



## Análise de Velocidades e Empilhamento de Dados de Reflexão Sísmica Rasa

Michelle David Watanabe\*<sup>1</sup>, Liliana Alcazar Diogo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Brasil (IAG-USP)

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV 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.

### Abstract

The main purpose of this research was to improve the quality of velocity analysis and stacking of shallow seismic reflection data for situations in which the reflections are not observed within the validity of the traveltimes hyperbolic approximation.

A new implementation to the velocity analysis procedure has been developed, which is based on traveltimes approximation named shifted-hyperbola originally deduced by Malovichko (1978). The procedure was verified on synthetic and real data.

In order to avoid the seismic pulse distortions due to usual NMO stretching, it was proposed to perform a NMO correction that is constant during the reflected pulse duration.

### Introdução

J. Clarence Karcher conduziu os primeiros experimentos de sísmica de reflexão entre 1919 e 1921 e demonstrou o potencial do método geofísico para exploração de óleo através do mapeamento de rochas (Allred *et al.*, 2008). Foi em meados da década de 50, que ocorreram os primeiros relatos da aplicação da sísmica de reflexão em escala de prospecção rasa (Pakiser *et al.*, 1954a, 1954b, 1956), mas somente a partir de 1980 que os levantamentos de sísmica de reflexão rasa tiveram seu foco voltado para resolução de problemas geológico-geotécnicos (Hunter *et al.* (1984), Knapp e Steeples (1986a e 1986b), entre outros.

Os dados de reflexão sísmica rasa apresentam características distintas dos dados sísmicos na escala de investigação de petróleo. Características essas que podem afetar a funcionalidade das etapas do processamento sísmico convencional, dentre as quais destacam-se: pequena multiplicidade dos levantamentos CMP; forte interferência do *groundroll* em afastamentos curtos; estreita janela de afastamento fonte-receptor para observação das reflexões livres da interferência de sinais coerentes e de mudanças da forma do pulso devido à reflexão acima da distância crítica.

Todos os métodos de análise de velocidades fundamentam-se no ajuste da equação de tempo de percurso às reflexões identificadas nos registros sísmicos. No processamento

sísmico convencional, é utilizada a aproximação hiperbólica (Dix, 1955) dada pela fórmula:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{V_{RMS}^2}}$$

onde,  $t_0$  é o tempo de trânsito duplo da superfície ao refletor (tempo normal),  $x$  é a distância da fonte ao receptor e  $V_{RMS}$  é dada em função das velocidades dos meios, pela fórmula,

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i v_i^2 \Delta t_i}{\sum_i \Delta t_i}}$$

sendo,  $v_i$  as velocidades intervalares e  $\Delta t_i$  os intervalos de tempo normal em cada camada  $i$ .

A aproximação hiperbólica é exata apenas para um refletor plano em meios isotrópicos e homogêneos; e para a reflexão na base de um pacote de camadas, é válida somente para pequenos afastamentos fonte-receptor ( $x$ ), menores que a profundidade do refletor.

Várias aproximações têm sido propostas com o intuito de ajustar a curva de tempo de percurso das reflexões para afastamentos fonte-receptor grandes (Malovichko, 1978; De Bazelaire, 1988; Castle, 1994; Bilas, 2007).

Neste trabalho foram investigados procedimentos para a realização da análise de velocidades com base na equação da hipérbole deslocada (*shifted-hyperbola*); e implementada uma correção de NMO constante ao longo da duração do pulso refletido, de forma a evitar o estiramento do pulso.

### Metodologia

#### Equação do Tempo de Percurso

O primeiro passo para o aprimoramento do procedimento de análise de velocidades aos dados sísmicos na escala de investigação rasa foi a escolha da curva de tempo de percurso que seja mais precisa do que a aproximação hiperbólica, para afastamentos maiores do que o dobro da profundidade do refletor.

