



Migração Reversa no Tempo com Operadores Elásticos: Imageamento com Vários Modos de Ondas

André Bulcão, PEC/COPPE/UFRJ

Djalma Manoel Soares Filho, CENPES/PETROBRAS

Webe João Mansur, PEC/COPPE/UFRJ

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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 new methodology that uses converted waves - traditionally treated as noise - to make new depth images, using Reverse Time Migration (RTM). New image conditions - which solve the problem of correcting the phase signal - are also described, and results obtained are discussed. Synthetic results for SEG/EAGE salt model are presented for Ocean Bottom Cable (OBC) acquisition.

Introdução

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de Migração Reversa no Tempo (RTM) para o imageamento sísmico considerando a propagação de ondas elásticas, ou seja, o modelo matemático empregado na simulação do problema é capaz de descrever a propagação de ondas compressoriais e cisalhantes, bem como a interação e a conversão entre elas.

São apresentados novos tipos de condições de imagem para os diferentes modos de ondas presentes no dado sísmico (registrado de forma convencional ou não). Destacando-se, também, o desenvolvimento de novos tipos de condições de imagem considerando a composição do diádico de tensões do campo de ondas depropagado durante o processo de migração.

Ressalta-se que os desenvolvimentos apresentados podem ser prontamente aplicados a dados sísmicos *offshore* adquiridos de forma convencional (utilizando *streamers*). Torna-se possível, mesmo para estes casos, a obtenção de imagens em profundidade relacionadas aos modos de ondas cisalhantes (Bulcão, 2001).

Para a validação da metodologia são apresentados resultados provenientes de um levantamento sísmico sintético 2D sob o modelo de velocidades proposto pela SEG/EAGE contendo um domo salino (Aminzadeh et al., 1996).

Metodologia

A Migração Reversa no tempo (RTM) é um esquema de migração em profundidade em que os dados sísmicos registrados são depropagados no sentido inverso do eixo temporal. Durante este processo aplica-se a denominada condição de imagem para formar a imagem da seção

sísmica em profundidade com os refletores corretamente posicionados.

Na migração reversa no tempo os principais fatores que influenciam no correto posicionamento dos refletores são:

- 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 foram registrados;
- 4) a aplicação de uma condição de imagem apropriada.

Tradicionalmente nas análises realizadas na Geofísica empregam-se operadores acústicos, que são uma simplificação da Equação da Onda Elástica onde se considera apenas a propagação de ondas compressoriais (*P-wave*). Esta simplificação, apesar de largamente empregada, faz com que o modelo matemático utilizado para descrever o fenômeno físico não contemple a propagação de ondas cisalhantes (*S-wave*), e acima de tudo não considera a conversão dos diferentes modos de ondas (como, por exemplo, a conversão de ondas *P* em *S*, e vice-versa).

No esquema de Migração Reversa no Tempo empregando-se operadores elásticos o modelo matemático adotado contempla a existência e a interação de ondas compressoriais e cisalhantes. Deste modo, espera-se que com o emprego de condições de imagens adequadas consiga-se gerar imagens em profundidade de estruturas complexas com uma melhor resolução do que as obtidas considerando-se um modelo matemático que contemple apenas a presença de ondas compressoriais (modelos acústicos).

No presente trabalho, empregando operadores elásticos durante as fases de propagação e depropagação, utiliza-se o Método das Diferenças Finitas com o esquema originalmente proposto por Virieux (1986) e, posteriormente, modificado por Levander (1988). Tal esquema possui uma importante característica, que é a capacidade de simular a presença de um meio contendo a velocidade da onda cisalhante nula ($V_s=0$), desta forma simulando o acoplamento entre meios acústicos ($V_s=0$) e elásticos ($V_s \neq 0$).

Esta capacidade de simular o acoplamento entre meios acústicos e elásticos é de extrema importância para a indústria petrolífera, pois existem inúmeros reservatórios de óleo e gás onde se tem a presença de uma lâmina de água antes de se atingir as camadas em sub-superfície.

