de propagação da onda. À partir da modelagem acústica sintética foram produzidos os sismogramas sintéticos para o modelo de Hess com sal registrando o campo de ondas na superfície.

4.1 Modelagem acústica

Nesta seção serão apresentados resultados com respeito a modelagem sintética de dados tanto do modelo de camadas quanto do modelo de Hess com sal.

4.1.1 Modelo de camadas

A figura 15 mostra o campo de propagação para o vigésimo tiro no modelo de camadas.

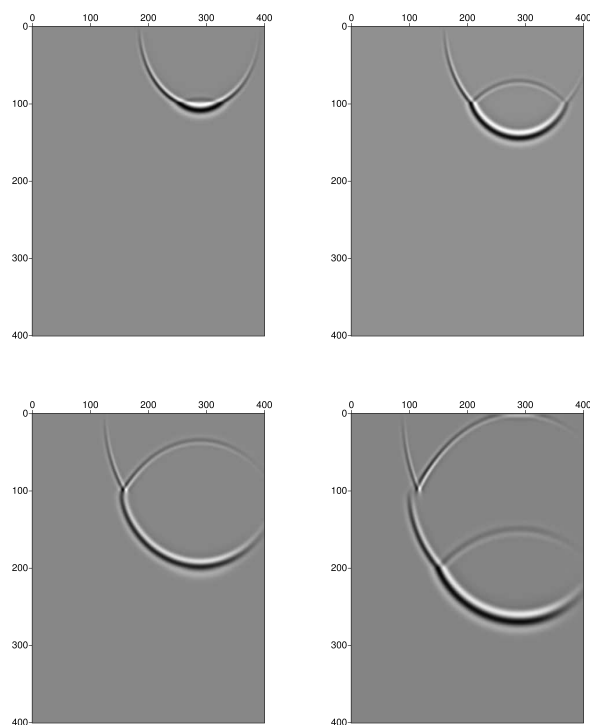


Figura 15 – Propagação do campo de ondas acústicas para o modelo de camadas

A figura 16 é o sismograma sintético que representa o registro dos campos de onda refletivos para o décimo tiro no modelo de camadas.

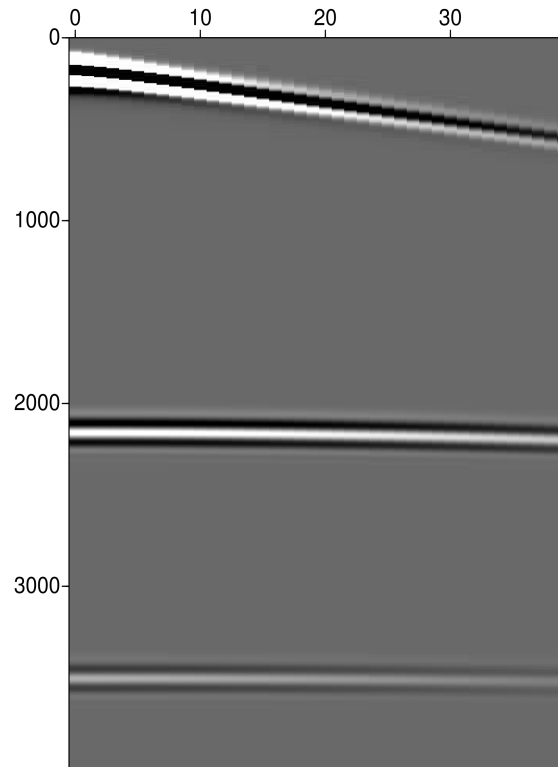


Figura 16 – Sismograma sintético tiro número 10. O eixo vertical indica o tempo de registro em segundos e eixo o horizontal o número do receptor.

4.1.2 Modelo de Hess com Sal

A figura 17 representa o campo de ondas para o tiro número 62 no modelo de Hess com sal.

