

Migração reversa no tempo na determinação da função AVA

Josias J. Silva, LAB2M/COPPE/UFRJ
Djalma M. S. Filho, CENPES/PETROBRAS
Luiz Landau, LAMCE/COPPE/UFRJ

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

One of the main objectives of seismic imaging is to generate maps of the Earth's reflectivity function, which can be inferred about the physical properties of rocks in their locations. The amount of energy that is reflected on an interface depends on the incident's wave field angle, called AVA (Amplitude vs. Angle) function. In the methodology proposed in this work, the seismic data recorded on the surface is extrapolated to a region just above the datum of the exploratory interest (defined by interpreters). This redatum is achieved by a generalization of the concept of reverse time migration in which common focus point gathers are extrapolated. The synthesis' operators and extrapolations of the direct and reverse fields are made for solutions of acoustic complete wave equation by finite differences method. It was proposed a new imaging condition based on the sum of modules of amplitudes around the wavelet of maximum amplitude. As a result of this methodology, we have obtained graphs of reflectivity, i.e., amplitude based on incidence's angle, corrected from effects of propagation (specifically, spherical divergence, transmission and conversion). To conclude, it is possible to have more reliable input data for local inversion in order to obtain the petrophysical parameters.

Introduction

Um caso particular da técnica *Areal Shot Records* é o conceito de família *Common Focus Point* (Berkhout, 1997 - Parte I e Parte II), ou simplesmente família CFP. A técnica CFP tem se mostrado bastante útil no sentido de minimizar ou reduzir a influência das estruturas geológicas que estão acima das regiões de interesse exploratório. O objetivo, neste caso, é de levar os dados sísmicos da superfície para um ponto focal numa profundidade estrategicamente escolhida. Desta forma é possível obter um registro sísmico na profundidade do ponto focal, reduzindo a influência das reflexões associadas à geologia que está acima deste ponto. Este processo é feito a partir da extrapolação direta do campo de onda gerado por uma fonte posicionada no ponto focal em profundidade. O registro na superfície deste campo é usado para a geração do operador CFP. A família CFP é

gerada pela convolução do operador CFP com os sismogramas de superfície. A extrapolação reversa da família CFP realiza a redatuação dos dados para a profundidade escolhida (Figura 1).

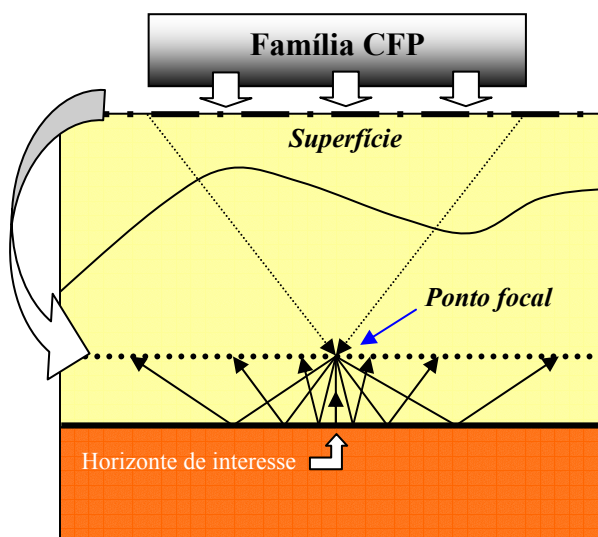


Figura 1: Diagrama esquemático da redatuação da família CFP para um novo datum de aquisição.

A técnica CFP desempenha um papel importante na determinação da função refletividade dentro da metodologia proposta neste trabalho, que se baseia em parte dos resultados encontrados pelo autor durante o desenvolvimento da sua tese de doutorado (Silva, 2009). O objetivo do uso da técnica CFP dentro do esquema proposto neste trabalho é o de extrapolar os dados sísmicos para um ponto próximo à profundidade do refletor para o qual deseja-se obter a variação da refletividade com o ângulo de incidência. Este mesmo conceito tem sido utilizado por Berkhout (1992), Thorbecke (1997) e Wijngaarden (1998) para o imageamento em tempo. Estes encontram os operadores e famílias CFP e as redatam em tempo, não usando macro-modelos de velocidade que, em suas opiniões, deverá ser encontrado em uma etapa posterior, sendo os operadores de síntese os dados de entrada na tomografia de famílias CFP. Fato este que os limitam a modelos sem grandes variações laterais de impedância acústica. Portanto, não indicado em situações geológicas que apresentam altas complexidades estruturais.

