

## Sísmica de reflexão rasa: análise de velocidades de ondas convertidas PS

Éderson Ribeiro da Silva e Liliana Alcazar Diogo

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo (IAG-USP)

Copyright 2012, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.*

### Resumo

Neste trabalho estudamos o problema de análise de velocidades de ondas convertidas PS na escala de investigação rasa. Várias equações tem sido propostas com a finalidade de obter uma melhor aproximação para os tempos dos eventos de reflexão não hiperbólicos. Na primeira fase do estudo foram gerados dados sintéticos para avaliarmos a adequação das equações de tempo a diferentes modelos geológicos. Para as equações escolhidas desenvolvemos um procedimento de análise de velocidades cuja incógnita é apenas a velocidade da onda S.

De um modo geral, concluiu-se que é possível interpretar as ondas convertidas PS na escala de investigação rasa até um afastamento máximo igual a 2,5 vezes a profundidade do refletor, mas com limitações do número de camadas em subsuperfície.

### Introdução

Ondas convertidas (PS) podem fornecer importantes informações sobre a velocidade das ondas de cisalhamento (S) e sobre os parâmetros do meio responsáveis pela propagação das ondas P e S. Como relatado em Grechka & Tsvankin (2002), pode-se reconstruir o tempo de percurso da reflexão SS através das reflexões PP e PS.

Para um grande número de cenários de exploração, ondas PS fornecem informações valiosas sobre estruturas em subsuperfície ou propriedades do meio complementando a interpretação inferida através dos dados das ondas PP convencionais.

Para as ondas convertidas PS, o moveout é intrinsecamente não hiperbólico, uma vez que cada metade do caminho é percorrida com uma velocidade diferente. Além disso, na escala de investigação rasa devido a sobreposição das ondas superficiais e de outros eventos coerentes é comum que as reflexões sejam observadas com nitidez apenas em afastamentos por vezes maiores do que a profundidade do refletor.

Neste trabalho avaliamos várias equações desenvolvidas para a aproximação dos tempos dos eventos de reflexão não hiperbólicos.

### Metodologia

Qualquer equação de tempo que não seja a aproximação hiperbólica possui mais do que duas incógnitas. A maioria possui três incógnitas: o tempo normal (ou de afastamento nulo); a velocidade de  $V_{rms}$  do pacote

acima do refletor e um fator de heterogeneidade que indica o quanto a variação dos tempos com o afastamento difere da aproximação hiperbólica.

Os métodos de análise de velocidades fundamentam-se no ajuste da equação de tempo de trânsito às reflexões identificadas nos registros sísmicos. Nesse trabalho avaliamos as principais fórmulas descritas na literatura propostas por diversos autores e reavaliadas por Blais (2007). A seguir descreveremos apenas as equações que apresentaram melhor ajuste aos dados exatos.

### Fórmula da hipérbole deslocada

Com o intuito de melhorar a análise de velocidades em afastamentos longos, Malovichko (1978) criou a aproximação denominada de hipérbole deslocada, investigada também por Castle (1994). Essa equação também pode ser empregada em outras situações em que o comportamento de  $t(x)$  seja não hiperbólico, como é o caso das ondas convertidas PS, sendo dada por

$$t_{ps}(x) = \left(1 - \frac{1}{S}\right)t_{0ps} + \frac{1}{S} \sqrt{t_{0ps}^2 + S \frac{x^2}{V_{ps}^2}}$$

Onde:  $V_{ps}$  é a velocidade de rms considerando as velocidades intervalares das ondas P e S; e a constante S é chamada de coeficiente de heterogeneidade, dado por:

$$S = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} \quad \mu_j = \frac{\sum_{k=1}^n t_k V_k^j}{\sum_{k=1}^n t_k}$$

### Fórmula de Stovas Alterada

Após alguns testes percebemos que, alterando o valor da constante c na fórmula a seguir, conseguimos deslocar o final da curva de tempo de trânsito de modo a aproximá-la aos valores exatos,  $c=1$  corresponde a fórmula original utilizada por Stovas e Ursin (2007) para análise de ondas convertidas PS,

$$t_{ps}(x) = \sqrt{t_{0ps}^2 + \frac{x^2}{V_{ps}^2} - \frac{(S-1)x^4}{4V_{ps}^4 \left(t_{0ps}^2 + \frac{(S-c)x^2}{2V_{ps}^2}\right)}}$$

## Resultados

As figuras a seguir apresentam, para alguns dos modelos testados, a diferença entre os valores das curvas de tempo de trânsito usando diferentes aproximações e a curva exata obtida pelo método do traçado de raio.