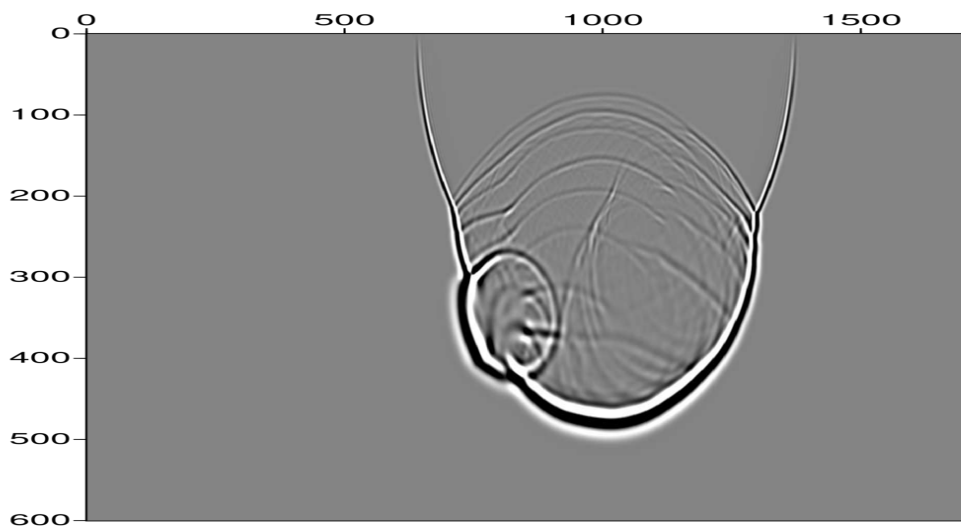


Figura 17 – Campo de ondas para o instante de tempo 4,5 segundos de modelagem.

A figura 18 é o sismograma sintético que representa o registro dos campos de onda refletidos para o tiro número 80 no modelo de Hess com sal.

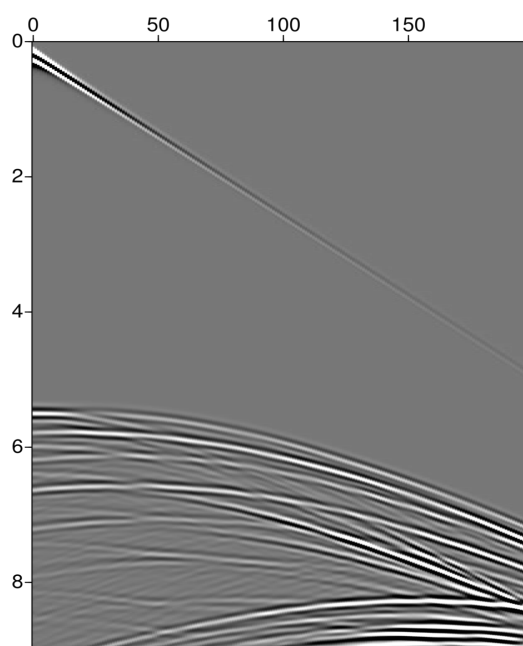


Figura 18 – Sismograma sintético tiro número 80. Mesma definição da figura ??

4.2 Migração Reversa no Tempo

Nesta seção serão apresentados os resultados das diferentes condições de imagem utilizadas no imageamento dos modelos de camadas e Hess com sal.

4.2.1 Modelo de camadas

A figura 19 é o resultado da MRT para a condição de imagem por correlação cruzada.

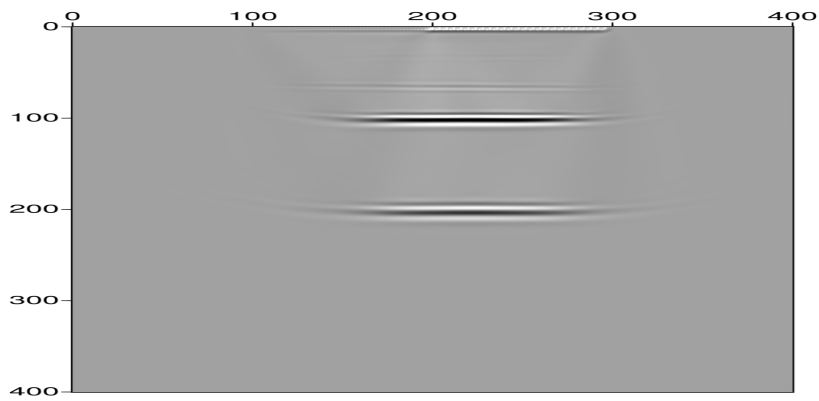


Figura 19 – Condição de imagem por correlação cruzada, as cores escuras representam valores positivos e brancas valores negativos.