No esquema proposto neste trabalho, as extrapolações são feitas com o uso da equação completa da onda a qual não está limitada a nenhuma complexidade

geológica, tais como as encontradas em algumas bacias sedimentares, como domos e/ou camadas de sal (bacias costeiras brasileiras, por exemplo), soleiras de diabásio (Bacia do Solimões) ou estruturas compressivas com falhas de altos mergulhos (bacias sub-andinas), etc. As redatuações são feitas em profundidade utilizando a migração reversa no tempo (MRT), ou seja, assumi-se o conhecimento da estrutura geológica o que diante das técnicas de processamento e inversões atuais é bastante razoável, pois o que se necessita são as informações do macro-modelo de velocidade e não os seus detalhes. Após a aplicação da transformada τ - p sobre os dados das famílias CFP's redatadas e do campo incidente é possível obter a função refletividade numa interface em profundidade conhecida (já estruturalmente interpretada) a qual pode ser plano-horizonta ou não.

Ao usar extrapolações por soluções da equação da onda (sem aproximações de Born ou assintóticas), a metodologia deste trabalho se propõe a determinar a função refletividade em torno ou abaixo de estruturas complexas. Outro fato relevante é que a generalização do conceito de migração reversa no tempo se aplica tanto para dados acústicos como dados elásticos, isotrópicos e anisotrópicos 3-D (Silva, 2009).

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado da extrapolação reversa dos dados da família CFP para um ponto focal acima do refletor de interesse (z_m). O registro das reflexões após o colapso da energia no ponto focal carrega informações das dependências das amplitudes do campo refletido com o ângulo de incidência. Desta forma, foi ampliado o conceito da condição de imagem baseada no tempo da máxima excitação proposta por pioneiros como Botelho e Stoffa (1988) e Loewenthal e Hu (1991), onde apenas um único valor de amplitude é considerado (Chattopadhyay and McMechan, 2008). Neste trabalho o autor propõe um novo entendimento da amplitude do campo de onda em cada posição e, através da metodologia proposta, mostra que esta amplitude pode ser decomposta em vários valores que possuem uma relação com o ângulo do campo incidente neste ponto.

Além da condição de imagem baseada na amplitude máxima, o autor propõe uma condição baseada na soma dos módulos das amplitudes dentro da *wavelet* que compõe os campos incidentes e refletidos (Silva, 2009). Esta condição baseia-se no campo dentro de uma janela temporal limitada pela largura do pulso sísmico.

Metodologia

O que se pretende mostrar com a metodologia deste trabalho é que o campo de onda registrado em um determinado ponto do modelo durante o processo de migração recebe contribuições de energias que estão chegando com diversas inclinações oriundas dos disparos das fontes em diversas posições na superfície. A forma convencional de realizar a Migração Reversa no Tempo fornece uma imagem final que contém informações das médias destas energias em cada ponto. Neste trabalho está se abrindo o conceito de MRT mostrando que sobre um refletor, ou seja, uma interface

entre duas camadas com diferentes propriedades elásticas, é possível decompor a amplitude do campo de ondas refletido em função do ângulo de incidência utilizando a MRT, gerando-se localmente um gráfico de AVA (amplitude versus ângulo de incidência). Essas variações de amplitudes com o ângulo foram confrontadas com a curva teórica já conhecida na literatura, oriunda das aproximações das Equações de Zoeppritz (Castagna, 1993).

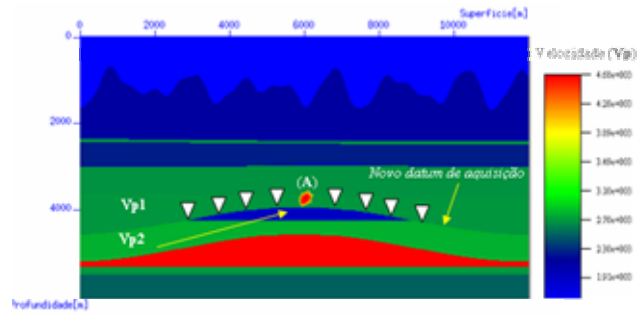


Figura 2: Modelo de velocidade compressional apresentando a disposição do ponto A e dos receptores no novo datum de aquisição próximos ao refletor de interesse.