Tais modelos geológicos são de importância estratégica para a indústria petrolífera nacional, pois nestes casos concentra-se atualmente grande parte dos reservatórios de óleo em produção, assim como outros já detectados.

Condições de Imagem

A condição de imagem, baseada em princípios holográficos (Bording et al., 1997), 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 (campo ascendente) e do campo de ondas depropagado (campo descendente) prescrevendo-se o dado sísmico registrado nos respectivos receptores (geofones).

A coincidência entre os tempos de trânsito dos campos de ondas ascendentes e descendentes pode ser verificada para os diferentes tipos de ondas presentes no modelo matemático empregado para a propagação, ou seja, no caso do emprego de operadores elásticos pode-se verificar a coincidência para as ondas compressoriais, cisalhantes ou a composição de outras grandezas.

Neste artigo advoga-se que a verificação da coincidência entre outras grandezas, tais como: as componentes do diádico de tensões, as velocidades nas direções coordenadas, além de outras oriundas do diádico de tensões (Timoshenko et al, 1980) (como: a tensão cisalhante máxima, a tensão principal σ_1 e energia cinética máxima) podem vir a formar imagens em profundidade contendo informações adicionais que irão auxiliar na correta interpretação do processamento dos dados sísmicos.

Na RTM uma das possíveis condições de imagem é representada pela matriz do tempo de trânsito, sendo obtida segundo um determinado critério durante a fase de propagação do campo de ondas a partir da fonte sísmica.

Na grande maioria das análises emprega-se o critério da amplitude máxima para a formação da matriz de tempo de trânsito. 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: i e j referenciam o posicionamento no interior do modelo; t o tempo de propagação; $u(i,j,t)$ é a grandeza a qual a imagem em profundidade estará associada; $ref(i,j)$ é uma matriz contendo o valor da amplitude máxima e $T(i,j)$ é a matriz de tempo de trânsito.

Um novo critério é proposto para a formação das matrizes de tempo de trânsito - denominado amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (*first break*) – que como o próprio nome indica, objetiva-se registrar a máxima amplitude nas proximidades da primeira quebra. A grande vantagem deste novo critério é que as matrizes

de tempo de trânsito apresentam um comportamento mais suave (contínuo).

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

$$T_f = 2\sqrt{\pi}/f_c \tag{1}$$

Sendo T_f um intervalo de tempo relacionado a proximidade com a primeira quebra.

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.

Na Migração Reversa no Tempo empregando operadores elásticos para a obtenção das matrizes de tempo de trânsito, outras alternativas podem ser empregadas, além do uso do método das diferenças finitas associado ao modelo matemático elástico. Podem-se empregar, por exemplo, esquemas utilizando a equação Eikonal, Ray Tracing, etc...

Neste trabalho empregam-se modelos matemáticos acústicos relacionados aos modos de ondas compressoriais e cisalhantes para a obtenção de condições de imagens adicionais. Assim, considerando a velocidade de propagação relacionada a determinado modo de onda (P ou S) tem-se uma matriz de tempo de trânsito associada a este modo de onda obtida de forma alternativa.

Podem-se, também, obter imagens em profundidade para modos de ondas convertidas. Neste caso, considera-se, por exemplo, a matriz de tempo de trânsito associada ao modo de propagação de ondas compressoriais (P), mas para a formação da imagem em profundidade registram-se as ondas cisalhantes (S), ou seja, forma-se uma imagem (PS). Caso se registrassem as ondas compressoriais (P) ter-se-ia uma imagem (PP).

Resultados Numéricos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada no modelo de velocidades compressoriais (V_P) proposto pela SEG/EAGE (Aminzadeh et al., 1996) (seção A-A', vide figura 1). Destaca-se que se empregou uma única relação para o cálculo das velocidades das ondas cisalhantes (V_S), dada pela equação 1. Tal expressão é aplicada em todo o modelo de velocidades, com exceção da lamina de água onde $V_S=0$.