Para um modelo geológico definido na escala de investigação rasa avaliou-se a formulação da equação de tempo de percurso desenvolvida por Malovichko (1978 em *apud* Castle (1994)), denominada por hipérbole deslocada e dada pela fórmula:

$$t(x) = \left(1 - \frac{1}{s}\right)t_0 + \frac{1}{s} \sqrt{t_0^2 + S \cdot \frac{x^2}{V_{RMS}^2}} \quad (1)$$

onde o parâmetro  $S$  é definido pela relação:

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

ou seja,  $\mu_2 = V_{RMS}^2$

Nota-se que o parâmetro  $S$  nesta aproximação é uma medida de quanto a hipérbole é deslocada de forma a ajustar melhor os tempos calculados aos observados nos dados provenientes do levantamento sísmico.

### Construção do Painel para Análise de Velocidades

A motivação para a elaboração do painel proposto foi viabilizar a realização da análise de velocidades com base em uma equação que além do tempo normal possui duas incógnitas; e constituir um procedimento simples e uma ferramenta útil para aprimorar a qualidade da etapa de análise de velocidades.

Como o procedimento convencional fornece uma boa estimativa do tempo normal ( $t_0$ ), o problema está na determinação da velocidade ( $V_{RMS}$ ), propôs-se inicialmente obter o tempo normal com algum dos procedimentos convencionais baseados na equação da hipérbole. Utilizando o valor de  $t_0$  previamente determinado, o procedimento idealizado foi plotar diversas curvas de tempo de percurso (equação 1) sobre os sismogramas, variando os valores de  $S$  e de  $V_{RMS}$  sistematicamente.

O painel implementado é composto de seis seções gráficas, sendo que em cada seção são representadas 10 curvas de tempo de percurso sobre os dados. Em cada seção o valor de  $S$  é fixo e cada curva de tempo é calculada para um valor de  $V_{RMS}$ . As seções subsequentes resultam do incremento atribuído ao parâmetro  $S$  mantendo o mesmo esquema de variação das velocidades.

A representação do painel foi efetuada com o pacote de processamento sísmico SU-Seismic Unix (Cohen & Stockell, 2010), através de recursos da linguagem *shell-script*. Apenas o cálculo dos tempos de percurso (equação 1) precisou ser programado independente do pacote SU.

Para auxiliar na interpretação do painel e reduzir a ambigüidade, entre os valores de  $S$  e  $V_{RMS}$ , verificou-se que há uma relação de vínculo entre esses valores, dada pela equação (2). Propôs então, a representação gráfica dos valores de  $S$  em função de  $t_0$  e  $V_{RMS}$ . Como são 3 parâmetros, optou-se por gerar uma curva de  $S$  em função de  $t_0$  para cada valor fixo de  $V_{RMS}$ . Esse gráfico auxilia a escolha dos intervalos de  $S$  e de  $V_{RMS}$  para a construção do painel e para a interpretação do mesmo.

### Correção de NMO

Para evitar a distorção do estiramento da correção de NMO convencional, implementou-se um procedimento similar ao Block Move Sum (Rupert & Chun, 1975), onde a correção de NMO é aplicada através de deslocamentos constantes ao longo do traço, como uma correção estática. A correção implementada foi chamada de correção NMO constante.

Para este novo procedimento utilizou-se do programa do pacote SU-Seismic Unix (Cohen & Stockell, 2010) que efetua correção estática (sustaticrrs). A geometria de aquisição dos dados foi extraída do cabeçalho do registros CMP. Os valores de sobretempo (dtNMO) foram calculados utilizando-se a equação da hipérbole deslocada e fornecidos para o programa sustaticrrs, a fim de realizar a correção de NMO.

## Resultados

### Testes sobre dados sintéticos

Para a criação dos sismogramas sintéticos para modelos elásticos, utilizou-se o pacote de programas SEIS88 desenvolvido por Cerveny e Pšenčík (1988).

O modelo utilizado para a geração dos dados sintéticos foi baseado no modelo geológico da área localizada no campus da Universidade de São Paulo (em frente ao Instituto de Física), na região oeste da cidade de São Paulo. Trata-se de sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo compostos, predominantemente, de intercalações de areia e argila, os quais se assentam sobre embasamento granito-gnaiss pré-cambriano. Ficou caracterizado um modelo geológico com 2 camadas horizontais, sendo as espessuras das camadas  $h_1=4,49$  m e  $h_2=26,31$  m e com velocidades  $V_1=357,00$  m/s e  $V_2=1727,08$  m/s (Diogo *et al.*, 2004). Para esse modelo, a  $V_{RMS}$  é 1290 m/s e a distância crítica da reflexão no embasamento é de 24,3 m.

