



Amplitude Versus Ângulo (AVA): Análise do emprego de Diferentes formas de Extrapolação nas Imagens Oriundas da Migração Reversa no Tempo

¹Ana Paula dos Santos da Silva, ²André Bulcão, ¹Luiz Landau, ¹Josias José da Silva

¹Lamce/Lab2M/COPPE/UFRJ

²Cenpes/PETROBRÁS

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The angle dependent reflectivity of a reservoir target is a crucial input for reservoir characterization. A prestack 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 migrated section amplitudes obtained by Reverse Time Migration (RTM). Especially for true-amplitude wave-equation migration algorithms, a stable schedule is essential to recover the medium reflectivity successfully. To obtain accurate image amplitudes needed to apply amplitude versus angle analysis (AVA), source and receiver extrapolations must be able to accurately reconstruct their respective wavefields at the target reflector.

Introdução

Os chamados coeficientes de reflexão e transmissão da onda plana desempenham um papel importante na propagação de ondas sísmicas. Na Geofísica, para estimar-se tais coeficientes em sub-superfície empregam-se os valores das amplitudes presentes nas imagens em profundidade. Deste modo, esquemas de migração que produzam amplitudes condizentes com as propriedades físicas dos refletores são de extrema importância.

A Migração Reversa no Tempo foi escolhida para ser utilizada nas simulações realizadas, pois extrapola adequadamente o campo de ondas através da Equação Acústica Completa da Onda, que satisfaz aos princípios de reciprocidade e conservação de energia e apresenta bons resultados ao imagear estruturas complexas [BAYSAL et al., 1983].

Na Migração Reversa no Tempo (RTM) usando a Equação Acústica da Onda, também chamada de Equação Completa da Onda, existem artefatos na imagem em profundidade associados com a extrapolação

do campo de onda, que são originados durante o processo de depropagação. Estes artefatos prejudicam o imageamento de estruturas complexas e as análises de variações de amplitude com o ângulo (AVA), pois neste caso imagens livres de artefatos e com amplitudes variando de acordo com as propriedades e ângulos de incidência são almejadas.

Neste trabalho avalia-se a influência nas amplitudes das imagens em profundidade, obtidas com a aplicação do esquema de Migração Reversa no Tempo, considerando-se três diferentes esquemas para a extrapolação do campo de ondas; relacionados a seguir: (i) Equação Completa da Onda (*two-way*) (AC); (ii) Equação Não Reflexiva da Onda [BAYSAL, 1984] (NR); e (iii) Equação Completa da Onda adicionando-se um esquema de separação direcional do campo de ondas [BULCÃO, 2007] (SC).

O primeiro método utilizado para a avaliação das amplitudes das imagens é baseado na Equação Acústica da Onda (AC), sendo muito difundido atualmente. Deste modo será tomado como esquema de referência.

O próximo esquema avaliado neste trabalho emprega a denominada Equação Acústica Não Reflexiva da Onda (NR) nas etapas de obtenção da denominada matriz de tempo de trânsito e de depropagação do campo de ondas ascendentes, no esquema de Migração Reversa no Tempo. O uso desta equação fornece um ótimo resultado para a migração de "Turning Waves" devido à redução do coeficiente de reflexão efetivo (tornando-se nulo para o caso de incidência normal), como mostrado por BAYSAL et al. (1984). Para regiões homogêneas do modelo de velocidades esta equação simplifica-se na tradicional Equação Acústica da Onda.

E por fim, são realizadas simulações implementando um esquema de separação do campo de ondas em suas componentes ascendente e descendente (SC), desenvolvido por BULCÃO et al (2007). Destaca-se que as extrapolações são realizadas empregando a Equação Acústica da Onda e, a cada instante de tempo da solução, aplica-se o esquema de separação direcional do campo de ondas.

Na Geofísica existem vários métodos de migração que aplicam diferentes versões da equação unidirecional (*one-way*) da onda para fazer a extrapolação do campo de ondas apenas na direção descendente. O uso desta equação evita o aparecimento de alguns artefatos indesejáveis no processo de migração, porém com este tipo de metodologia alguns tipos de ondas não são bem representados, como as "turning waves" [SILVA, 1995].

