



Areal Shot Records: Migração Reversa no Tempo e a Influência dos Critérios para a Determinação das Matrizes de Tempo de Trânsito

Bulcão, A.¹; Soares Filho, D.M.²; Mansur, W.J.¹; (¹) - PEC/COPPE/UFRJ, (²) - CENPES/PETROBRAS

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

This paper presents a methodology that applied the superposition of different seismograms, called Areal Shot Records, to provide the data to use Reverse Time Migration (RTM) to form a depth image. A new image condition is also described, and results obtained are discussed. Synthetic results for Marmousi Model are presented.

Introdução

Neste trabalho apresenta-se de forma sucinta o esquema de Migração Reversa no Tempo empregando-se a denominada condição de imagem de tempo de excitação (*Excitation-time Imaging Condition*) (CHANG, *et al.*, 1986), aliado a metodologia na qual os diversos sismogramas que compõem determinado levantamento sísmico são compostos considerando-se determinados tempos de atraso (*delayed-time*) para cada um deles, formando-se um sismograma final o qual será depropagado.

Esta filosofia na qual os diversos sismogramas são compostos para posteriormente serem aplicados os esquemas de Migração Sísmica, baseia-se no Princípio da Superposição, e vem sendo explorada por inúmeros pesquisadores. Tal filosofia tanto busca a redução do custo computacional envolvido na aplicação dos esquemas de Migração Sísmica, quanto à melhoria na qualidade dos resultados alcançados. Nesta linha podem-se citar os seguintes trabalhos: BERKHOUT, 1992; RIETVELD, *et al.*, 1992; RIETVELD & BERKHOUT, 1994; WHITMORE, 1995; ROMERO, *et al.*, 2000; LIU, *et al.*, 2002; SUN, *et al.*, 2002; dentre inúmeros outros.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência dos critérios adotados para a formação das matrizes de tempo de trânsito empregadas na condição de imagem de tempo de excitação pelo esquema de Migração Reversa no Tempo, aliada a metodologia no qual os diversos sismogramas são compostos anteriormente considerando-se diferentes tempos de atraso.

Migração Reversa no Tempo

A Migração Reversa no tempo (RTM) é um esquema de migração em profundidade na qual os dados sísmicos são depropagados no sentido inverso do eixo temporal. Durante este processo aplica-se a denominada condição

de imagem para formação da imagem da seção sísmica em profundidade (BERKHOUT, 1984; ETGEN, 1990; BORDING, *et al.*, 1997; dentre outros). Dentre os principais fatores que influenciam o correto posicionamento dos refletores, destacam-se:

- 1) O sistema de aquisição e os parâmetros empregados no levantamento sísmico
- 2) o modelo matemático empregado para a depropagação do campo de ondas registrado;
- 3) o bom conhecimento dos parâmetros que definem o macro-modelo sísmico no qual os dados sísmicos foram registrados;
- 4) a aplicação de uma condição de imagem apropriada.

Condição de Imagem de Tempo de Excitação

A condição de imagem indica a existência de um refletor em uma determinada posição em profundidade onde há a coincidência entre os tempos de trânsito do campo de ondas propagado a partir da fonte sísmica e do campo de ondas depropagado prescrevendo-se o dado sísmico registrado nos respectivos receptores (geofones).

A denominada Matriz de Tempo de Trânsito – de certa forma – representa este tipo de condição de imagem. Uma das formas de obter-se tal matriz é a aplicação de um determinado critério durante a fase de propagação do campo de ondas a partir da fonte sísmica.

Critério da Amplitude Máxima

Empregado na grande maioria das análises para a formação da matriz de tempo de trânsito (LOEWENTHAL, *et al.*, 1991 e BOTELOHO, *et al.* 1991) Em termos de pseudocódigo, deve-se verificar a seguinte expressão durante a propagação do campo de ondas para todos os pontos do modelo de velocidades:

```
if (abs(u(i,j,t)) ≥ abs(ref(i,j))) then
    ref(i,j) = u(i,j,t)
    T(i,j) = t
endif
```

onde: $u(i,j,t)$ é o campo de ondas; $ref(i,j)$ é uma matriz contendo o valor da amplitude máxima e $T(i,j)$ é a matriz de tempo de trânsito.