Os parâmetros de aquisição utilizados foram 96 geofones com afastamento mínimo de 1m e intervalo entre os traços de 1m. A frequência predominante utilizada para a geração do sinal foi de 100 Hz. Posteriormente, foi adicionado ruído aleatório aos dados. E para testar a análise de velocidades utilizou-se o envelope do sinal mostrando mais claramente o pulso refletido, uma vez que este não apresenta a defasagem devido à reflexão acima do ângulo crítico de incidência (Figura 1).

Para ilustrar como a curva de tempo de percurso varia em função do parâmetro  $S$ , na Figura 2 são representadas diversas curvas de  $t(x)$ , calculadas variando-se o parâmetro  $S$ , para os valores de  $t_0$  e  $V_{RMS}$ , em seus valores corretos para o modelo considerado:  $t_0=0,5568$  s e  $V_{RMS}=1290$  m/s. Nota-se que para os valores verificados, a curva que melhor se adaptou ao sinal foi a de cor vermelha, a qual representa o valor de  $S=2$ .

Como a faixa de variação, ou seja, o intervalo de busca do parâmetro  $S$  aparentemente é menor do que o intervalo de busca da velocidade  $V_{RMS}$ , optou-se por construir o painel para análise de velocidades fixando um valor de  $S$  e calculando as curvas de tempo para os valores de  $V_{RMS}$ . Dessa forma, observa-se o comportamento das curvas de tempo diante da variação da velocidade  $V_{RMS}$ , para um dado valor de  $S$ .

Na Figura 3 nota-se que para cada valor de  $S$ , foi possível determinar um valor de  $V_{RMS}$  mais adequado. Essa ambigüidade, observada na interpretação do painel proposto, pôde ser resolvida, quando confrontada com o vínculo proposto. O único valor que satisfaz as duas

interpretações é o valor de  $V_{RMS}=1300$  m/s para um S igual a 1,707, lido na Figura 4. Para valores de S maiores, a informação do gráfico (Figura 4) indica velocidades maiores em oposição à interpretação do painel (Figura 5). Observa-se ainda, que o resultado obtido apresenta excelente precisão, uma vez que o valor de S calculado para o modelo proposto foi 1,705, para uma valor de  $V_{RMS}=1290$  m/s como sendo o correto.

#### Dados reais

A metodologia proposta foi aplicada a um conjunto de dados reais anteriormente adquiridos, segundo técnica CMP não convencional (Diogo *et al.*, 2004). Os afastamentos do conjunto de dados adquiridos estão entre 50 a 84 m. O intervalo entre geofones foi de 1 m, acarretando em um intervalo de 2 m nos sismogramas CMP.

O processamento dos dados reais iniciou-se pela determinação dos valores de  $t_0$  a partir do painel NMO para diversos CMP's, conforme exemplificado para o CMP30 na Figura 6. A seguir, a partir da interpretação do gráfico de S ( $t_0, V_{RMS}$ ) (Figura 7) identificou-se, para o valor de  $t_0=0,0656$  s, qual a faixa de valores de S apropriada para a construção do painel para análise de velocidades. E de acordo com o painel para o CMP30 (Figura 8), identificou-se que a curva que melhor se ajusta aos dados corresponde à velocidade de 1250 m/s com  $S=1.58$ .

Em geral, a análise de velocidades proposta forneceu valores de  $V_{RMS}$  ao longo da linha entre 50 a 100 m/s menores do que os previamente encontrados pela correção de NMO convencional. A nova interpretação é mais condizente com os valores esperados para a área (Diogo *et al.*, 2004).

O segundo objetivo do trabalho foi melhorar a qualidade da correção de NMO, evitando o estiramento do pulso. Na Figura 9 é ilustrado para o CMP30, o resultado das correções de NMO convencional e implementada; e na Figura 10, o empilhamento do sismograma CMP. Nota-se que o empilhamento do CMP corrigido de NMO constante apresenta maior amplitude e maior frequência dominante.