A partir resultados dos três esquemas acima mencionados para a obtenção dos campos de ondas empregados na Migração Reversa no Tempo, para a formação das imagens em profundidade, foram feitas análises de AVA considerando-se um modelo de velocidades simples. Deste modo, possibilita-se a comparação da resposta analítica com os resultados de tais esquemas, identificando-se o esquema que apresenta melhor comportamento.

Equação Acústica da Onda (AC)

Geralmente, em problemas geofísicos de propagação de ondas assume-se que o meio físico seja regido pela Equação Acústica da Onda, onde se consideram apenas ondas compressionais.

A Equação Acústica da Onda pode ser simplificada e expressa em duas dimensões através de uma equação diferencial, que representa o comportamento do campo de ondas acústico com variações no espaço e no tempo, considerando a densidade do meio constante. Matematicamente tem-se a equação (1) a seguir:

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

Equação Não Reflexiva da Onda (NR)

A denominada Equação Não Reflexiva da Onda é uma modificação da Equação Acústica da Onda, onde impõe-se que a impedância seja constante ao longo de todo o modelo [SILVA, 1995]. Esta modificação na Equação Acústica da Onda minimiza as reflexões durante o processo de extrapolação do campo de ondas, reduzindo o aparecimento dos indesejáveis artefatos característicos ao método de Migração Reversa no Tempo [CARCIONE, 2003].

A Equação Acústica Não Reflexiva da Onda em duas dimensões é representada pela equação (2). Nota-se que esta equação possui um termo adicional em relação a Equação Acústica da Onda (equação 1).

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

Separação Direcional do Campo de Onda (SC)

No esquema proposto por BULCÃO *et al.* (2007), emprega-se a Equação Acústica da Onda e, em cada passo de tempo, aplica-se um procedimento para a separação do campo de ondas nas direções ascendente e descendente. Deste modo, pode-se empregar tal esquema obtendo-se a componente do campo de ondas

na direção adequada para o imageamento sísmico durante o método de Migração Reversa no Tempo.

Esta metodologia de separação direcional 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 *et al.*, 2007].

Neste esquema, a equação (3), é utilizada com o intuito realizar a separação do campo de onda na direção descendente.

$$u^- = \frac{1}{2} (\dot{u} - cu_j) \quad (3)$$

Onde: *u* é o campo de onda acústico, *c* é a velocidade de propagação e *u*⁻ representa o campo de onda na direção descendente.

Exemplos da Extrapolação dos Campos de Ondas

Com o intuito de exemplificar a distinção entre os diferentes esquemas sugeridos para a extrapolação do campo de onda, a seguir serão apresentadas algumas simulações em modelos de velocidades simples.

A figura (1) apresenta dois *snapshots*, considerando o mesmo instante de tempo de extrapolação, para o campo de ondas propagado com a Equação Acústica da Onda (AC) (em inglês, *two-way wave equation*) e o snapshot do campo de ondas propagado com a Equação Não Reflexiva da Onda (NR) (em inglês, *two-way nonreflecting wave equation*). Considerando-se um modelo de velocidades composto por duas camadas paralelas (com dimensões: 3600 m x 3600 m, respectivamente nas direções X e Z, e no qual a interface plana está localizada a uma profundidade de 1200 metros). Nesta simulação empregou-se um intervalo entre pontos da malha de 6 metros e uma fonte sísmica do tipo Ricker com frequência de 45 Hz [CUNHA, 1997].

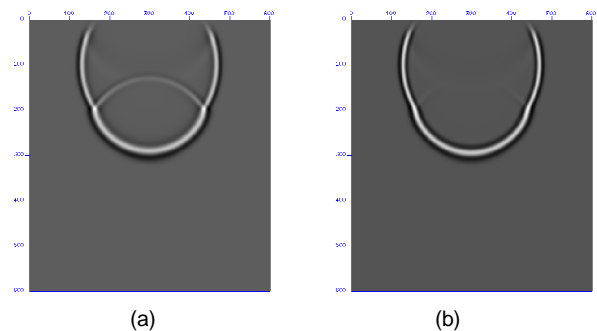


Figura 1. Snapshots do campo de ondas: (a) Equação Acústica da Onda (*two-way wave equation*) e (b) Equação Não Reflexiva da Onda (*two-way nonreflecting wave equation*).