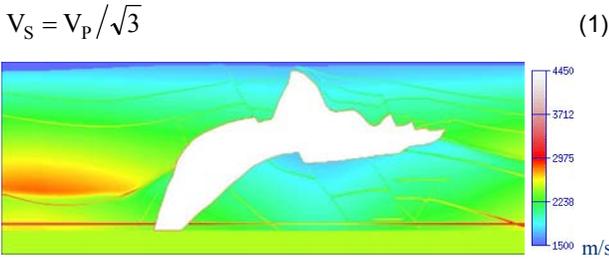


Figura 1 – Modelo de velocidades de ondas compressonais (V_p)

Nas simulações numéricas realizadas foram considerados dois valores distintos para as densidades dos materiais a fim de aumentar a refletividade da interface do leito oceânico. No caso da água empregou-se 1.0 gm/cm^3 e 2.1 gm/cm^3 para o restante do modelo.

Uma das características importantes a serem destacadas no modelo de velocidades originalmente proposto pela SEG/EAGE são as interfaces estratigráficas entre suas camadas. Uma vez que, excluídas tais interfaces o modelo de velocidades apresenta uma variação muito suave nos valores de impedância acústica, sendo que as únicas camadas que se encontram bem definidas pelo valor da impedância acústica são: a lâmina d’água e o domo salino.

Durante as fases de depropagação do campo de ondas registrado e na obtenção das matrizes de tempo de trânsito, para ambos os modelos matemáticos empregados (acústicos e elásticos), os modelos de vagarosidade (G) foram suavizados empregando uma média móvel ao longo das direções coordenadas. A equação 2 descreve o critério de suavização, sendo n o número de amostras (no presente trabalho empregou-se $n=9$).

$$\bar{G}(i) = \sum_{-n}^{+n} \frac{G(i)}{2n+1} \quad (2)$$

A modelagem da aquisição sísmica do tipo *OBC* foi realizada empregando-se operadores vetoriais com os seguintes parâmetros de aquisição: i) 200 m entre estações de receptores; ii) 20 m entre os pontos de tiro; iii) 6.0 s de tempo de registro.

Para ilustrar as diferenças e semelhanças decorrentes da adoção de um determinado modelo matemático em relação a outro, apresentam-se na figura 2 os sismogramas sintéticos – respectivamente – para modelos matemáticos acústicos e elásticos. De acordo com a figura observa-se que em ambos os casos têm-se registrados as reflexões das camadas em sub-superfície, tendo um grau maior de complexidade no caso elástico, pois estão presentes as ondas cisalhantes, bem como as conversões e interações entre os diferentes modos de ondas.

A seguir apresenta-se o conjunto de imagens em profundidade, após a composição da contribuição das 76 estações de receptores presentes no levantamento sísmico do tipo *OBC* (figuras 3 e 4). Sendo que na tabela

1 são apresentados os critérios que foram utilizados para a formação das matrizes de tempo de trânsito.

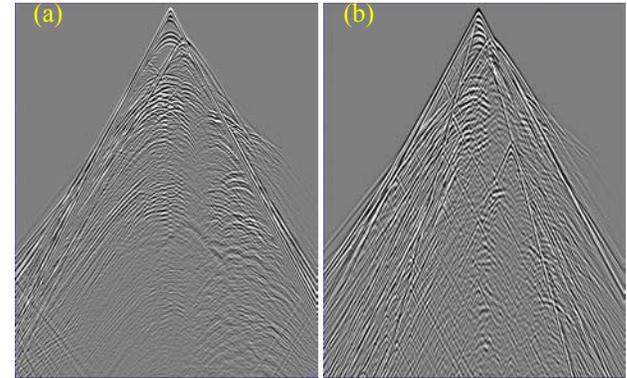


Figura 2 - Sismograma sintéticos considerando modelos matemáticos Acústico (a) e Elástico (b).

Tabela 1 – Definição dos critérios empregados na obtenção das matrizes de tempo de trânsito.