O processo foi então adaptado para ser aplicado em todos os dados do levantamento CMP. Na Figura 11, pode-se comparar a qualidade das seções: seção empilhada com correção NMO convencional (traços de 1 a 296) e com correção NMO constante (297 a 502).

#### Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos para a análise de velocidade, com base na equação da hipérbole deslocada, sobre os dados sintéticos mostraram que mesmo existindo ambigüidade no ajuste da curva  $t(x)$ , há um relacionamento teórico do valor de S com os parâmetros do modelo, o qual representa uma relação de vínculo que ser satisfeita. A construção do gráfico de S em função de  $t_0$  e  $V_{RMS}$  foi de grande valia para a minimização do erro na interpretação dos valores de S e  $V_{RMS}$ , analisados tanto sobre dados sintéticos quanto reais. A implementação da nova correção NMO, uma adaptação do conceito do método BMS (Block Move Sum), reduziu as distorções observadas na forma do pulso, melhorando

portando o empilhamento (aumentou a amplitude e a frequência dominante do pulso sísmico).

#### Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida no período de março de 2009 a julho de 2010.

#### Referências

- Allred *et al.*, 2008. Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press. p.03.
- Blias, E., 2007. Long-spreadlength approximations to NMO function for a multi-layered subsurface. CSEG Recorder, p. 36-42.
- Castle, R. J., 1994. A theory of normal moveout. Geophysics, 59: 983-999.
- Cerveny, V., Psencik, I., 1988. SEIS88. Ray tracing program package. Prague: Charles University.
- Cohen, J.K., Stockwell, J.W. CWP/SU: Seismic Unix Release 33: A Free Package for Seismic Research and Processing. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines, Colorado.
- De Bazelaire, E., 1988. Normal moveout revisited: Inhomogeneous media and curved interfaces. Geophysics, 53: 143-157.
- Diogo *et al.*, 2004. Bedrock imaging using post-critical shallow seismic reflection data. Journal of Applied Geophysics, 57: 1-9.
- Dix, C. H., 1955. Seismic velocities from surface measurements. Geophysics, 20: 68-86.
- Hunter *et al.*, 1984. Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph - some simple techniques. Geophysics, 49: 1381-1385.
- Knapp, R. W., Steeples, D. W., 1986b. High-resolution common depth point seismic reflection profiling: instrumentation. Geophysics, 51: 276-282.
- Malovichko, A. A., 1978. A new representation of the travelttime curve of reflected waves in horizontally layered media. Applied Geophysics, 91: 47-53 (in Russian).
- Pakiser, L.C., Mabey, D.R., 1954a. Mapping shallow horizons with reflection seismograph. Science, 119, p.740.
- Pakiser *et al.*, 1954b. Mapping shallow horizons with reflection seismograph. AAPG Bull., 38: 2382-2394.
- Pakiser, L.C., Warrick, R.E., 1956. A preliminary evaluation of the shallow reflection seismograph. Geophysics, 21: 388-405.
- Rupert G. B., Chun J. H., 1975. The block move sum normal moveout correction. Geophysics, 40: 17-24.

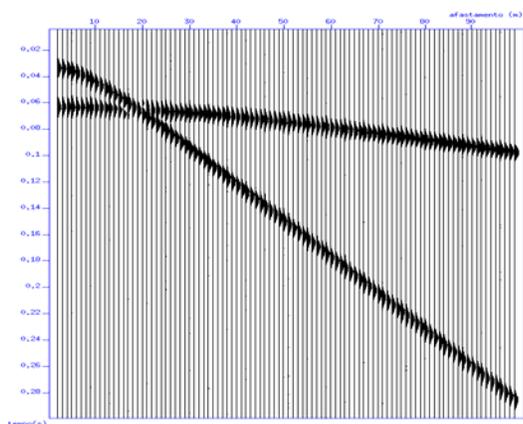


Figura 1 - Sismograma sintético com ganho AGC, adição de ruído e função envelope.