Analisando a figura (1) nota-se que a amplitude do campo de ondas refletido na interface do modelo de velocidades empregando a Equação Não Reflexiva da Onda (NR) é consideravelmente menor que a obtida

através da Equação Acústica da Onda (AC), o que poderá vir a propiciar uma redução dos artefatos no processo de migração. Este efeito é causado por uma redução no coeficiente de reflexão efetivo com a utilização da Equação Não Reflexiva da Onda

Para exemplificar o esquema de separação de campo de onda (SC) foi realizada uma simulação em um modelo de velocidades homogêneo, no qual a fonte sísmica encontra-se localizada no centro do modelo, com o intuito de testar a eficácia do esquema. A figura (2) mostra a propagação do campo de ondas completo (obtido com a Equação Acústica da Onda) e o campo de ondas após a aplicação do esquema de separação direcional na direção descendente.



Figura 2. Campos de ondas: completo (a) e descendente (b), propagando-se no interior de um modelo homogêneo com a fonte posicionada no centro do modelo.

Observando-se a figura (2) pode-se concluir que o método utilizado mostra-se eficiente na separação direcional do campo de ondas. Com este esquema é possível trabalhar com a porção da energia do campo de onda (na direção descendente ou ascendente) que realmente irá contribuir para o imageamento sísmico de uma determinada interface em profundidade.

Resultados

Nas análises apresentadas a seguir empregou-se um modelo de velocidades com cinco camadas planas paralelas, no qual realizou-se um estudo de AVA (amplitude versus ângulo) considerando as amplitudes em cada uma das quatro interfaces do modelo oriundas das imagens em profundidade, obtidas através dos diferentes esquemas de extrapolação na Migração Reversa no Tempo.

Em todos os gráficos de AVA apresentados ao longo deste artigo, as amplitudes das imagens migradas foram re-escaladas de tal forma que, para o ângulo de incidência normal, o valor de amplitude coincida com o valor teórico do coeficiente de reflexão [CHATTOPADHYAY *et al.*, 2008]. Nestes gráficos, as linhas vermelhas pontilhadas representam o ângulo de incidência máxima, considerando o dispositivo de aquisição empregado, no qual pode-se obter informações de coeficiente de reflexão.

O modelo de velocidades adotado possui 5000 m de extensão e 3000 m de profundidade. A profundidade dos refletores são, respectivamente, 600 m, 1100 m, 1600 m e 2100 m. As velocidades compressionais do modelo são: 2000 m/s, 2100 m/s, 2200 m/s, 2300 m/s e 2500 m/s, considerando as respectivas camadas em

profundidade. O espaçamento da malha (*grid*) utilizado na discretização é de 5 m e o intervalo de tempo é de 0,0004 s, para que fossem satisfeitas as condições de estabilidade e dispersão numérica. Foi utilizada uma fonte explosiva com a frequência de 30Hz. O sismograma sintético (figura 3 (a)) foi extraído em 1001 receptores localizados ao longo da superfície do modelo considerando 0,4 s de simulação, estando a fonte localizada na posição $x = 2500$ m e $y = 10$ m.

O sismograma sintético obtido na modelagem foi pré-processado antes da realização da migração, retirando-se a onda direta e, para minimizar os efeitos de borda indesejáveis no processo de migração, alguns traços laterais do sismograma também foram suavizados. Foram realizados vários testes de suavização dos traços do sismograma, atenuando-as em 50, 100, 200 e 300 traços, com o objetivo de averiguar sua influência nos gráficos de AVA para uma determinada interface. Tais sismogramas sintéticos pré-processados podem ser vistos na figura 3.

