



# Inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade: comparação com o método de AVO.

Jorge Nicolás Hounie (Petrobras/UO-BC)  
Sérgio Adriano Moura Oliveira (Universidade Estadual do Norte Fluminense)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> 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.

## Resumo

A inversão elástica de dados sísmicos de reflexão é utilizada rotineiramente na exploração de hidrocarbonetos e na caracterização de reservatórios para estimar as propriedades de rocha e fluido dos reservatórios. Podem ser estimados até três parâmetros elásticos independentes na inversão, cuja escolha depende da formulação escolhida: uma escolha comum é impedância da onda P (IP), impedância da onda S (IS) e densidade. O tipo de inversão elástica mais utilizado atualmente é a inversão de AVO (*amplitude versus offset*), que utiliza o modelo convolucional para modelar os dados sísmicos: cada faixa de ângulo dos dados de entrada é calculada convolvendo um pulso sísmico com os coeficientes de reflexão obtidos com uma aproximação das equações de Zoeppritz, levando-se em conta apenas as reflexões PP primárias. Neste trabalho apresentamos um algoritmo de inversão de forma de onda elástica que honra os fenômenos e modos de propagação não contemplados no modelo convolucional. Os resultados obtidos com dados sintéticos indicam que os valores de IP, IS e principalmente densidade obtidos com a inversão de forma de onda são mais confiáveis que os obtidos com a inversão de AVO.

## Introdução

As implementações da inversão elástica mais utilizadas atualmente utilizam a aproximação de Aki & Richards das equações de Zoeppritz, ou simplificações da aproximação de Aki & Richards, para calcular a variação do coeficiente de reflexão com o ângulo de incidência. Essas aproximações são adequadas até um ângulo de incidência de aproximadamente 30 graus e para pequenos contrastes nas propriedades elásticas.

Um dos grandes problemas para inferência de densidade a partir da inversão sísmica usando o método convencional de AVO é a necessidade de maiores ângulos para haver sensibilidade do coeficiente de reflexão  $r_{pp}$  com relação a este parâmetro. No entanto, as curvas de AVO preditas pela conjunção das

aproximações da equação de Zoeppritz e do simples modelo convolucional, que leva apenas em conta reflexões primárias, deixam de honrar os dados para ângulos maiores do que 30 graus devido a presença de reverberações e modos convertidos (e.g Simmons and Backus, 1994 ou Mallick, 2007). Para incorporar esses fenômenos na inversão elástica é preciso utilizar a equação da onda para modelar os dados, no lugar do simples modelo convolucional.

Para resolver a equação da onda em um meio 1-D o método da refletividade é muito útil, pois permite modelar todos os fenômenos não representados no modelo convolucional citados anteriormente, além de permitir modelar apenas parte desses fenômenos; ver por exemplo Oliveira (2010). Isso permite avaliar em cada situação quais são os fenômenos que interferem com maior intensidade na amplitude dos dados sísmicos nas diversas faixas de ângulos. Neste trabalho, o método da refletividade serviu como base para o desenvolvimento de um algoritmo de inversão de forma de onda elástica que permite utilizar de forma mais completa a informação contida nos dados sísmicos.

## Método

O objetivo da inversão de forma de onda elástica é encontrar um modelo da subsuperfície que seja compatível de maneira ótima com os dados sísmicos. A inversão é formulada como um problema de otimização, onde a função a minimizar, chamada de função erro, mede a diferença quadrática entre os dados calculados e observados (equação 1). Quanto menor o valor da função erro, mais compatível o modelo com os dados; porém, para conhecer a função erro, que é não linear, precisaríamos modelar os dados correspondentes a um grande número de elementos do espaço de modelos do problema em questão, o que é computacionalmente proibitivo na maioria dos problemas.

$$E(\vec{m}) = \sum_{i=1}^D \left( \frac{d_i - f(\vec{m})_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (1)$$

A solução mais econômica para resolver problemas não lineares é a utilização de métodos de otimização locais. Partindo de um modelo inicial, estes métodos atualizam iterativamente o modelo até atingir um mínimo local, que pode ou não coincidir com o mínimo global da função erro. No caso da inversão de forma de onda, é fundamental que o modelo inicial represente corretamente os aspectos cinemáticos da propagação,

para evitar erros de *cycle-skipping* e assim a convergência prematura para um mínimo local.