O modelo de velocidade da Figura 2 utilizado para aplicação da metodologia proposta foi publicado por Santos et al. (2006), onde os autores ilustraram a aplicação da técnica CFP com o objetivo de melhorar a qualidade da imagem sísmica em áreas com o sinal sísmico deteriorado devido à presença de interfaces rasas irregulares. Este modelo simula uma região altamente recortada por *canyons* submarinos recentes que proporcionam abruptas variações laterais de velocidade no leito marinho, como observado em alguns locais do litoral brasileiro. Um exagero na batimetria acidentada foi propositalmente criado com a intenção de maximizar a deterioração do dado sísmico já no primeiro contato com o fundo oceânico.

As propagações diretas e reversas dos campos de onda foram feitas utilizando-se a equação completa da onda acústica (Equação 1), que para o caso de densidades constantes pode ser escrita como:

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

onde, p representa o campo compressional e v a velocidade das partículas. A discretização da Equação 1 foi feita utilizando-se o método das diferenças finitas com aproximações de segunda ordem para a derivada temporal e de quarta ordem para as derivadas espaciais.

A metodologia proposta neste trabalho aplicada para o caso acústico segue os seguintes passos:

1. Definição do ponto de interesse (A) e do novo datum de aquisição em sub-superfície nas proximidades do refletor a ser estudado;
2. Obtenção do operador de síntese na superfície do modelo a partir de uma fonte pontual posicionada no ponto (A) utilizando um macro-modelo sem os refletores abaixo deste ponto;
3. Obtenção do campo incidente nas proximidades do refletor de interesse:
 - a. Extrapolação reversa do operador de síntese;
 - b. Transformada Tau-Pi do campo incidente;
4. Obtenção do campo refletido nas proximidades do refletor de interesse:
 - a. Obtenção da família CFP na superfície através da propagação do operador de síntese utilizando o modelo de velocidade completo;
 - b. Redatuação da família CFP para a nova superfície de aquisição;
 - c. Transformada Tau-pi da família CFP redatuada;
5. Obtenção da condição de imagem baseada na amplitude máxima e na soma dos módulos das amplitudes;
6. Obtenção da função refletividade baseada na amplitude máxima (Equação 2) e na soma dos módulos das amplitudes (Equação 3) dentro de um intervalo temporal (t_{min} e t_{max}) que contém a amplitude máxima (Silva, 2009).

$$Ref_{Amp}(p, z_m) = \frac{P_{ref}(p, t = t_{Pref_max})}{P_{inc}(p, t = t_{Pinc_max})} \quad (2)$$

$$Ref_{Soma}(p, z_m) = \frac{\sum_{t=t_{min}}^{t=t_{max}} |P_{ref}(p, t)|}{\sum_{t=t_{min}}^{t=t_{max}} |P_{inc}(p, t)|} \quad (3)$$

Aplicação

A metodologia proposta neste trabalho foi aplicada ao modelo de velocidade da Figura 2 com o objetivo de identificar as variações das amplitudes de reflexão em função do ângulo de incidência entre as camadas Vp1 e Vp2. Os valores dos parâmetros de aquisição e modelagem utilizados nesta simulação são os seguintes:

- Dimensões: largura: 12,0 km; profundidade: 6,0 Km;
- Densidades constantes e iguais a 1,0 g/cm³;
- Vp1 = 2300 m/s; Vp2 = 3000 e 1900 m/s;
- Parâmetros de aquisição:
 - Intervalo de amostragem temporal: 0,5 ms;
 - Tempo de registro: 7,0 s;
 - Intervalo entre estações: 12,0 m;
 - Intervalo entre tiros: 12,0 m;
- Parâmetro do raio máximo: $p_{max} = 400 \times 10^{-6}$ s/m;
- Delta p: $\Delta p = 4,0 \times 10^{-6}$ s/m.

Seguindo a metodologia proposta para o caso acústico, têm-se os seguintes passos:

1º Passo: Escolha do ponto A(xm,zm) sobre o refletor para qual deseja-se obter a função refletividade. Neste caso, o objetivo foi de obter a função refletividade da interface do topo do anticlinal, portanto, optou-se por um ponto localizado 12 m acima deste, nas coordenadas xm = 6.000 m e zm = 3.912 m.