Neste critério nas regiões distantes da fonte sísmica as diversas reflexões e reverberações do campo de ondas, provenientes das diferenças de impedância acústica entre as interfaces, interagem construtivamente nos valores das amplitudes. Criando, desta forma, inúmeras descontinuidades nas matrizes de tempo de trânsito.

Critério da Amplitude Máxima nas Proximidades da Primeira Quebra (*First Break*)

Neste novo critério proposto para a formação das matrizes de tempo de trânsito, como o próprio nome indica, objetiva-se registrar a máxima amplitude nas proximidades da primeira quebra (BULCÃO, *et al.*, 2003a e 2003b; e BULCÃO 2004). A grande vantagem deste novo critério é que as matrizes de tempo de trânsito apresentam um comportamento mais suave (contínuo).

Neste caso leva-se em conta a frequência de corte da fonte sísmica (f_c) através da seguinte expressão (equação 1):

$$T_f = 2\sqrt{\pi}/f_c \quad (1)$$

Em termos de pseudocódigo, neste novo critério, verifica-se a seguinte expressão durante a fase de propagação:

```

cond1 = ((t - T(i, j)) <= (1.5 * T_f))
cond2 = (u(i,j,t) > ref(i,j))
cond3 = (ref(i,j) = 0.0)
if (cond2.and(cond1.or.cond3)) then
    ref(i,j) = u(i,j,t)
    T(i, j) = t
endif

```

onde: cond1, cond2 e cond3 são variáveis lógicas que conterão o resultado das expressões avaliadas.

Areal Shot Records

Nesta metodologia de migração compõem-se diversos sismogramas de inúmeras formas distintas antes da aplicação do esquema de Migração Sísmica em questão, especificamente neste trabalho o esquema de Migração Reversa no Tempo, de forma similar a metodologia de migração pós-empilhamento.

Existem várias maneiras distintas que podem ser empregadas para realizar-se a composição dos sismogramas, dentre elas: através de somas ponderadas, operadores de convolução, formando frentes de ondas na superfície, abaixo dela ou nas vizinhanças do alvo, etc... Na literatura especializada tais esquemas recebem diversas nomenclaturas, tais como: *Areal Shot Record*; *Phase Encoding*; *Delayed-Shot Migration*; *Controlled Illumination*; *Plane Wave Composition*; *Wave Synthesis*; *Multi-Source*, etc.

Neste trabalho, segue-se a metodologia apresentada por WHITMORE, 1995 e RIETVELD, 1995; na qual os sismogramas são combinados considerando-se diferentes tempos de atraso de modo a formar ondas planas na superfície do modelo. Expressando-se de maneira distinta, os sismogramas são empilhados (*stacking*) considerando-se tempos de atraso (*time delay*) que sofrem uma variação linear com a distância do ponto de tiro com uma determinada posição de referência.

Após a composição dos sismogramas aplica-se o esquema de Migração Reversa no Tempo de forma análoga ao caso tradicional (pré-empilhamento,

considerando-se um único sismograma). Logicamente que os tempos de atraso utilizados e o posicionamento das fontes sísmicas, devem ser levados em conta na determinação da condição de imagem.

Exemplo

A seguir expõe-se um exemplo da aplicação da metodologia apresentada neste trabalho, no qual será avaliada a influência dos critérios adotados para a determinação das matrizes de tempo de trânsito utilizadas na condição de imagem de tempo de excitação no esquema empregado de Migração Reversa no Tempo.