A figura 20 é o resultado da MRT para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação da fonte.

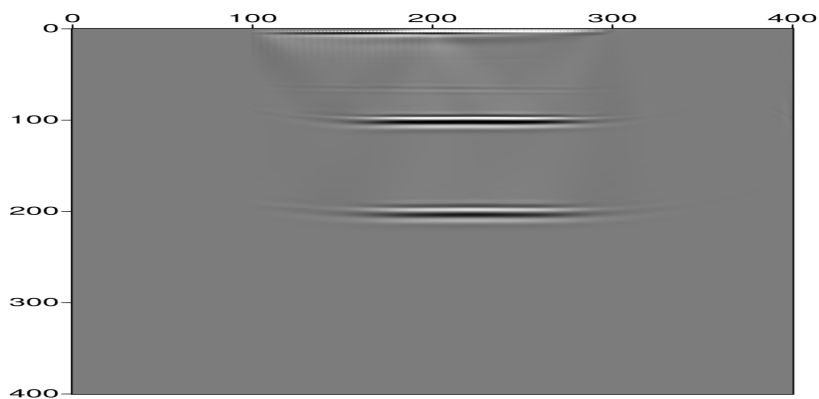


Figura 20 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte.

A figura 21 é o resultado da MRT para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação do *grid* de receptores.

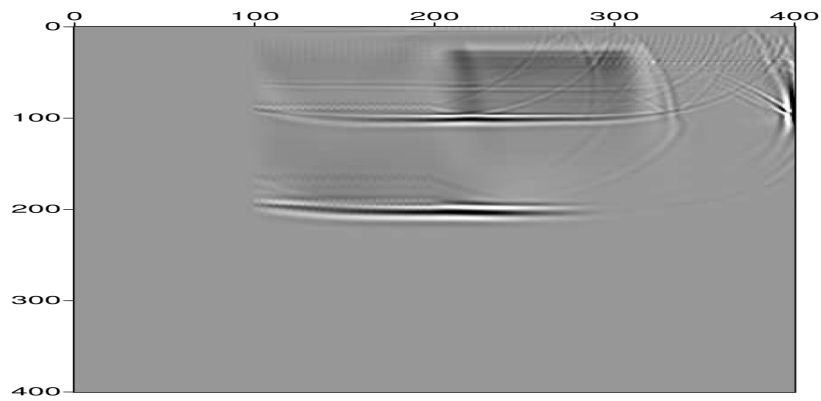


Figura 21 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do *grid* dos receptores.

A figura 22 é o resultado da MRT para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação da fonte e do *grid* de receptores combinados.

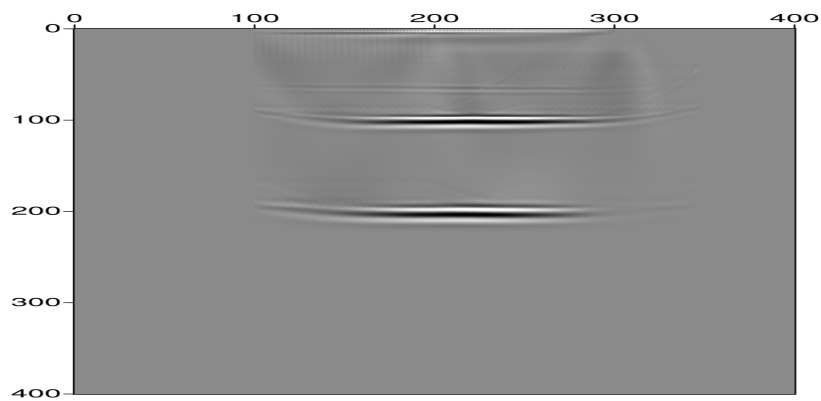


Figura 22 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e do *grid* de receptores combinadas.