Matriz de Tempo de Trânsito	Amplitude Máxima	Amplitude Máxima nas proximidades da 1ª quebra
Op. AC – Onda P		X
Op. AC – Onda S		X
Op. EL – Onda P	X	
Op. EL – Onda S	X	
Op. EL – Tensões: $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$		X
Op. EL – Velocidades: V_x, V_y		X
Op. EL. – Energia Cinética	X	
Op. EL. – Tensão σ_1	X	
Op. EL – Tensão Cisalhante Máxima	X	

Legenda: Op. AC – Operador Acústico
Op. EL – Operador Elástico

Observando-se a figura 3 podem-se tecer os seguintes comentários:

- 1) Nas imagens associadas ao modo de onda P-P (figura 3a e 3e), vê-se que para regiões próximas a superfície do modelo à imagem 3e apresenta os refletores com mais definição, ao passo que os refletores abaixo do domo salino apresentam uma maior continuidade na imagem 3a.
- 2) De forma geral nas imagens associadas aos modos de propagação SS e SP, para ambos os tipos de modelos matemáticos (acústico e elástico) empregados na obtenção das matrizes de tempo de trânsito, consegue-se delimitar a fronteira do domo salino e para as demais interfaces tem-se uma baixa relação sinal/ruído.
- 3) Destaca-se que na figura 3d, relativa ao modo de onda S-P, pode-se observar o aparecimento de alguns refletores erroneamente posicionados que estão associados a energia da primeira múltipla. Existem alternativas para se aproveitar tal energia na formação de novas imagens em profundidade (Bulção, 2001).