Nesta aplicação utilizou-se o modelo de velocidades proposto pelo Instituto Francês do Petróleo (*Institut Français du Pétrole*), denominado Marmousi. Possuindo uma geometria complexa e contendo gradientes de velocidades nas direções verticais e horizontais, onde os valores de velocidade de propagação variam entre 1500 a 5500 m/s (vide figura 1). Tal modelo é largamente empregado na literatura especializada por diversos autores para a validação e comparação de diversos métodos Geofísicos.

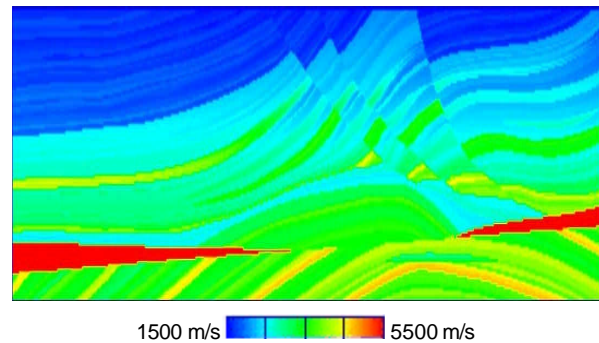


Figura 1 – Modelo de velocidades Marmousi

Este modelo de velocidades, originalmente contendo um espaçamento de 24 m entre os pontos do *grid*, sofreu uma re-amostragem - utilizando funções de interpolação lineares - para um espaçamento de 12 m. No total têm-se 767 x 243 pontos do *grid*, perfazendo 9.192 x 2.904 Km.

Inicialmente, simulou-se um levantamento sísmico utilizando um programa de Modelagem Sísmica via Método das Diferenças Finitas empregando operadores acústicos, ou seja, contemplou-se apenas a propagação de ondas compressoriais (*P-waves*). Em tal levantamento sísmico sintético adotaram-se os seguintes parâmetros de aquisição:

- Espaçamento entre tiros: 24 m (totalizando 384 tiros);
- Espaçamento entre receptores: 12 m (dispostos ao longo de toda a superfície do modelo);
- Tempo total de registro: 6.0 s;
- Intervalo de amostragem: 4 ms;
- Frequência de Corte da fonte sísmica: 28 Hz;

Destaca-se que, nos esquemas de Migração Reversa no Tempo – apresentados neste trabalho - nas etapas de determinação da matriz de tempo de trânsito e de depropagação do campo de ondas, o modelo de

vagarosidade (grandeza definida como sendo o inverso da velocidade) foi suavizado através da aplicação de uma média móvel ao longo das direções coordenadas, considerando-se nove (18) amostras (pontos do *grid*).

Ressalta-se também que, na composição dos diversos painéis das imagens em profundidade - para a obtenção da imagem em profundidade final - considerou-se apenas o empilhamento (*stacking*). Existem determinados tratamentos que quando aplicados a cada um dos painéis, antes do empilhamento (*stacking*), podem vir a proporcionar um ganho significativo na qualidade da imagem em profundidade final, como por exemplo a reordenação dos traços em famílias CRP's (*Common Receiver Point*) seguida da aplicação de um silenciamento (*muting*) nas regiões onde não mais houver a coincidência no posicionamento dos refletores, para então empilhá-los (Bulcão, 2004).

Apenas para efeito de comparação com os demais resultados que serão apresentados neste trabalho, aplicando-se a metodologia exposta na qual compõem-se vários sismogramas, ilustra-se na figura 2 a imagem em profundidade final resultante da aplicação do esquema tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento. Tal imagem foi obtida adotando-se o critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra para a determinação das matrizes de tempo de trânsito.

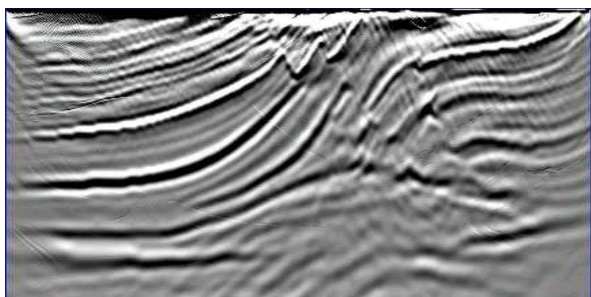


Figura 2 – Imagem em profundidade final, resultante da aplicação do esquema tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento, resultante do empilhamento de 384 imagens.