4.2.2 Modelo de Hess com sal

A figura 30 é o resultado da MRT para a condição de imagem por correlação cruzada.

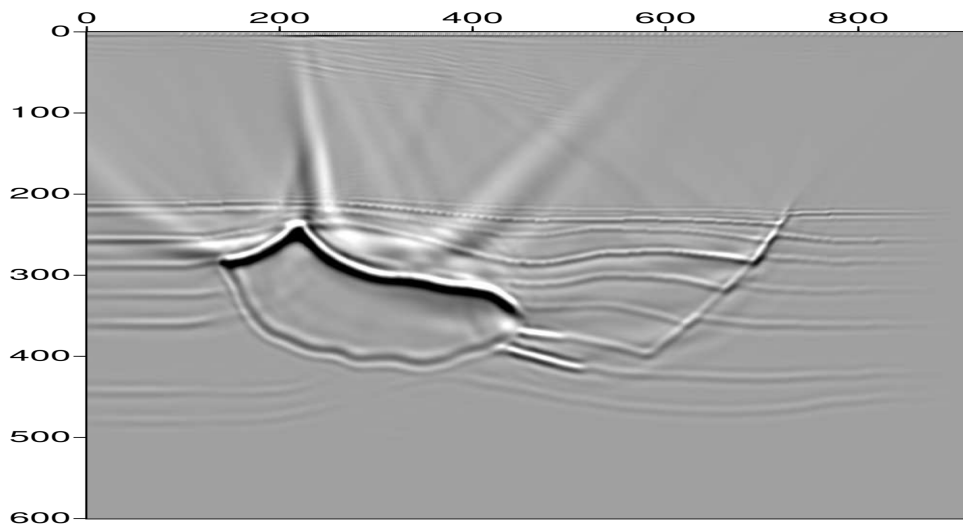


Figura 23 – Condição de imagem por correlação cruzada.

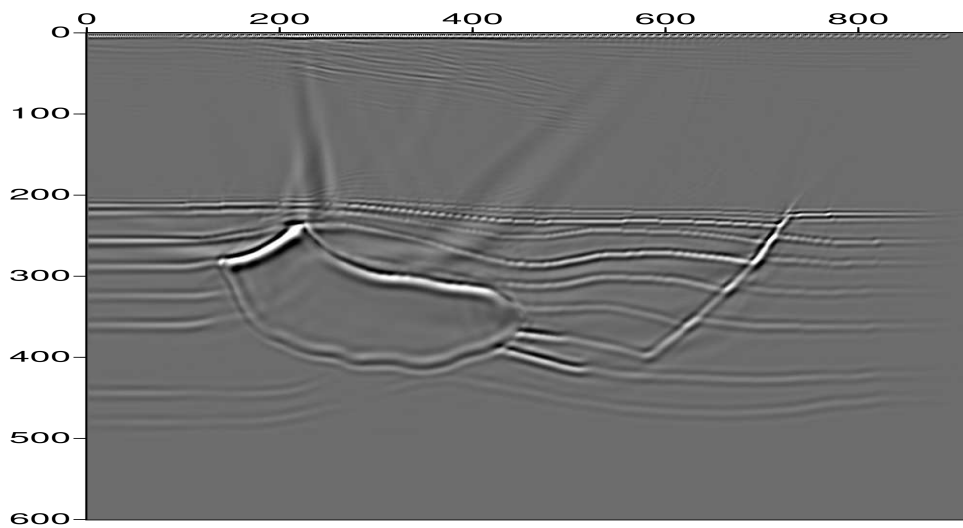


Figura 24 – Condição de imagem por correlação cruzada com filtro laplaciano aplicado.

A figura 25 é o resultado da RTM para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação da fonte.