2º Passo: Obtenção do operador de síntese na superfície a partir da propagação do campo gerado por uma fonte pontual localizada em A (6.000m, 3.912m). Esta propagação foi feita utilizando-se a equação completa da onda para o caso acústico (Equação 1). O registro deste campo na superfície deve ser feito de maneira inversa no tempo e deve ser deconvolvido da assinatura da fonte, caso seja usado para dados reais (Figura 3).

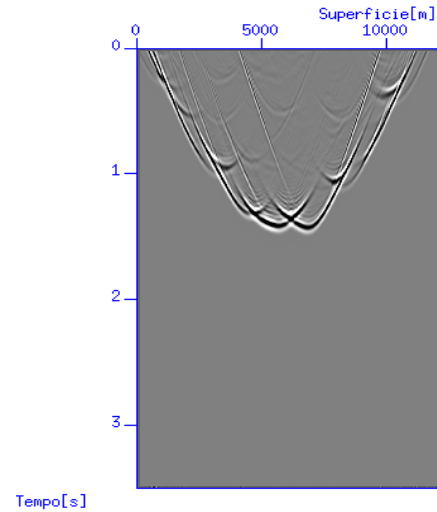


Figura 3: Operador de síntese compressional obtido na superfície a partir da fonte impulsiva posicionada no ponto A.

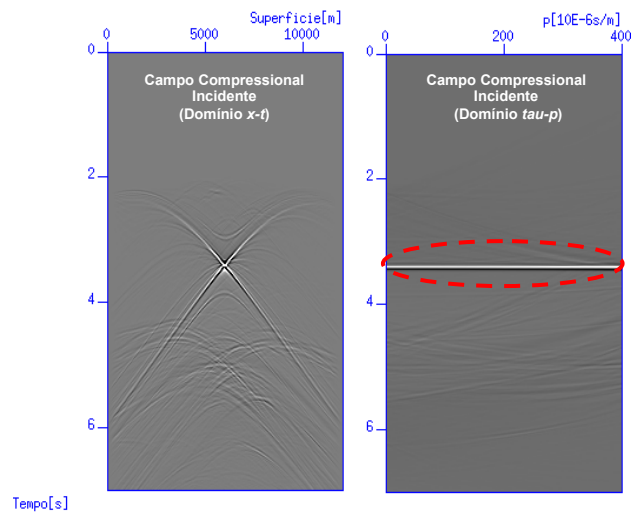


Figura 4: Campo incidente no novo datum de aquisição no domínio x-t (esquerda) e no domínio Tau-pi.

3° Passo: Obtenção do campo compressional incidente no ponto **A**. A propagação reversa do campo registrado no passo anterior deu origem ao campo compressional incidente na profundidade do refletor em estudo. O registro deste campo no novo datum de aquisição no domínio $x-t$ e no domínio $\tau-p$ são apresentados na Figura 4, com destaque dado às amplitudes no domínio $\tau-p$ que foram usadas para o cálculo da função AVA.

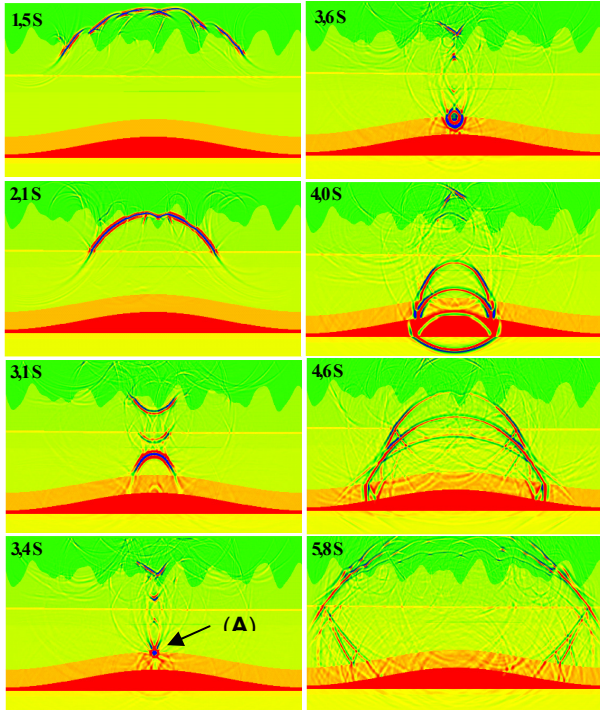


Figura 5: *Snapshots* da propagação do operador de síntese no modelo de velocidade completo com objetivo de gerar a família CFP na superfície.