Para avaliar a influência da razão  $V_p/V_s$  no comportamento das curvas de tempo, utilizamos dois modelos com uma interface na mesma profundidade e diferentes valores da razão  $V_p/V_s$  (Figuras 1 e 2). Os outros dois exemplos visam avaliar a influência do número de camadas (Figuras 3 e 4, respectivamente para duas e três camadas). Para tal, a profundidade da interface alvo foi mantida a mesma, assim como a razão  $V_p/V_s$  da última camada.

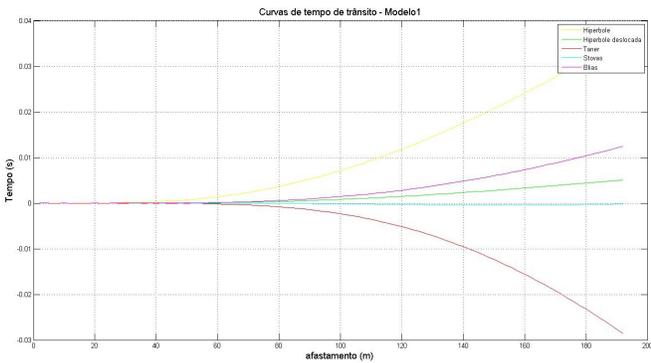


Figura 1: Modelo com 1 camada de profundidade 50m;  $V_p=1500\text{m/s}$  e  $V_s=452\text{m/s}$  ( $z=50\text{m}$  e  $V_p/V_s=3.3$ ).

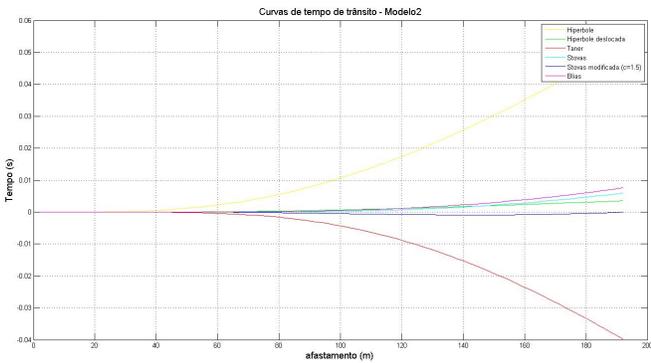


Figura 2: Modelo com 1 camada de profundidade 50 m;  $V_p=1650\text{ m/s}$  e  $V_s=300\text{ m/s}$  ( $z=50\text{ m}$  e  $V_p/V_s=5.5$ ).

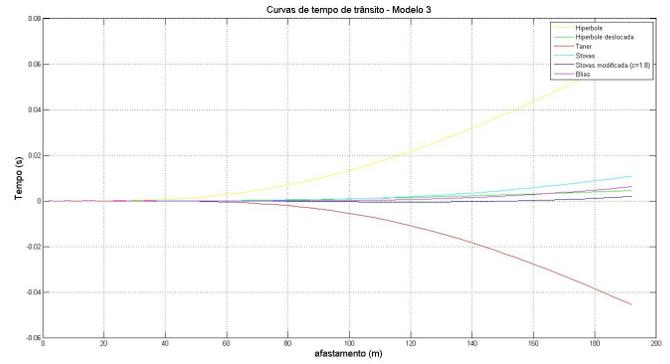


Figura 3: Modelo com 2 camadas de espessuras 5m e 45m ;  $V_p1=370\text{m/s}$ ,  $V_s1=112\text{m/s}$ ,  $V_p2=1650\text{m/s}$  e  $V_s2=300\text{m/s}$  ( $z=50\text{ m}$  e  $V_p1/V_s1=3,3$  e  $V_p2/V_s2=5,5$ )

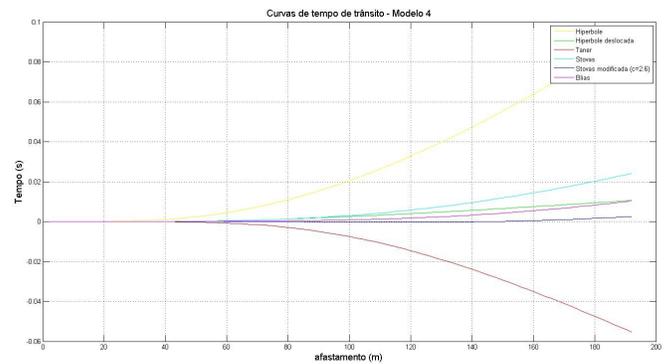


Figura 4: Modelo com 3 camadas de espessuras 5m, 15m e 30m;  $V_p1=370\text{m/s}$ ,  $V_s1=112\text{m/s}$ ,  $V_p2=600\text{m/s}$ ,  $V_s2=200\text{m/s}$ ,  $V_p3=1650\text{m/s}$  e  $V_s3=300\text{m/s}$  ( $z=50\text{ m}$  e  $V_p1/V_s1=3,3$  e  $V_p2/V_s2=3,0$  e  $V_p3/V_s3=5,5$ )