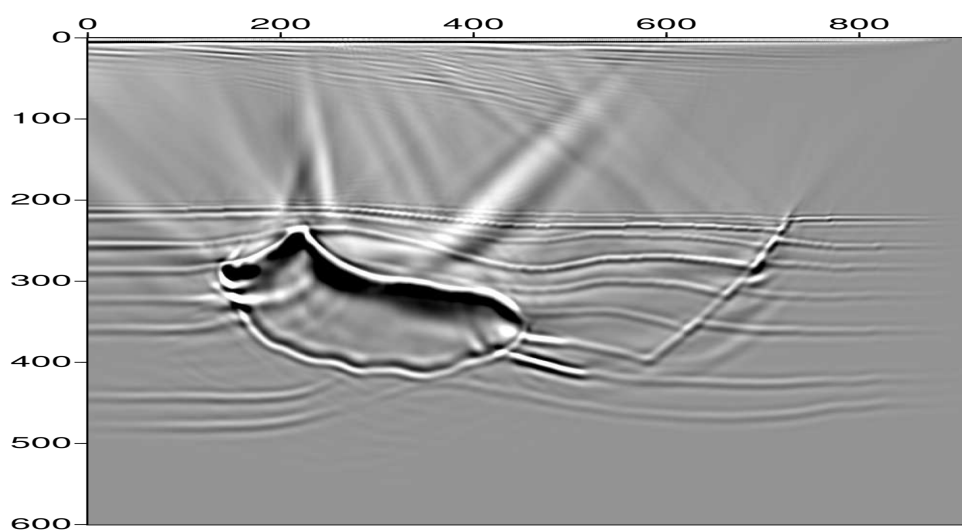


Figura 25 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte.

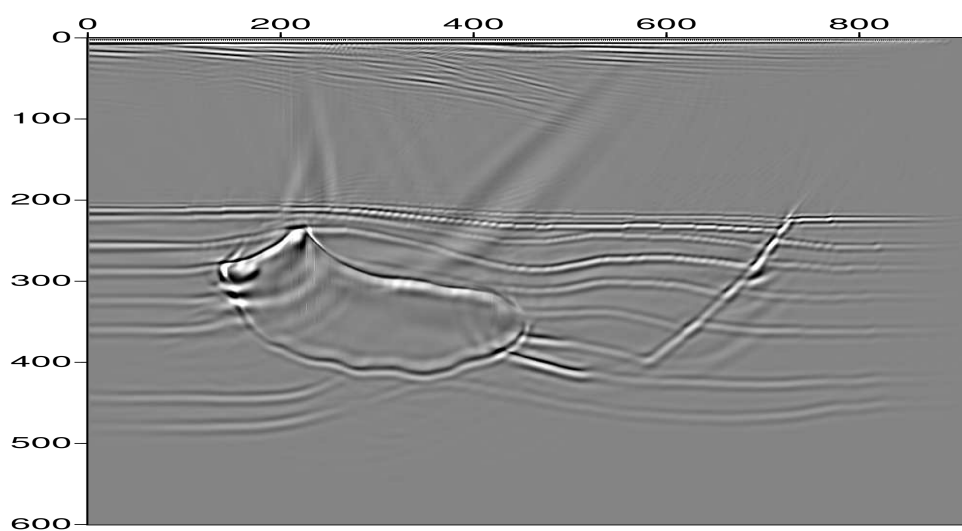


Figura 26 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte com filtro laplaciano aplicado.

A figura 27 é o resultado da RTM para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação do *grid* de receptores.