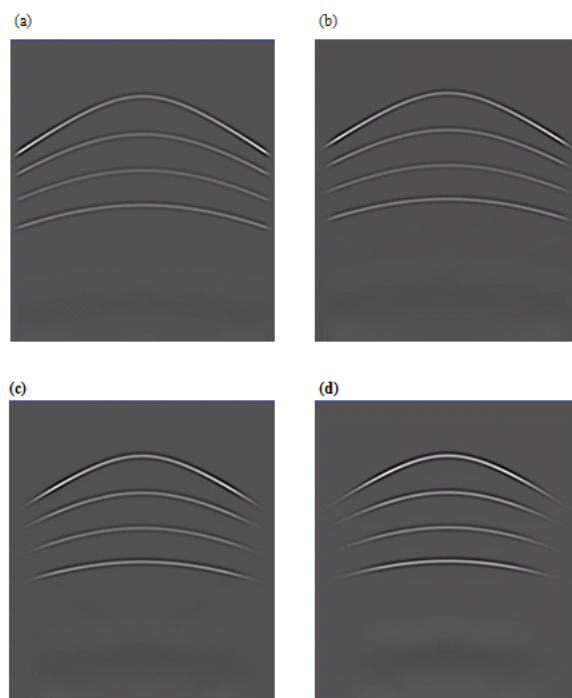


Figura 3. Sismogramas utilizados para a migração reversa no tempo. Os sismogramas foram atenuados em 50 (a), 100 (b), 200 (c) e 300 (d) traços nas laterais para reduzir os efeitos de bordas na migração.

A figura 4 mostra o gráfico de AVA referente à primeira interface do modelo de velocidades, sendo as amplitudes retiradas diretamente das imagens migradas utilizando as diferentes suavizações do sismograma apresentadas (figura 3). Analisando-se os resultados apresentados na figura 4, nota-se que com o aumento do número de traços suavizados no sismograma a amplitude da imagem em profundidade ao longo do refletor foi

comprometida, evidenciando uma perda de informações à medida que aumentou-se a suavização.

Devido aos resultados apresentados na figura 4, nas próximas simulações referentes aos resultados dos diferentes esquemas de migração, utilizou-se o sismograma com suavização de 50 traços nas laterais.

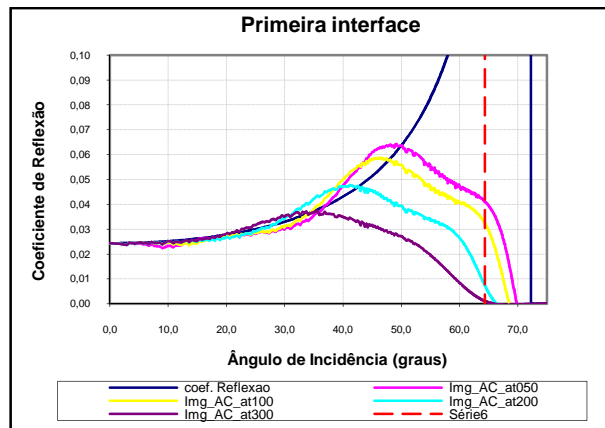


Figura 4. Amplitudes da imagem migrada na primeira interface e coeficiente de reflexão teórico em função do ângulo de incidência, utilizando-se a condição de imagem de tempo de excitação e a Equação Acústica da Onda, com diferentes suavizações no sismograma.

As imagens em profundidade obtidas com cada um dos diferentes esquemas apresentados podem ser vistas nas figuras 5. Tais imagens foram empregadas para a comparação das amplitudes ao longo dos refletores com os coeficientes de reflexão teóricos nas interfaces.

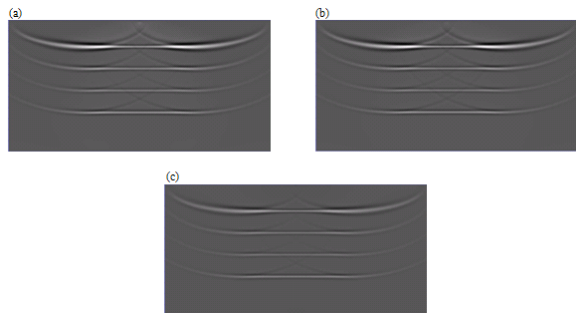


Figura 5 - Imagens em profundidade obtidas à partir do esquema de Migração Reversa no Tempo empregando: (a) Equação Acústica da Onda (AC), (b) Equação Não Reflexiva da Onda (NR) e, (c) Equação Acústica da Onda com o esquema de Separação do Campo de Ondas (SC).

As imagens em profundidade obtidas se mostraram equivalentes devido à simplicidade de um modelo de velocidades de camadas planas paralelas. Porém, com a adoção do esquema de separação do campo de ondas a imagem mostrou uma redução dos artefatos característicos do esquema de Migração Reversa no Tempo.