4° Passo: Neste passo foi obtido o campo refletido no novo datum de aquisição, que neste caso está 12 m acima da camada $Vp2$. Para atingir este objetivo, foi necessária a geração da família CFP, que para o caso de dados sintéticos pode ser obtida de duas maneiras (Boechat, 2007): a primeira, pelo processo de convolução do operador de síntese com os dados sísmicos previamente adquiridos na superfície e, a segunda, pela propagação reversa do operador de síntese registrando na superfície o campo de onda que retorna das reflexões nas interfaces do modelo de velocidade. Este procedimento é válido para sistemas de aquisição não convencional onde o registro é feito ao longo de toda a superfície do modelo. Para esta propagação deve-se usar o modelo de velocidade com todas as camadas. Neste trabalho foi utilizado o segundo processo para simular a família CFP. Os *snapshots* desta propagação estão na Figura 5 enquanto que a família CFP pode ser visualizada na Figura 6.

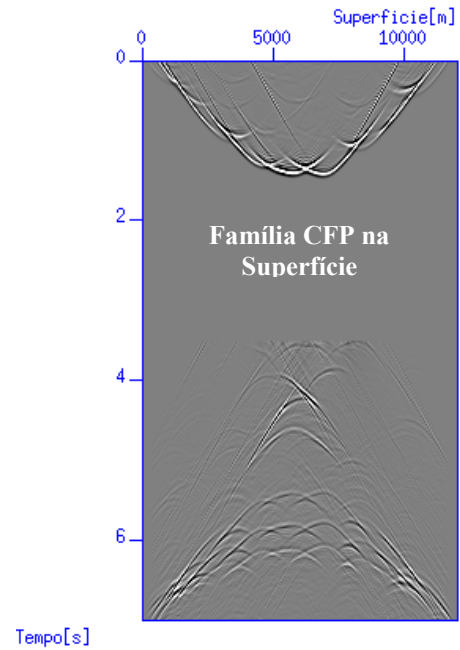


Figura 6: Família CFP gerada na superfície do modelo. Pode ser observada a complexidade do campo compressional na parte final deste registro.

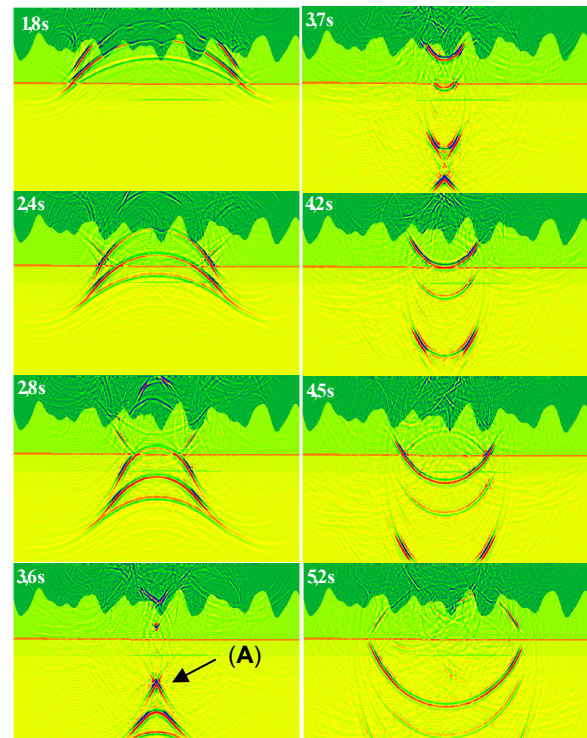


Figura 7: *Snapshots* da redatuação da família CFP para o novo datum de aquisição.

O campo de onda da família CFP na superfície (Figura 6) foi redatumado para o novo datum de aquisição. Desta forma, as variações de amplitudes contidas neste registro, que são essencialmente o campo de onda refletido nas interfaces do modelo, foram levadas para o ponto **A**.

Os snapshots da redatuação da família CFP são apresentados na Figura 7. Observa-se que o campo refletido colapsa no ponto **A**, levando para este datum as informações das variações da amplitude com o ângulo de incidência. Na Figura 7 ainda pode ser observado como o campo de onda inicialmente disforme se transforma em uma frente de onda bem comportada após passar pela complexa topografia do fundo oceânico.