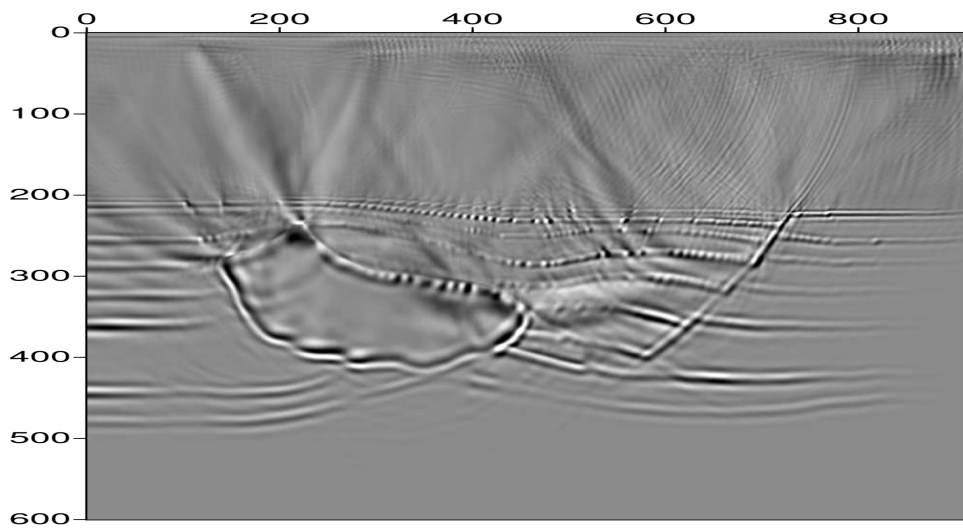


Figura 27 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do *grid* dos receptores.

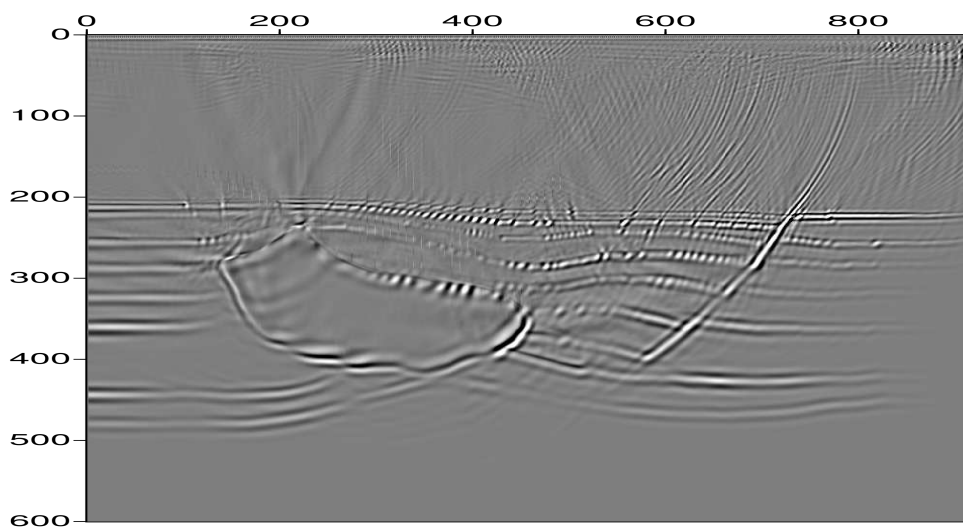


Figura 28 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do *grid* dos receptores com filtro laplaciano aplicado.

A figura 29 é o resultado da RTM para a condição de imagem por correlação cruzada ponderada pelo termo de iluminação da fonte e do *grid* de receptores combinados.

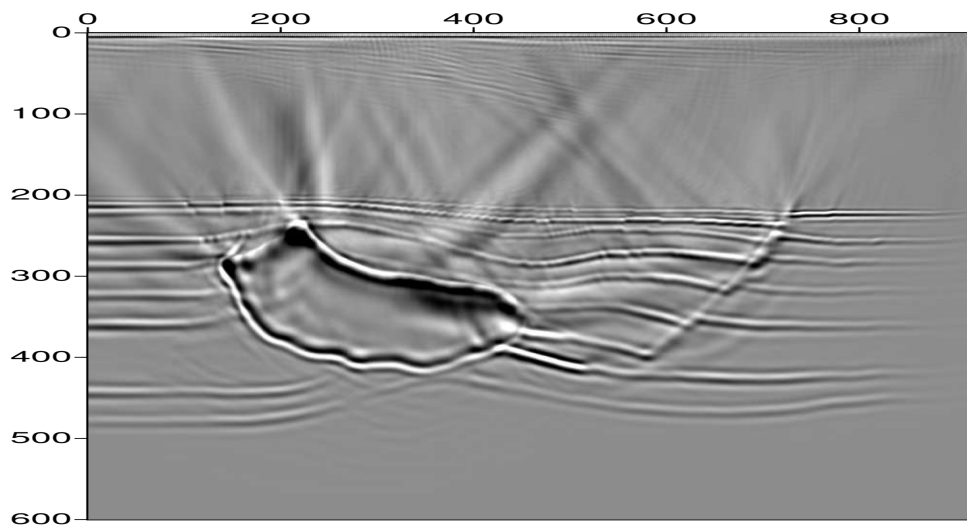


Figura 29 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e do *grid* de receptores combinadas.