A aplicação da metodologia apresentada compõe os diversos sismogramas – através de seu empilhamento (*stacking*) considerando-se determinados tempos de atraso (*delayed-time*) – formando um sismograma final o qual será depropagado, aplicando-se o esquema de Migração Reversa no Tempo para a formação de uma imagem em profundidade. Definiu-se – neste exemplo – que os tempos de atraso seriam especificados de tal forma a obterem-se frentes de ondas planas com determinadas inclinações em relação à superfície do modelo de velocidade.

Deste modo, a seguir apresenta-se na tabela 1 os tempos de atraso que foram aplicados, considerando-se como referência os sismogramas nos quais as fontes sísmicas encontram-se posicionadas sobre os vértices do modelo de velocidade. De acordo com os valores especificados na tabela 1, aplicando-se a metodologia apresentada, formaram-se ao todo 10 sismogramas empilhados.

Tabela 1 – Tempos de atraso aplicados aos sismogramas nos quais a fonte sísmica encontra-se sobre o vértice do modelo de velocidades.

Tempos de Atraso (<i>Delayed-Time</i>)				
0.25 s	0.50 s	0.75 s	1.0 s	1.25 s

Na figura 3 apresentam-se dois sismogramas finais, resultantes do empilhamento dos 384 sismogramas considerando-se tempos de atraso (*delayed-time*) de tal forma que as frentes de ondas planas possuam um tempo de atraso de 1.0 s em relação aos vértices superiores do modelo de velocidades.

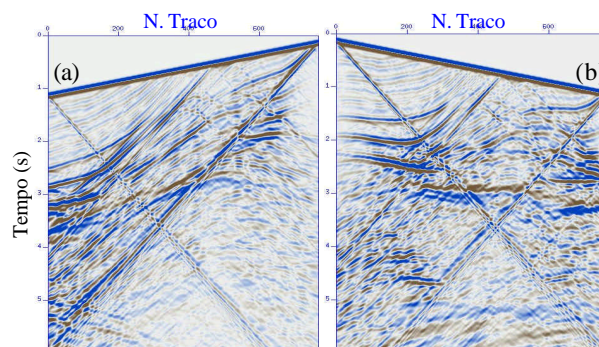


Figura 3 – Sismogramas finais empilhados, considerando-se a formação de ondas planas possuindo um tempo de atraso de 1.0 s em relação ao vértice esquerdo (a) e direito (b) do modelo de velocidades.

Na aplicação do esquema de Migração Reversa no Tempo, para a obtenção da condição de imagem durante a etapa de determinação das matrizes de tempo de trânsito, deve-se considerar os mesmos tempos de atraso (*delayed-time*) que foram adotados na composição dos sismogramas finais empilhados.

Dando prosseguimento a apresentação dos resultados, a seguir, na figura 4, encontram-se representadas as matrizes de tempo de trânsito, empregando-se uma escala de cores de alta frequência que destaca as pequenas variações dos valores existentes. Tais matrizes foram determinadas a partir do critério da amplitude máxima e do critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra.

Observa-se na figura 4, que, no caso da adoção do inovador critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, a matriz de tempo de trânsito possui um número bem inferior de discontinuidades do que no caso da adoção do tradicional critério da amplitude máxima. Advoga-se que tal característica proporcionará a formação de imagens em profundidade nas quais os refletores apresentem uma melhor continuidade ao longo da seção migrada (Bulcão, 2004).