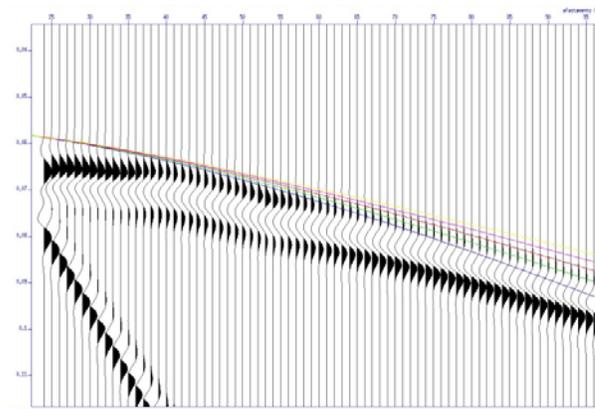


Figura 2 - Representação dos valores de  $S=1.0$  (azul),  $S=1.5$  (verde),  $S=2.0$  (vermelho),  $S=2.5$  (rosa),  $S=3.0$  (amarelo) para velocidade de 1290 m/s.

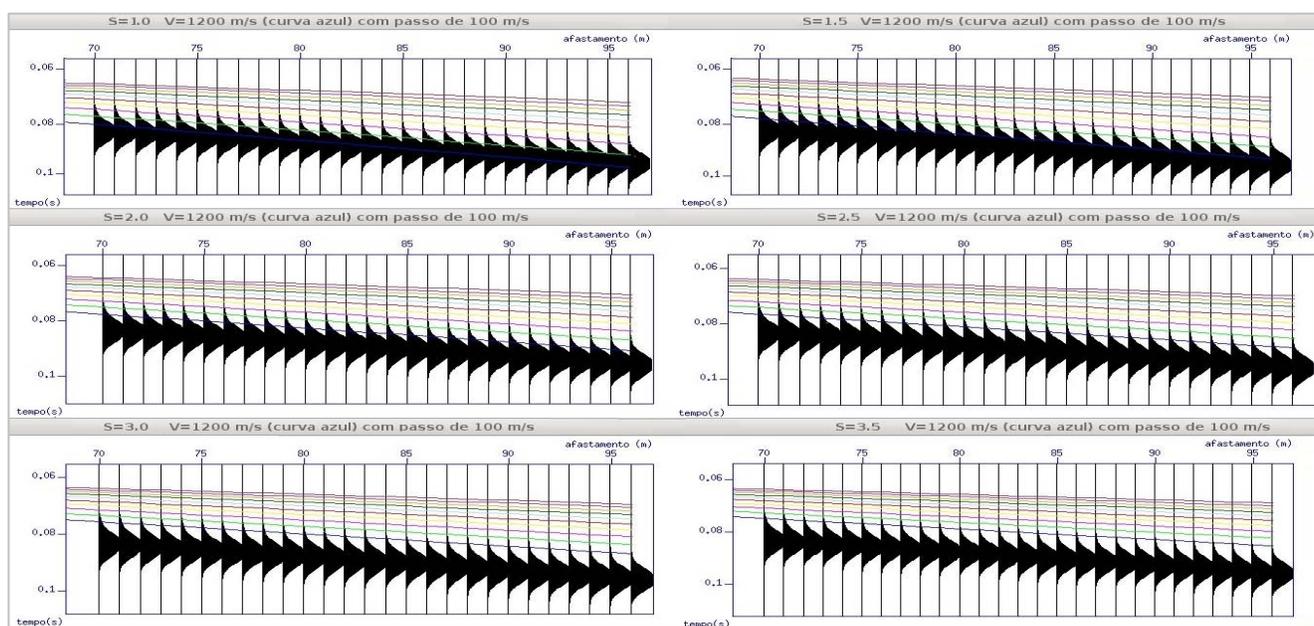


Figura 3 - Painel para análise de velocidades para  $S$  variando de 1,0 à 3,5, com velocidade inicial (linha azul) de 1200 m/s e passo de 100 m/s. As curvas de tempo de percurso variam com o aumento da velocidade no sentido ascendente.