Nas figuras 6,7,8 e 9 estão plotados os gráficos do estudo de AVA, respectivamente, para a primeira, segunda, terceira e quarta interfaces do modelo de velocidades, considerando os três diferentes esquemas apresentados para a extrapolação do campo de ondas. Os ângulos de incidência máximos em que se consegue obter informações de amplitude para cada interface, considerando as dimensões do dispositivo de aquisição e do modelo de velocidades, são: 64,3°, 50,3°, 40,2° e 33,2°, respectivamente para a primeira, segunda, terceira e quarta interfaces.

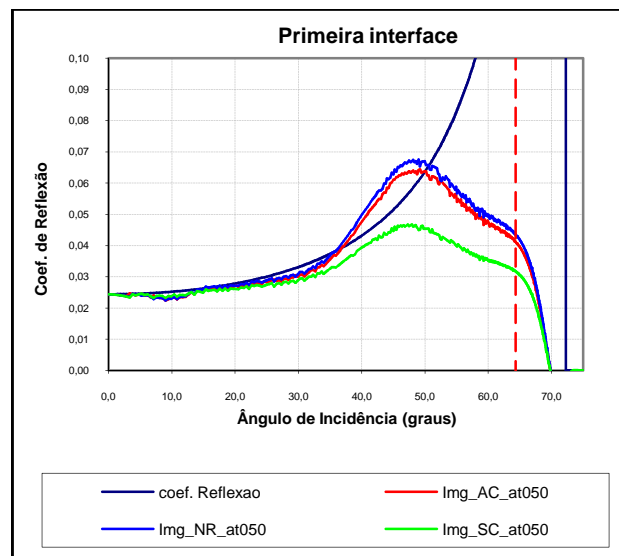


Figura 6. Análise de AVA para a primeira interface do modelo

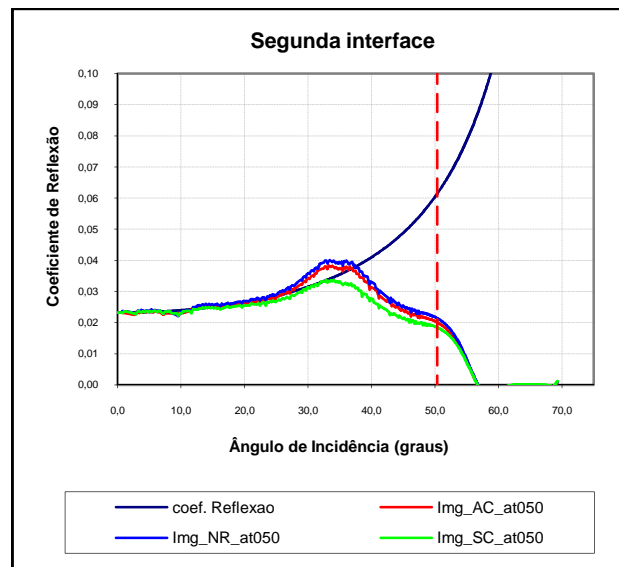


Figura 7. Análise de AVA para a segunda interface do modelo

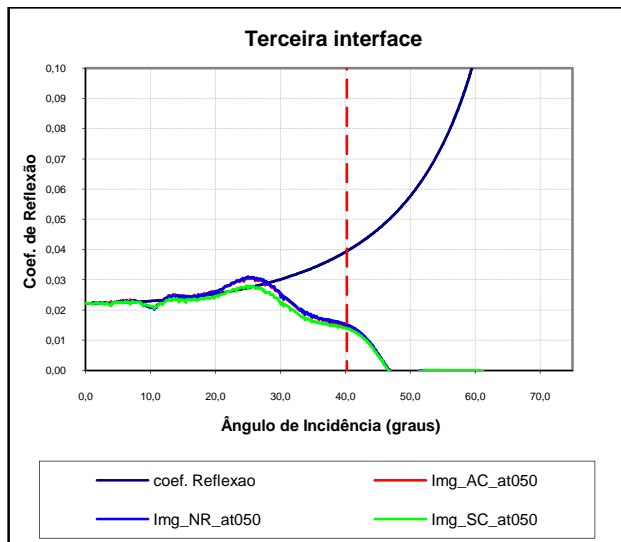


Figura 8. Análise de AVA para a terceira interface do modelo

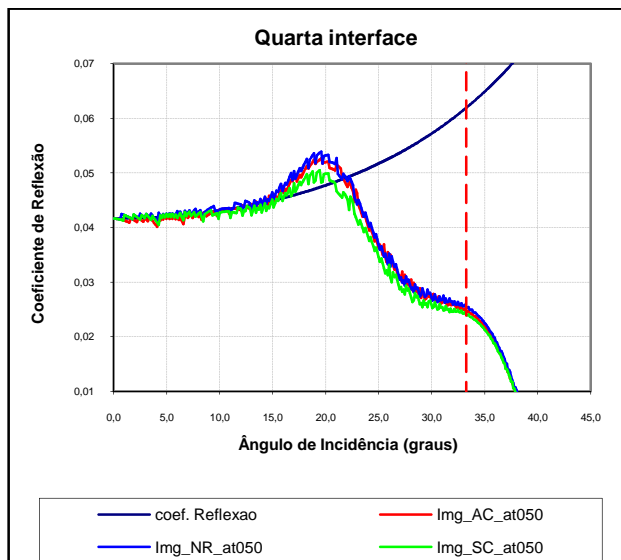


Figura 9. Análise de AVA para a quarta interface do modelo

A fim de avaliar a influência do dispositivo de aquisição nas respostas de AVA, considerando o ângulo de incidência no qual os resultados de amplitudes da Migração Reversa no Tempo se ajustam adequadamente em relação a curva teórica, o comprimento do modelo de velocidades foi estendido duas vezes em relação ao modelo original, sendo o sismograma adquirido ao longo de toda sua extensão. Os demais parâmetros das simulações foram mantidos inalterados.

Na figura 10 apresenta-se o gráfico de estudo de AVA para a quarta interface do modelo de velocidades estendido, considerando os três diferentes esquemas de Migração Reversa no Tempo analisados. Comparando-se as curvas deste gráfico com as curvas do modelo de velocidades original (figura 9) nota-se que, no modelo estendido ocorreu uma melhoria significativa do ângulo