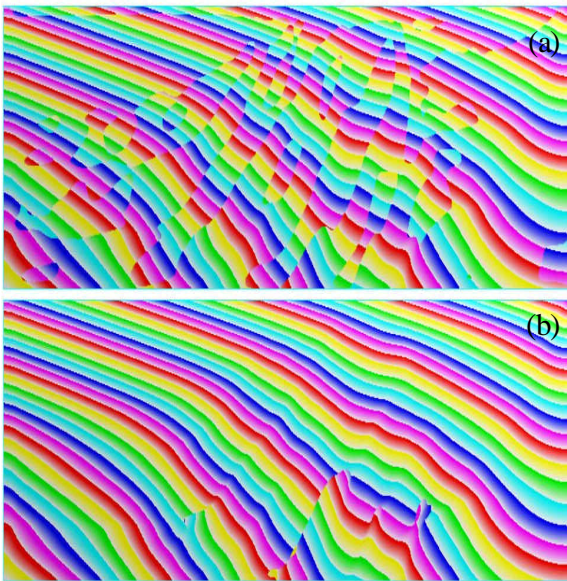


Figura 4 – Representação das matrizes de tempo de trânsito, considerando-se a formação de uma onda plana possuindo um tempo de atraso de 1.25 s em relação ao vértice direito do modelo de velocidades. Determinadas a partir do critério da amplitude máxima (a) e da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (b).

Analisando-se as ilustrações apresentadas das matrizes de tempo de trânsito (vide figura 4), podem-se tecer alguns comentários:

Destaca-se que, mesmo suavizando-se o modelo de vagarosidade, quando há um contraste de impedância as diversas componentes do campo de ondas (ondas refletidas, refratadas, etc) podem vir a interferir construtivamente entre si, ocasionando um valor de amplitude para a grandeza associada que seja maior do que a amplitude relacionada à primeira quebra (*first break*). Este fenômeno explica as discontinuidades apresentadas nas matrizes de tempo de trânsito determinadas a partir do critério da amplitude máxima.

A fim de comprovar a tese proposta de que a adoção do critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra proporciona uma melhor continuidade dos refletores imageados, apresenta-se na figura 5 as imagens em profundidade oriundas da aplicação do esquema de Migração Reversa no Tempo considerando-se os dois critérios distintos para a determinação das matrizes de tempo de trânsito.

No caso da figura 5, as imagens em profundidade foram obtidas utilizando a metodologia apresentada neste trabalho, no qual diversos sismogramas são compostos – considerando-se diferentes tempos de atraso (*delayed-time*) – formando um sismograma empilhado final. A figura apresentada corresponde ao caso em que se considera a formação de apenas uma onda plana possuindo um tempo de atraso de 1.25 s em relação ao vértice direito, sendo que as matrizes de tempo de trânsito pertinentes estão ilustradas na figura 4.

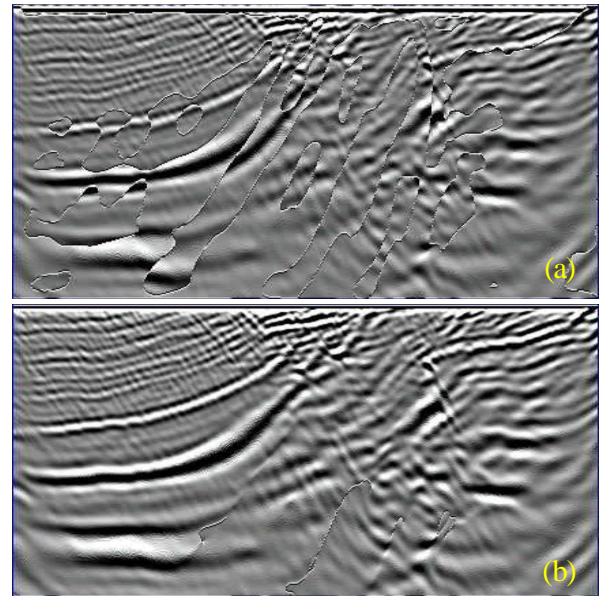


Figura 5 – Imagens em profundidade obtidas considerando-se os diferentes critérios empregados para a determinação das matrizes de tempo de trânsito, critério da amplitude máxima (a) e da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (b). Neste caso considera-se que os sismogramas foram compostos formando apenas uma onda plana possuindo um tempo de atraso de 1.25 s em relação ao vértice direito do modelo de velocidades.