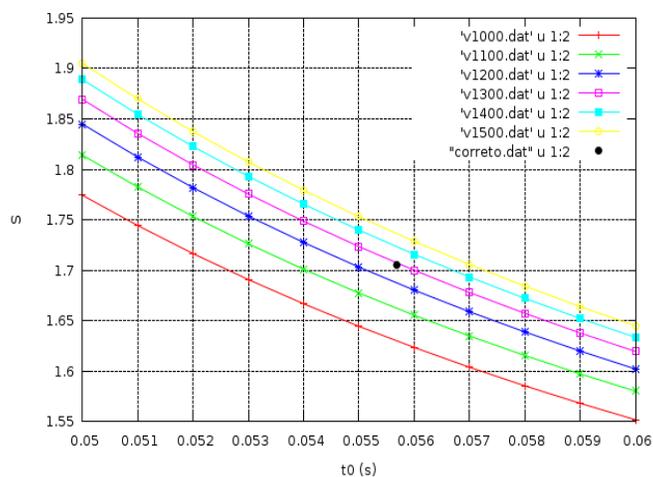


Figura 4 - Gráfico de  $S-t_0$  para diferentes valores de velocidade  $V_{RMS}$ ,

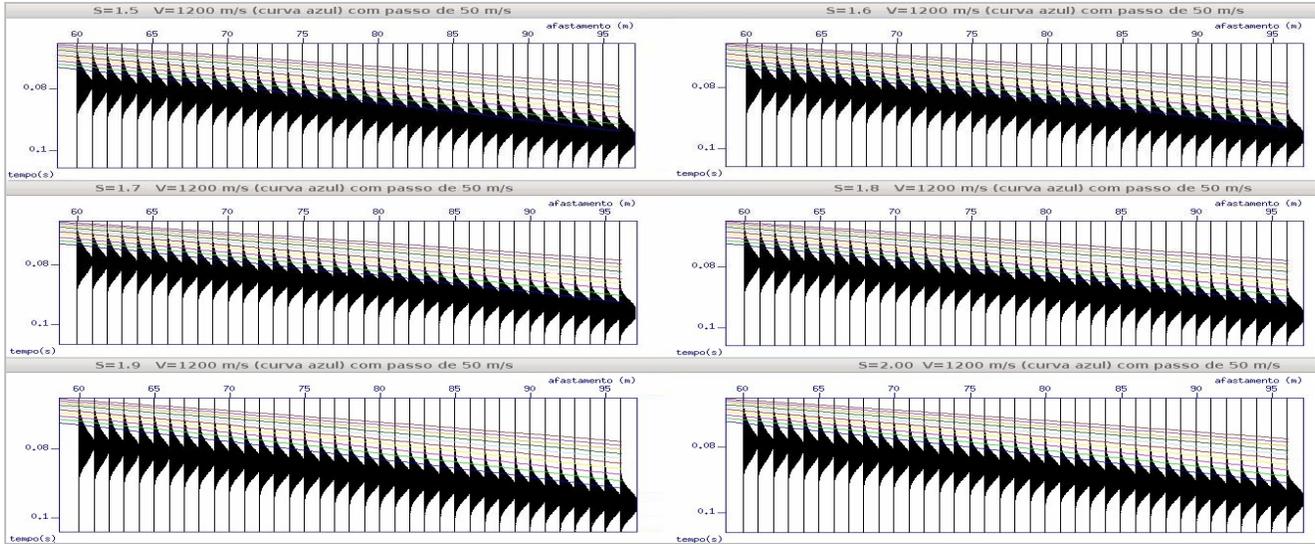


Figura 5 - Painel para análise de velocidades, com S variando de 1,5 à 2,0, com velocidade inicial (linha azul) com valor de 1200 m/s e passo de 50 m/s. As curvas de tempo de percurso variam com o aumento da velocidade no sentido ascendente.