## Análise de Velocidades

Escolhidas as melhores equações para o cálculo dos tempos de trânsito, propomos realizar a análise de velocidades supondo a situação em que conhecemos a velocidade  $V_p$  e top, obtida da análise da onda P refletida, e que extraímos o tempo normal ( $t_{0ps}$ ) com algum dos procedimentos convencionais baseados na equação da hipérbole. Desta forma, é possível calcular as curvas de tempo de trânsito variando apenas o valor da velocidade da onda S ( $V_s$ ). As curvas, assim calculadas, serão plotadas sobre o sismograma e será escolhida visualmente a velocidade que gerou a curva que melhor se sobrepõe aos dados (Figuras 5 a 7, respectivamente para os modelos 1 a 3).

## Discussão e Conclusões

De um modo geral, até um afastamento máximo igual a 2,5 vezes a profundidade do refletor, as equações de Stovas e hipérbole deslocada apresentam um bom ajuste aos valores exatos.

Para a razão afastamento/profundidade maior do que 2,5, o erro ao utilizar a equação de Stovas é mais significativo, conforme a razão  $V_p/V_s$  do meio aumenta. Esse erro pode ser corrigido variando a constante ( $c$ ) na equação de Stovas Alterada, entretanto como não encontramos uma relação da constante  $c$  com os parâmetros do meio, a equação de Stovas alterada não foi utilizada na análise de velocidades.

Para modelos geológicos com mais de duas camadas o método torna-se mais complicado, visto que precisaríamos conhecer as velocidades das ondas P e S das camadas superiores, tendo como incógnita apenas a velocidade S da última camada. Como essa situação pode ser difícil de se resolver na prática, a utilização do método proposto pode estar restrita a estruturas com apenas duas camadas, o que entretanto é bastante comum em situações geológicas rasas.

## Referências

BLIAS, E.; Long-spreadlength approximations to NMO function for a multi-layered subsurface. CSEG Recorder, p. 36-42, March 2007.

CASTLE, R. J. A theory of normal moveout. Geophysics, v.59, n.06, p.983-999, 1994.

GRECHKA, V., TSVANKIN, I., PP + PS = SS: Geophysics, v. 67, 1961–1971, 2002.

MALOVICHKO, A. A. A new representation of the traveltme curve of reflected waves in horizontally layered media. Applied Geophysics, n.91, p.47-53, 1978 (in Russian).

STOVAS, A.; URSIN, B. Estimation of layer parameters for linear P- and S-wave velocity functions. Geophysics, v. 72, p. U27-U30, 2007.

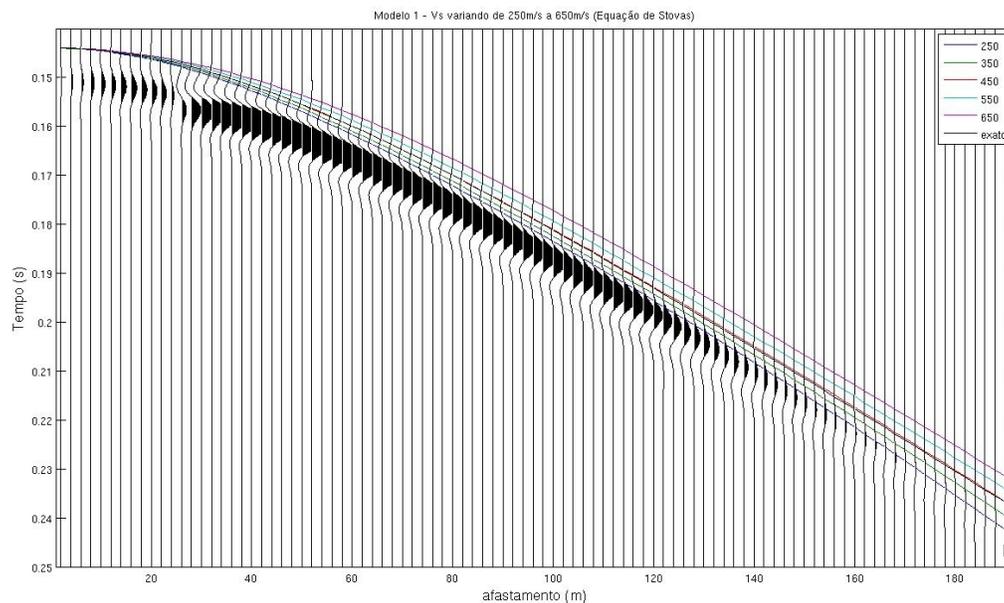


Figura 5: Curvas de tempo usando a equação de Stovas para diferentes velocidades da onda S sobrepostas aos dados sísmicos do modelo 1 (Figura 1). Valor correto igual a 452 m/s.