Analisando-se as imagens em profundidade apresentadas na figura 5, podem-se tecer os seguintes comentários:

- o Observa-se claramente a grande correlação existente entre as discontinuidades existentes na matriz de tempo de trânsito e a perda de continuidade dos refletores imageados.
- o Apesar da superioridade apresentada pela imagem em profundidade obtida com o critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, em ambos os casos destacam-se os excelentes resultados obtidos com a estratégia de migração apresentada, na qual compõem-se os diversos sismogramas considerando-se tempos de atraso (*delayed-time*) distintos (neste caso formando uma frente de onda plana).
- o Salienta-se o baixo custo computacional envolvido na obtenção destes resultados, similar ao custo da obtenção de uma única imagem em profundidade no esquema tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento.

Finalmente, na figura 6 apresentam-se as imagens em profundidade finais, obtidas após o empilhamento (*stacking*) das 10 imagens em profundidade determinadas a partir da aplicação do esquema de Migração Reversa no Tempo nos 10 sismogramas empilhados, para os quais consideraram-se os diferentes tempos de atraso expressos na tabela 1 (formando-se 10 ondas planas com diferentes inclinações em relação à superfície do modelo de velocidades).

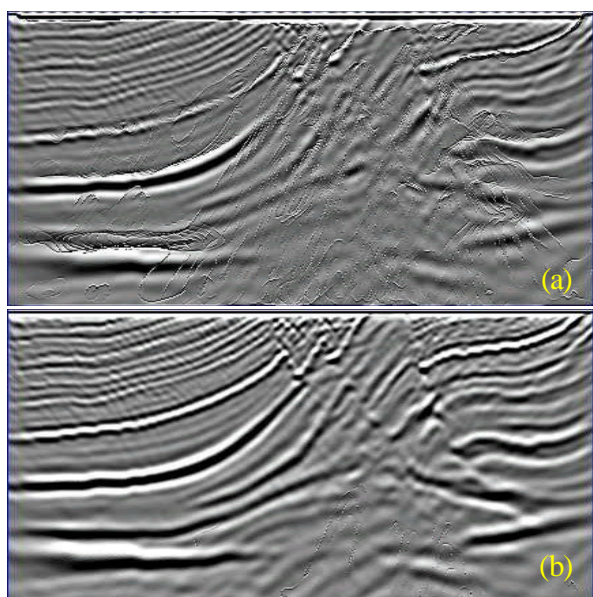


Figura 6 – Imagens em profundidade finais, resultantes do empilhamento (*stacking*) das 10 imagens determinadas a partir da aplicação da estratégia de migração apresentada na qual compõem-se os sismogramas de tal modo a formar uma frente de onda plana. Imagens determinadas empregando-se o critério da amplitude máxima (a) e da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (b).

Comparando-se as imagens em profundidade finais apresentadas na figura 6, podem-se fazer os seguintes comentários:

- o Apesar das discontinuidades presentes nas matrizes de tempo de trânsito determinadas pelo critério da amplitude máxima, no resultado final – após o empilhamento das 10 imagens – houve um aumento da relação sinal/ruído, pois processo empilhamento a amplitude dos refletores erroneamente imageados tende a se anular.
- o No caso da adoção do critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra a imagem em profundidade final apresenta uma qualidade muito superior no que diz respeito à relação sinal/ruído e a continuidade dos refletores.
- o Mesmo considerando que tais resultados foram obtidos com o empilhamento de apenas 10 imagens em profundidade, qualitativamente – em algumas regiões – a relação sinal/ruído da seção migrada chega a ser até melhor do que o resultado obtido com o esquema tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento (vide figura 2, na qual consideraram-se 384 painéis).