No algoritmo que desenvolvemos, o método da refletividade foi escolhido como método de solução da equação da onda, e o método de Gauss-Newton ( equação 2) como ferramenta de minimização, devido à sua rápida convergência. Este método utiliza uma aproximação da matriz hessiana,  $\mathbb{H}_{\mathbb{H}}(\hat{m})$ , que é obtida a partir da matriz jacobiana  $\mathbb{J}(\hat{m})$  ( equação 3).

$$\mathbb{H}_{\mathbb{H}}(\hat{m})\delta\hat{m} = -\mathbb{J}(\hat{m})^T e(\hat{m}) \quad (2)$$

$$\mathbb{H}_{\mathbb{H}}(\hat{m}) = \mathbb{J}(\hat{m})^T \mathbb{J}(\hat{m}) \quad (3)$$

A matriz jacobiana, cujos elementos são as derivadas de Fréchet, é calculada analiticamente, utilizando expressões que obtivemos derivando as matrizes de propagação utilizadas no método da refletividade. A derivação das matrizes de propagação leva a uma fórmula recursiva para o cálculo das derivadas de Fréchet. Para obter as derivadas de Fréchet faz-se necessário também o cálculo das derivadas parciais das equações de Zoeppritz em relação às propriedades das camadas.

Para obter ganhos computacionais, o cálculo das derivadas de Fréchet é realizado concomitantemente com a modelagem. É importante ressaltar que o método da refletividade é realizado no domínio das ondas planas, onde cada onda plana é caracterizada por uma frequência e um parâmetro do raio. Isso permite que este método se utilize de maneira vantajosa da estratégia multigríd, na qual os dados sísmicos são invertidos em faixas de frequências sucessivamente mais largas, inicialmente abrangendo apenas as frequências mais baixas.

**Exemplos**

Aplicamos a inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade em dados sintéticos para avaliar o desempenho do algoritmo. Foram gerados perfis sintéticos de Vp, Vs e densidade representando camadas de 10m de espessura. O perfil de Vp foi gerado de modo a representar perturbações em torno de uma velocidade constante de 2000 m/s. O perfil de Vs foi inicialmente obtido a partir do perfil de Vp considerando uma razão Vp/Vs constante. A esse resultado foi adicionada uma perturbação para que os dois perfis não fossem perfeitamente correlacionáveis. O perfil de densidade foi gerado a partir do perfil de Vp utilizando a equação de Gardner para folhelhos e a esse resultado foi adicionada uma perturbação. Os modelos e as relações entre Vp e Vs e Vp e densidade são mostrados nas Figuras 1 e 2.

O pulso utilizado na modelagem dos dados foi um pulso de Ricker com frequência dominante de 30Hz. O método da refletividade foi utilizado na modelagem dos dados. Os dados utilizados na inversão foram limitados a um ângulo de incidência de 45 graus.

A inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade foi realizada com os dados sintéticos,

utilizando como modelo inicial valores constantes de Vp, Vs e densidade. O número de iterações foi limitado a 15 e o pulso utilizado na inversão foi igual ao utilizado na modelagem. O ajuste entre os dados calculados na inversão e os dados verdadeiros foi muito bom (Figura 3). A análise da função erro (Figura 4) mostra que pouco se ganharia aumentando o número de iterações.

A seguir, foi realizada também a inversão de AVO dos mesmos dados sintéticos, limitados a um ângulo de incidência de 45 graus. Os modelos iniciais de Vp, Vs e Densidade também foram constantes.