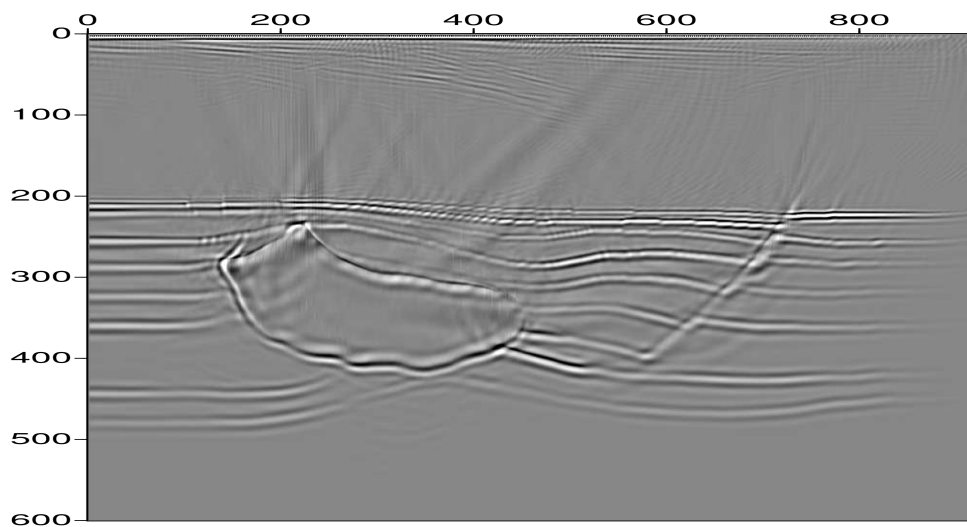


Figura 30 – Condição de imagem por correlação cruzada ponderada pela iluminação do campo da fonte e *grid* dos receptores combinadas com filtro laplaciano aplicado.

As imagens do modelo complexo obtidas para cada condição de imagem apresentam diferenças significativas entre cada uma. A imagem obtida pela condição de imagem por correlação cruzada apresenta problemas de iluminação nos refletores que compõem a base do sal e artefatos de baixa frequência característicos da RTM. A imagem obtida pela correlação cruzada ponderada pela iluminação da fonte atenuou os artefatos mais próximos às posições da fonte além de ressaltar as reflexões mais superficiais na imagem. A imagem produzida pela condição de imagem ponderada pela iluminação do campo do *grid* dos

receptores foi capaz de atenuar os artefatos nas posições próximas a linha de receptores, realçar as reflexões profundas que as condições de imagem anteriores não tiveram êxito e limitar o corpo de sal melhor do que as condições de imagem anterior. A condição de imagem ponderada pela iluminação da fonte e do *grid* de receptores combinadas apresentou os melhores resultados no imageamento do modelo complexo, apresentando melhorias individuais proporcionadas por cada termo de iluminação ponderando a correlação cruzada convencional, além de produzir uma imagem com as amplitudes melhor balanceadas do que as condições de imagem anteriores. As computações necessárias na aplicação das condições de imagem que ponderam a correlação cruzada não acarretam em grandes aumentos de custo computacional, uma vez que é necessário armazenar os campos já naturalmente calculados nos algoritmos convencionais de MRT em um campo de dimensão igual aos campos da fonte e do receptor. Além disso a simplicidade matemática de tais computações faz com que o custo computacional aumente pouco, tornando estas condições de imagem viáveis de serem implementadas para dados reais. Todas as imagens apresentaram melhor resolução espacial após a aplicação do filtro laplaciano. O filtro laplaciano também apresentou êxito em atenuar o ruído de baixa frequência originado pelas condições de imagem utilizadas na MRT.

5 Discussão e resultados

Os resultados apresentados no presente trabalho comprovam a eficácia da Modelagem Numérica em simular a propagação acústica em modelos simples e complexos. As imagens obtidas pelo algoritmo de RTM demonstram a eficiência do método em representar os refletores sísmicos em modelos complexos.