de incidência no qual as curvas apresentam uma boa correlação com a resposta do coeficiente de reflexão teórico, evidenciando desta forma a influência da largura do dispositivo de aquisição.

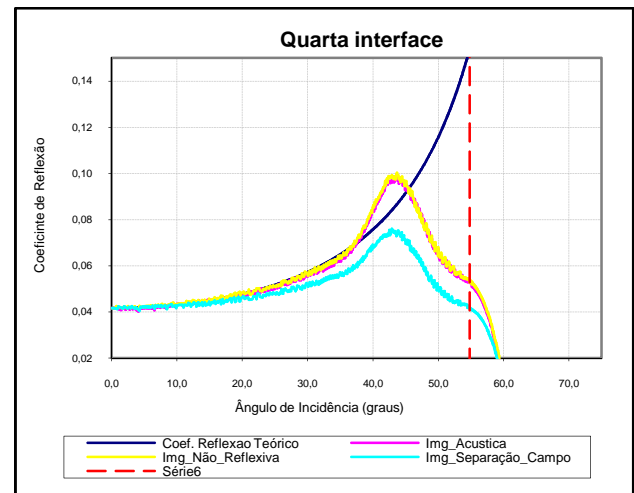


Figura 10 – Análise de AVA para a quarta interface do modelo de velocidades estendido.

Conclusões

De forma geral, os resultados apresentaram boa correlação com os resultados do coeficiente de reflexão teórico para as diversas interfaces do modelo de velocidades analisado. 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 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 com emprego do esquema de Separação do Campo de Ondas.

Observou-se que a influência da geometria do dispositivo de aquisição pode interferir de forma significativa nas análises de AVA. Tal observação evidencia a cuidado que deve ser tomado para a correta definição dos parâmetros de aquisição.

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- BAYSAL, E., KOSLOFF, D. & SHERWOOD, J. W. C., 1984, "A two-way nonreflecting wave equation", *Geophysics*, 49, pp.132-14.
- 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.
- CARCIONE, M.J., FINETTI, R.I., GEI, D., 2003, "Seismic Modeling Study of Earth's Deep Crust", *Geophysics*, 68, pp. 656-664.
- CHATTOPADHYAY, S., McMECHAN, G.A., 2008, "Imaging conditions for prestack reverse-time migration", *Geophysics*, 73, pp. S81-S89.
- 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.
- 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.