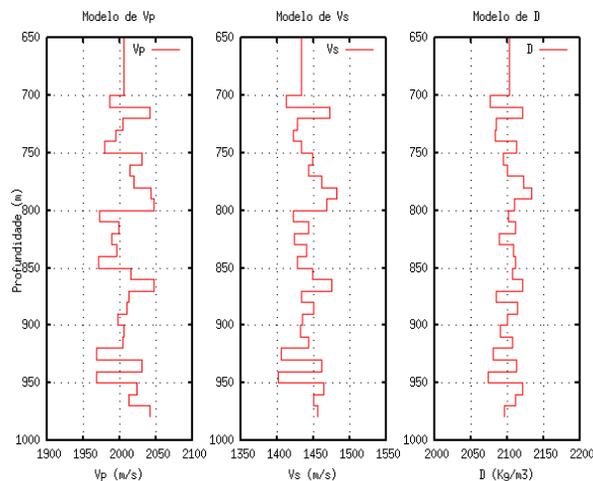


Figura 1: Modelos de Vp, Vs e densidade utilizado para gerar os dados sintéticos.

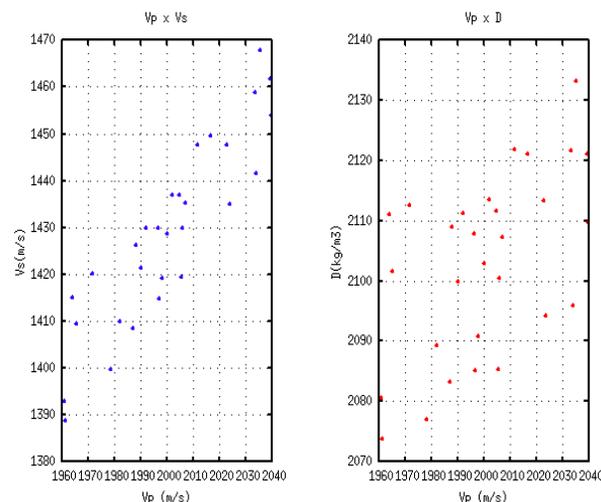


Figura 2: Gráficos mostrando as relações entre Vp e Vs e Vp e densidade do modelo utilizado na geração dos dados sintéticos.

**Resultados**

Os resultados obtidos com a inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade são muito próximos aos valores corretos, principalmente para Vp e Vs. O perfil invertido de densidade não tem a mesma qualidade dos perfis invertidos de Vp e Vs, mas mesmo

assim foi possível recuperar a maioria das feições do perfil original, e em vários locais os valores corretos de densidade foram recuperados.

A inversão de AVO foi capaz de recuperar corretamente as feições dos perfis de Vp e Vs, porém com menor resolução que o resultado obtido com a inversão de forma de onda. O perfil de densidade, como esperado, apresenta menor qualidade na recuperação das feições e do valor absoluto da densidade.

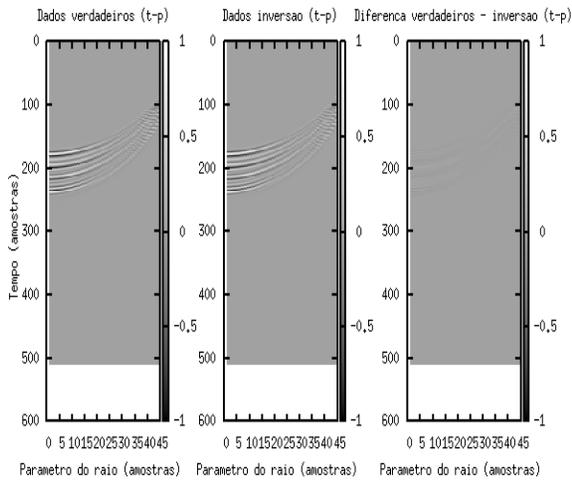


Figura 3: Dados verdadeiros, dados obtidos a partir do modelo final da inversão e o erro nos dados ao final da inversão.