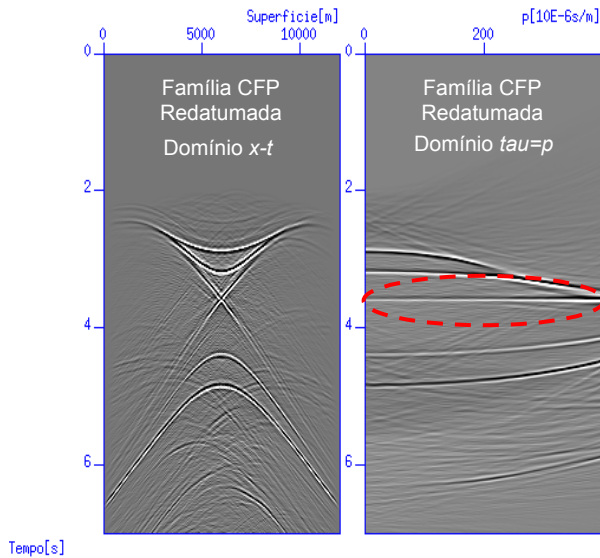


Figura 8: Família CFP redatumada para o novo datum de aquisição no domínio $x-t$ (esquerda) e no domínio $\tau-p$.

A Figura 8 apresenta a família CFP redatumada no domínio $x-t$ e no domínio $\tau-p$, onde estão destacadas as amplitudes do campo refletido usadas para o cálculo da função AVA.

5° Passo: Neste passo foram calculados os coeficientes de reflexão em função do ângulo de incidência (AVA) para as condições de imagem baseada na amplitude máxima e na soma das amplitudes da *wavelet* propostas nas Equações 2 e 3. As amplitudes do campo refletido (Pref) foram obtidas a partir da família CFP redatumada (Figura 8) e o campo incidente (Pinc) foi obtido após a propagação reversa do operador de síntese (Figura 4), ambos no domínio $\tau-p$. O gráfico de variação das amplitudes em função do ângulo de incidência para o coeficiente R_p é apresentado na Figura 9, juntamente com o valor teórico dado pela Equação 4, onde este coeficiente é calculado em função apenas das velocidades e do ângulo de incidência (θ_i):

$$R_p(\theta_i) = \frac{vp_2 \cos \theta_i - (vp_1^2 - vp_2^2 \sin^2 \theta_i)^{1/2}}{vp_2 \cos \theta_i + (vp_1^2 - vp_2^2 \sin^2 \theta_i)^{1/2}} \quad (4)$$

Na Figura 9 pode ser observado que, desde o *zero-offset* até ao ângulo crítico ($\Theta_c = \sin^{-1} vp_1/vp_2 = 50^\circ$), os valores encontrados para as variações dos coeficientes de reflexão acústicos (R_p), para ambas as condições de imagem, são muito próximos aos valores teóricos.

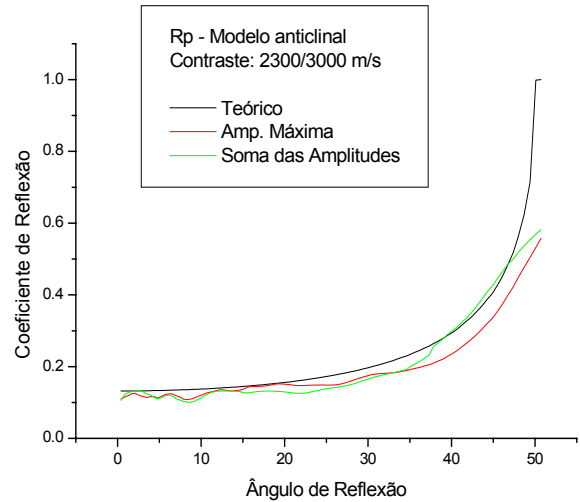


Figura 9: Variação do coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência para o contraste de velocidades 2300/3000 m/s proposto no modelo original entre as camadas $Vp1$ e $Vp2$.