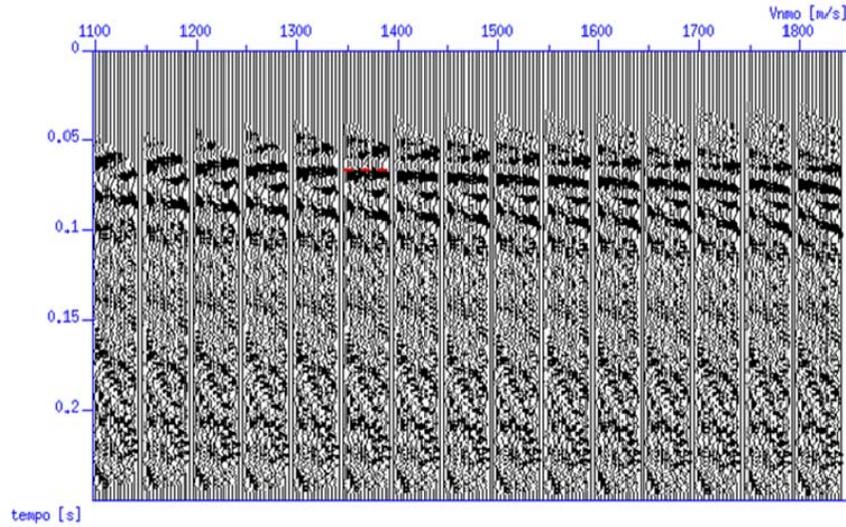


Figura 6 - Painel NMO para CMP30

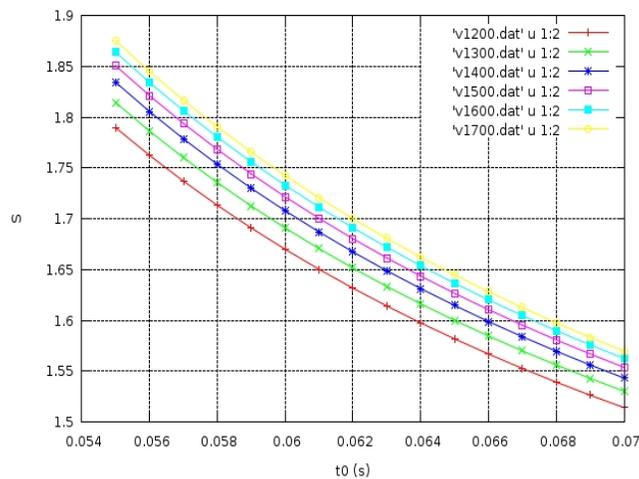


Figura 7 - Gráfico de  $S-t_0$  para diferentes valores de velocidade  $V_{RMS}$ , calculados para faixa de valores definida da interpretação do painel NMO convencional.

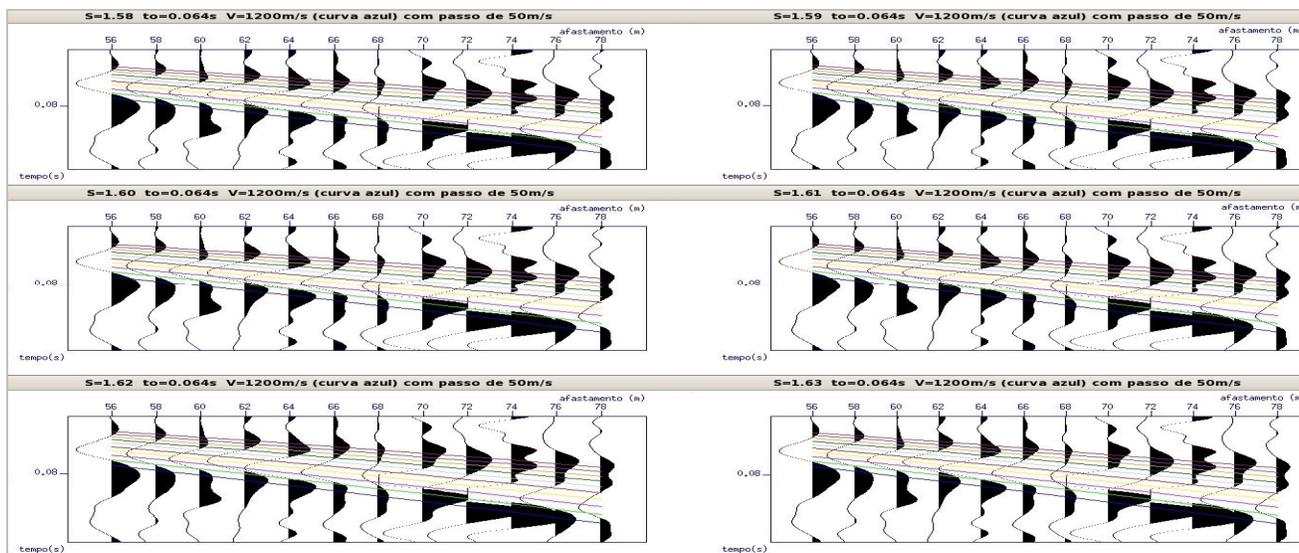


Figura 8 - Painel para análise de velocidades com S variando de 1.58 à 1.63, com velocidade inicial (linha azul) de 900 m/s e passo de 100 m/s.