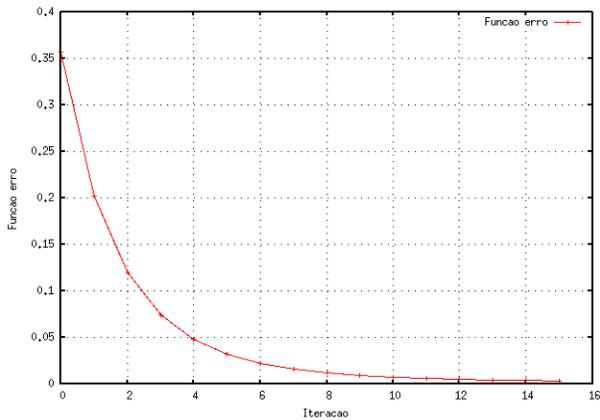


Figura 4: Função erro em função das iterações da inversão.

**Conclusões**

A inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade leva em consideração fenômenos de propagação de onda tradicionalmente desprezados na inversão de dados sísmicos: conversões de modo, efeitos

de transmissão e reflexões múltiplas internas. Esses fenômenos podem exercer importante contribuição na amplitude dos dados sísmicos. Resultados obtidos com dados sintéticos mostram que a incorporação desses fenômenos no processo de inversão aprimoram as estimativas de Vp, Vs e principalmente da densidade, em comparação com os resultados obtidos com a inversão de AVO.

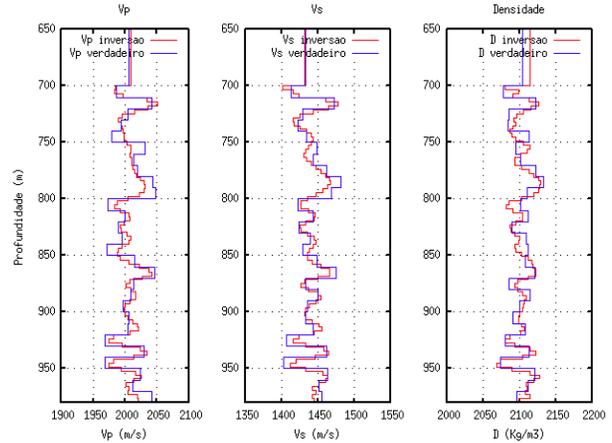


Figura 5: Resultados da inversão de forma de onda elástica utilizando o método da refletividade

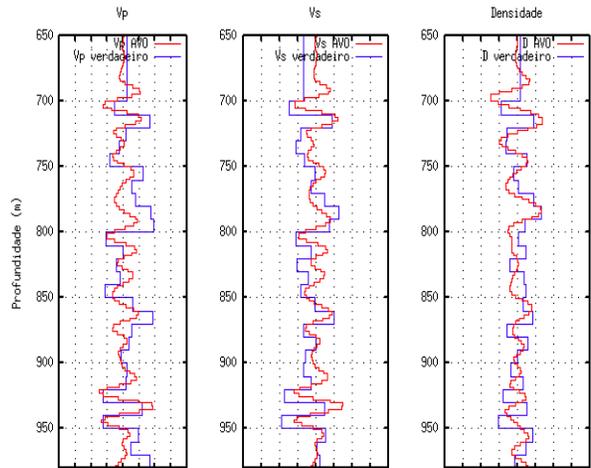


Figura 6: Resultados da inversão de AVO.

**Agradecimentos**

Agradecemos à CGG-Veritas pelo *grant* do programa Hampson Russell usado para obter os resultados de AVO.

**Referências**

Mallick, S, 2007, Amplitude-variation-with-offset, elastic-impedance, and wave-equation synthetics - A modeling study, *Geophysics* v. 72 n.1 p. c1-c7.

Simmons, L. J. and Backus, M., 1994, AVO modeling and the locally converted shear wave. *Geophysics* v.59 n.9 p.1237-1248.

Oliveira, S. A. M., 2010, Uma implementação do método da refletividade para modelagem eficiente de dados sísmicos marítimos e de OBC. *Revista Brasileira de Geofísica* v.27 n.3 p.323-332.