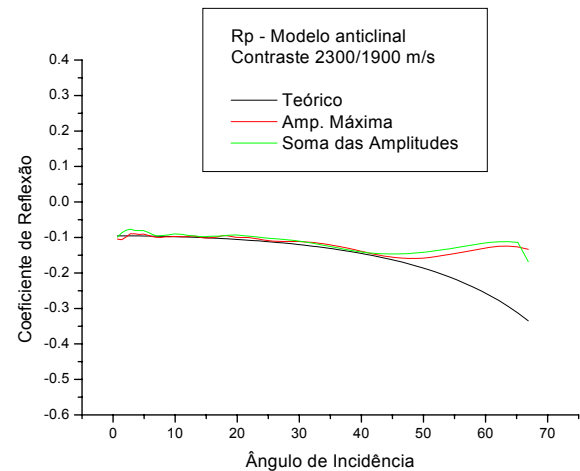


Figura 10: Variação do coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência para o contraste de velocidades 2300/1900 m/s das camadas $Vp1$ e $Vp2$

Para fins de avaliar a aplicação desta metodologia a outros contrastes de impedância, foi simulada uma situação com o contraste negativo, onde V_{p1} se manteve com o valor de 2300 m/s e V_{p2} passou para 1900 m/s. Para esta situação foram seguidos os mesmos passos da aplicação inicial. A Figura 10 apresenta o resultado obtido neste processo. Pode-se notar que as curvas das variações de amplitudes com o ângulo de incidência encontradas para ambas condições de imagem apresentaram valores praticamente iguais aos valores teóricos, pelo menos até ao ângulo de 40°.

Conclusões

Neste trabalho foi feita uma extensão da aplicação do conceito de Migração Reversa no Tempo para, além de determinar imagens dos refletores corretamente posicionados em profundidade, obter uma estimativa do coeficiente de reflexão acústico (R_p) de determinada interface em função do ângulo de incidência.

Uma nova aplicação do conceito de família CFP em profundidade foi desenvolvida neste trabalho, que ao contrário das aplicações desenvolvidas por outros pesquisadores, o ponto focal de onde parte o operador é previamente conhecido. Neste caso, o objetivo da aplicação do conceito foi o de obter a função AVA (amplitude versus ângulo) nas proximidades em que este ponto se encontra.

Baseado nos resultados encontrados pode-se dizer que a metodologia proposta para a obtenção da curva de variação do coeficiente de reflexão acústico em função do ângulo de incidência mostrou-se bastante satisfatória, tanto para o contraste de impedância positivo (Figura 9), quanto para o contraste negativo (Figura 10).

Este trabalho estende a aplicação do conceito da condição de imagem baseada na amplitude máxima e propõe uma nova condição, que é baseada na soma dos módulos das amplitudes. Os resultados mostraram que estas amplitudes podem ser decompostas em contribuições que dependem do ângulo do campo incidente para um determinado ponto em profundidade.

Agradecimentos

Agradeço a toda equipe técnica e administrativa dos Laboratórios LAB2M e LAMCE da COPPE/UFRJ pela oportunidade de divulgar este trabalho.

Referências

Berkhout, A. J., 1997. Pushing the limits of seismic imaging, Part I: Prestack migration in terms of double dynamic focusing. *Geophysics*, vol. 62, no. 3, p. 937-954.

Berkhout, A. J., 1997. Pushing the limits of seismic imaging, Part II: Integration of prestack migration, velocity estimation, and AVO analysis. *Geophysics*, vol. 62, no. 3, p. 954-969.

Silva, J.J., 2009. Migração reversa no tempo na determinação da amplitude de reflexão em função do ângulo de incidência. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, RJ – Brasil.

Berkhout, A.J., 1992. Areal shot-record technology. *Journal of Seismic Exploration* 1, n. 3, 251-264.

Thorbecke, J.W., 1997. Common Focus Point Technology. PhD Thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Winthagen, P.L.A., Verschuur, D.J., 1998. Using the CFP-methodology for PP and PS angle dependent reflectivity analysis. SEG International Exposition and 72nd Annual Meeting.

Botelho, M.A.B., Stoffa, P.L., 1988. Velocity analysis using reverse time migration. AGU annual meeting.

Loewenthal, D., Hu, L., 1991. Two methods for computing the imaging condition for common-shot prestack migration. *Geophysics*, v.56, pp. 378-381.

Chattopadhyay, S. e McMechan, G.A., 2008. Imaging conditions for prestack reverse-time migration. *Geophysics*, v.73, no. 3.

Castagna, J.P., Backus, M.M., 1993. Offset-dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis. IG series: v. 8. SEG.

Boechat, J. B. T., 2007. Migração reversa no tempo 3-D orientada ao alvo por síntese de frentes de onda. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.

Santos, L.A., Theodoro, A.E., Soares Filho, D.M., Bulcão, A., 2006. Aplicação da técnica de redatumização de dados sísmicos. X SIMGEF PETROBRAS.