Por fim, conclui-se que incluir informações sobre a iluminação sísmica na correlação cruzada é capaz de atenuar os artefatos de baixa frequência próximas a posição da fonte ou dos receptores como foi mostrado na literatura estudada. Não obstante o resultado utilizando ambos os termos de iluminação na correlação cruzada na condição de imagem apresenta o melhor resultado dentre todas as condições de imagem utilizadas, com um acréscimo relativamente pequeno em termos de custo computacional.

Referências

- ALFORD, R.; KELLY, K.; BOORE, D. M. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 39, n. 6, p. 834–842, 1974. Citado na página 29.
- BARTOLO, L. D. Introdução à modelagem sísmica utilizando o mdf. *Apostila Minicurso UNICAMP (6h)*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.
- BAYSAL, E.; KOSLOFF, D. D.; SHERWOOD, J. W. Reverse time migration. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 48, n. 11, p. 1514–1524, 1983. Citado na página 18.
- BIONDI, B.; SHAN, G. Prestack imaging of overturned reflections by reverse time migration. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2002. p. 1284–1287. Citado na página 32.
- BULCÃO, A. Modelagem e migração reversa no tempo empregando operadores elásticos e acústicos. *Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE*, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 13, 18 e 32.
- CARCIONE, J. M.; HERMAN, G. C.; KROODE, A. T. Seismic modeling. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 67, n. 4, p. 1304–1325, 2002. Citado na página 17.
- CASTRO, R. D. de; PICOLINI, J. P. Principais aspectos da geologia regional da bacia de campos. In: *Geologia e Geomorfologia*. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 1–12. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.
- CERJAN, C. et al. A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 50, n. 4, p. 705–708, 1985. Citado na página 41.
- CHEN, Y. et al. Full waveform inversion with wave equation bi-directional illumination optimization. *Progress in Geophysics*, v. 28, n. 6, p. 3015–3021, 2013. Citado na página 35.
- CLAERBOUT, J. F. Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 36, n. 3, p. 467–481, 1971. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 33.
- FERREIRA, d. S. V. Estratégias para estudos de iluminação sísmica baseadas na equação acústica da onda. In: *Dissertação de mestrado*. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Citado na página 25.
- HILL, I.; BROOKS, M.; KEAREY, P. Geofísica de exploração. *Editora Oficina de textos*, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 13, 22, 23 e 24.
- KAELIN, B.; GUITTON, A. Imaging condition for reverse time migration. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2006*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2006. p. 2594–2598. Citado na página 33.

- LEVEILLE, J. P. et al. Subsalt imaging for exploration, production, and development: A review. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 76, n. 5, p. WB3–WB20, 2011. Citado na página 31.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. v. 2. Citado na página 25.
- REYNOLDS, A. C. Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 43, n. 6, p. 1099–1110, 1978. Citado na página 41.
- ROCHA, P. M. P. *Aquisição sísmica*. 2019. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/294785/>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 20.
- SILVA, M. W. X. Migração reversa no tempo com diferentes condições de imagem. *Mestrado, COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2009. Citado na página 18.
- SOUZA, M.; PORSANI, M. *Aplicação do método AB semblance ponderado e determinação de parâmetros anisotrópicos em meios VTI*. Tese (Doutorado), 07 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 20.
- WHITMORE, N. D.; LINES, L. R. Vertical seismic profiling depth migration of a salt dome flank. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 51, n. 5, p. 1087–1109, 1986. Citado na página 32.
- WIKI, S. *Ricker wavelet*. 2019. Disponível em: <https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Ricker_wavelet>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 40.
- YANG, H. et al. Reverse time migration with combined source-receiver illumination. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2018. p. 4448–4452. Citado na página 35.
- YILMAZ, Ö. *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. [S.l.]: Society of exploration geophysicists, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.
- ZOEPPRITZ, K. On the reflection and propagation of seismic waves. *Göttinger Nachrichten*, v. 1, n. 5, p. 66–84, 1919. Citado na página 22.