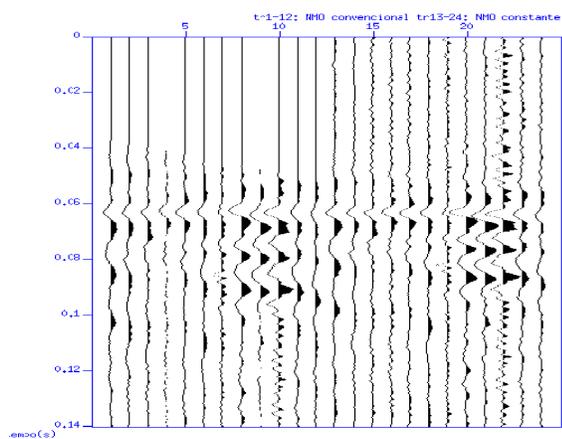


Figura 9 - Comparação entre a correção de NMO convencional (esquerda, traços 1 a 12) e implementada com deslocamento constante (direita, traços 13 a 24) para o CMP30.

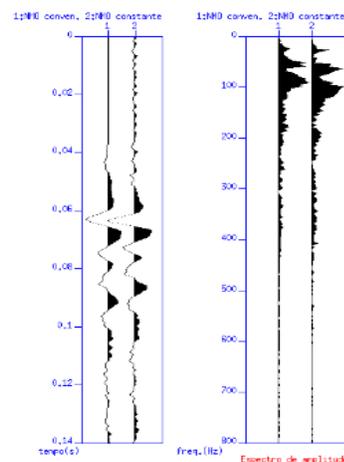


Figura 10 - À esquerda: empilhamento do CMP 30 após correção de NMO: convencional (traço 1) e implementada (traço 2), À direita: respectivos espectros de amplitude dos traços empilhados.

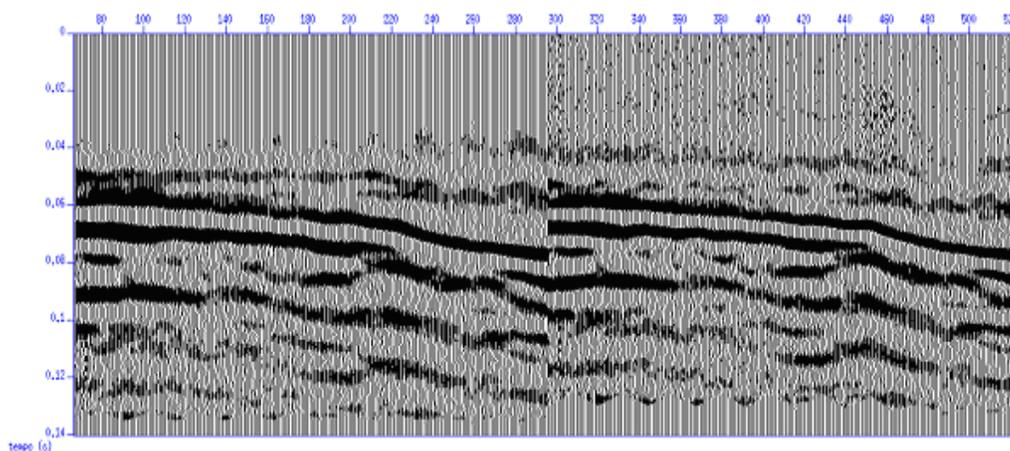


Figura 11 - Seção empilhada obtida da correção de NMO convencional (esquerda, traços 1 a 297) e implementada com deslocamento constante (direita, traços 298 a 502).