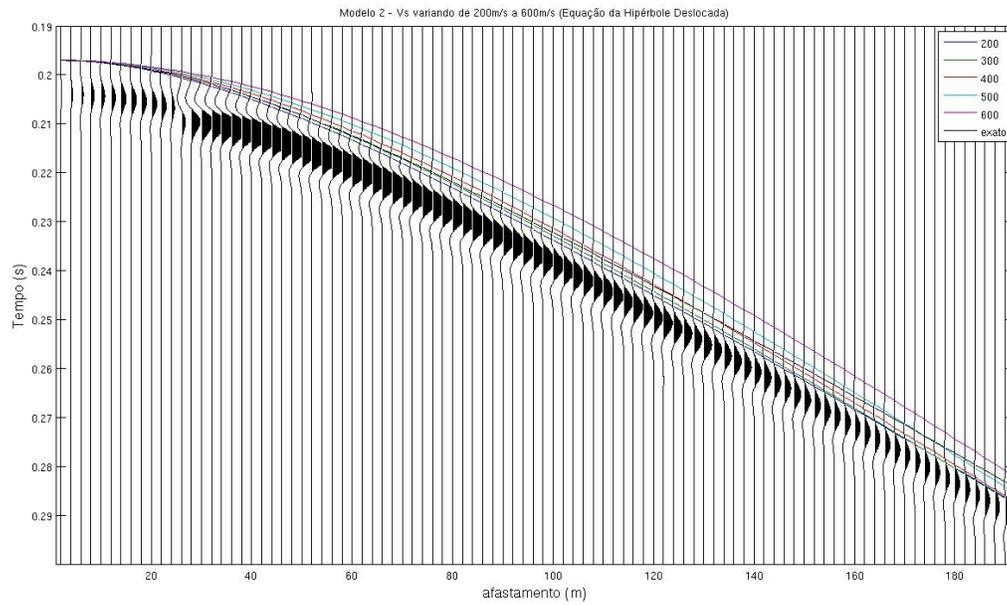


Figura 6: Curvas de tempo usando a equação da hipérbole deslocada para diferentes velocidades da onda S sobrepostas aos dados sísmicos do modelo 2. (Figura 2). Valor correto igual a 300 m/s.

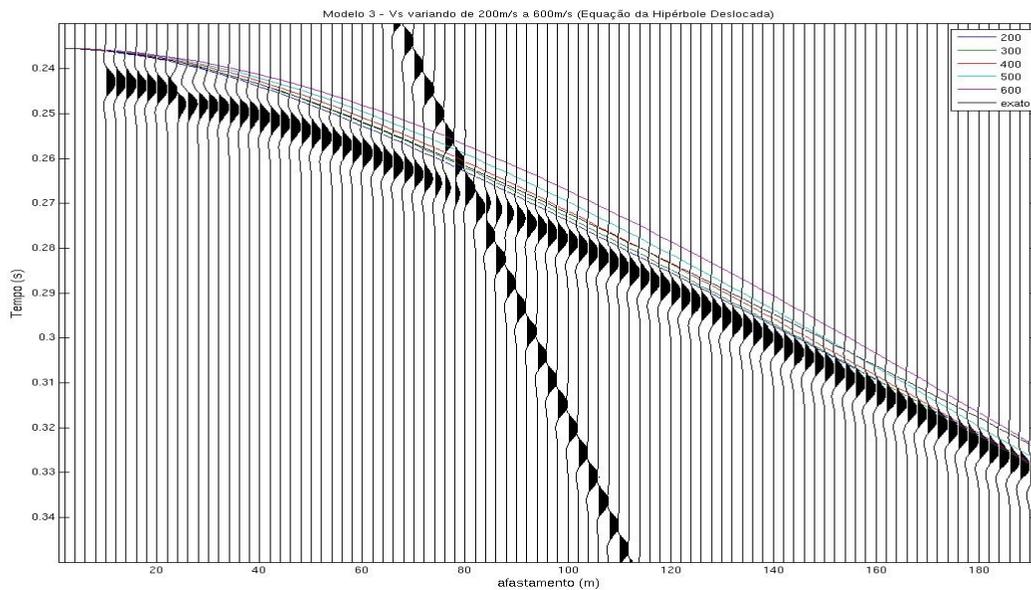


Figura 7: Curvas de tempo usando a equação da hipérbole deslocada para diferentes velocidades da onda S sobrepostas aos dados sísmicos do modelo 3. (Figura 3). Valor correto igual a 300 m/s.