Ao se comparar às imagens em profundidade apresentadas na figura 6, com a imagem em profundidade obtida com o esquema tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento (vide figura 2) deve-se levar em consideração o custo computacional envolvido na determinação de tais resultados. No caso, as imagens expostas na figura 6 apresentaram um custo computacional de aproximadamente 3 % do necessário para a formação da imagem da figura 2.

Conclusões

O critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, utilizado na determinação das matrizes de tempo de trânsito, proporcionou a formação de matrizes de tempo de trânsito com um comportamento mais suave (contínuo), principalmente nas regiões distantes do ponto de aplicação da fonte sísmica. Tal característica, possibilitou a formação de imagens em profundidade nas quais tem-se melhores relações sinal/ruído e continuidade dos refletores corretamente imageados ao longo da seção migrada.

Devem-se ressaltar os excelentes resultados das imagens em profundidade, oriundas da aplicação da metodologia na qual os sismogramas foram compostos considerando-se diferentes tempos de atraso, de modo a formar uma frente de onda plana na superfície do modelo de velocidades. Apresentando relações sinal/ruído semelhante a metodologia tradicional de Migração Reversa no Tempo Pré-empilhamento, a uma ínfima fração de 3% do custo computacional.

Referências

- BERKHOUT, A.J., 1992, Areal Shot Record Technology, *J. Seis. Expl.*, 1, p. 251-264.
- BOTELHO, M.A.B., STOFFA, P.L., 1991, "Finite-Difference Prestack Reverse Time Migration Using the P-SV Wave Equation", *61st Ann. Internat. Mtg. SEG (Society of Exploration Geophysicists)*, Expanded Abstract, pp. 1009-1012.
- BULCÃO, A., 2004, Modelagem e Migração Reversa no Tempo Empregando Operadores Elásticos e Acústicos, *Tese de Doutorado* – Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEC/COPPE.
- BULCÃO, A., SOARES FILHO, D.M., MANSUR, W.J., 2003a, "Cabo de Fundo Oceânico (O.B.C.): Emprego de Múltiplas para o Imageamento de Estruturas Complexas em Sub-Superfície", *8º Congresso Internacional da SBGF – Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro.
- BULCÃO, A., SOARES FILHO, D.M., MANSUR, W.J., 2003b, "Migração Reversa no Tempo com Operadores Elásticos: Imageamento com Vários Modos de Ondas", *8º Congresso Internacional da SBGF – Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro.
- CHANG, W.F., McMECHAN, G., 1986, "Reverse-Time Migration of Offset Vertical Seismic Profiling Data Using the Excitation Time Imaging Condition", *Geophysics*, v. 51, pp. 67-84.
- LIU, F., STOLT, R.H., HANSON, D.W., DAY, R.S., 2002; Plane Wave Source Composition: An Accurate Phase Encoding Scheme for Prestack Migration, *SEG 72nd 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.

- RIETVELD, W.E.A, BREKHOUT, A.J., WAPENAAR, C.P.A., 1992, Optimum Seismic Illumination of Hydrocarbon Reservoirs, *Geophysics*, 57, p. 1334-1345.
- RIETVELD, W.E.A., BERKHOUT, A.J. , 1994, Prestack Depth Migration by Means of Controlled Illumination, *Geophysics*, 59, p. 801-809.
- ROMERO, L.A., GHIGLIA, D.C., OBER, C.C., MORTON, S.A., 2000, Phase Encoding of Shot Records in Prestack Migration, *Geophysics*, 2, p. 426-436.
- SUN, R., ZHANG, S., LIU, F.; 2002, Prestack Migration of Areal Shot Records with Phase Encoding, *SEG 72nd Annual Meeting*.
- WHITMORE, N.D.; 1995, An imaging Hierarchy for Common Angle Plane Wave Seismograms, *Ph.D. Thesis*, University of Tulsa.