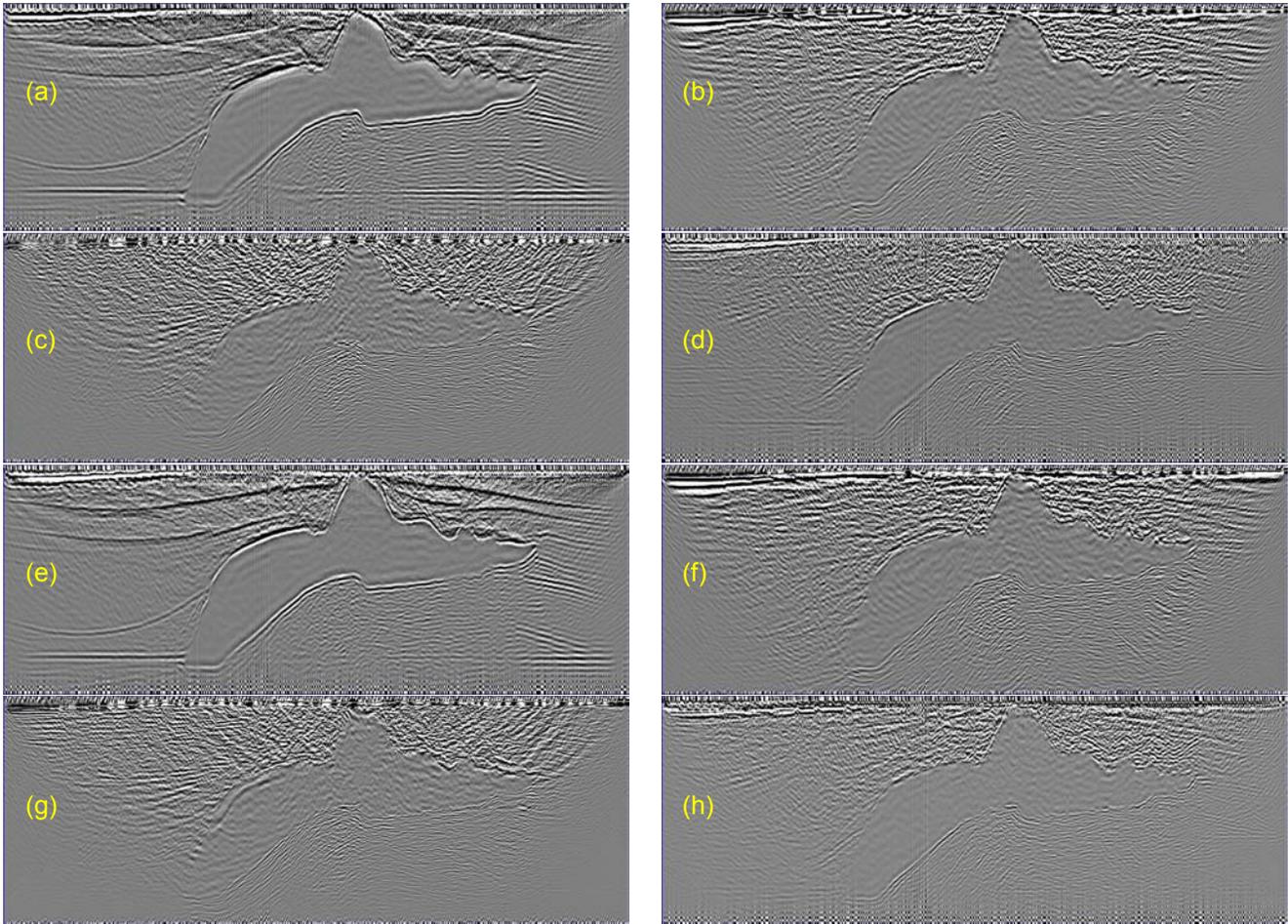


Figura 3 – Imagens em profundidade referentes aos seguintes modos de ondas e critérios de formação das matrizes de tempo de trânsito: (a) Op. AC – PP; (b) Op. AC – PS; (c) Op. AC – SS; (d) Op. AC – SP; (e) Op. EL – PP; (f) Op. EL – PS; (g) Op. EL – SS; (h) Op. EL – SP.

Na figura 4 apresentam-se imagens em profundidade associadas as seguintes variáveis: τ_{xx} ; τ_{xz} ; τ_{zz} ; V_x e V_z , além outras que estão associadas a algumas grandezas que não são comumente encontradas em trabalhos de geofísica, tais como: energia cinética; tensão σ_1 e tensão cisalhante máxima. Em tais imagens observa-se que:

- 1) A imagem em profundidade associada à energia cinética (figura 4a) nas regiões profundas possui uma boa relação sinal/ruído, ao contrário das regiões próximas a superfície. Provavelmente devido ao tipo de critério adotado para a formação da matriz de tempo de trânsito que geraram algumas descontinuidades nas regiões próximas a superfície.
- 2) No caso da tensão σ_1 a fronteira inferior do domo salino encontra-se bem delimitada e os refletores abaixo do domo salino apresentaram uma boa continuidade.
- 3) Na figura 4c, relacionada a tensão cisalhante máxima, (como previsto teoricamente), tem-se um maior conteúdo de frequências, pois os modos de ondas cisalhantes possuem comprimentos de ondas menores. Nas regiões próximas a superfície a relação sinal/ruído não proporciona a perfeita identificação de todas as

interfaces, mas a região do domo salino encontra-se bem delimitada e com uma certa riqueza de detalhes devido às altas frequências.

4) Nos demais casos apresentados na figura 4, de forma geral, têm-se uma boa qualidade das imagens em profundidade. Destacam-se a figura 3d e 3f, referentes – respectivamente – as componentes de tensões τ_{xz} e τ_{zz} ; além da figura 3h, referente à velocidade V_z , por apresentarem uma melhor definição na grande maioria dos refletores, principalmente os localizados em regiões profundas do modelo.

Na figura 5 apresenta-se a composição das imagens em profundidade referentes às 76 estações de receptores caso fosse realizado um processamento convencional, considerando apenas a propagação de ondas compressoriais (ou seja, adotando-se um modelo acústico em todo o processo de migração). Ressalta-se que os dados sísmicos utilizados, oriundos da modelagem do levantamento sísmico do tipo OBC foram simulados utilizando operadores elásticos, contendo desta forma informações das ondas cisalhantes e convertidas formadas durante a propagação do campo de ondas.

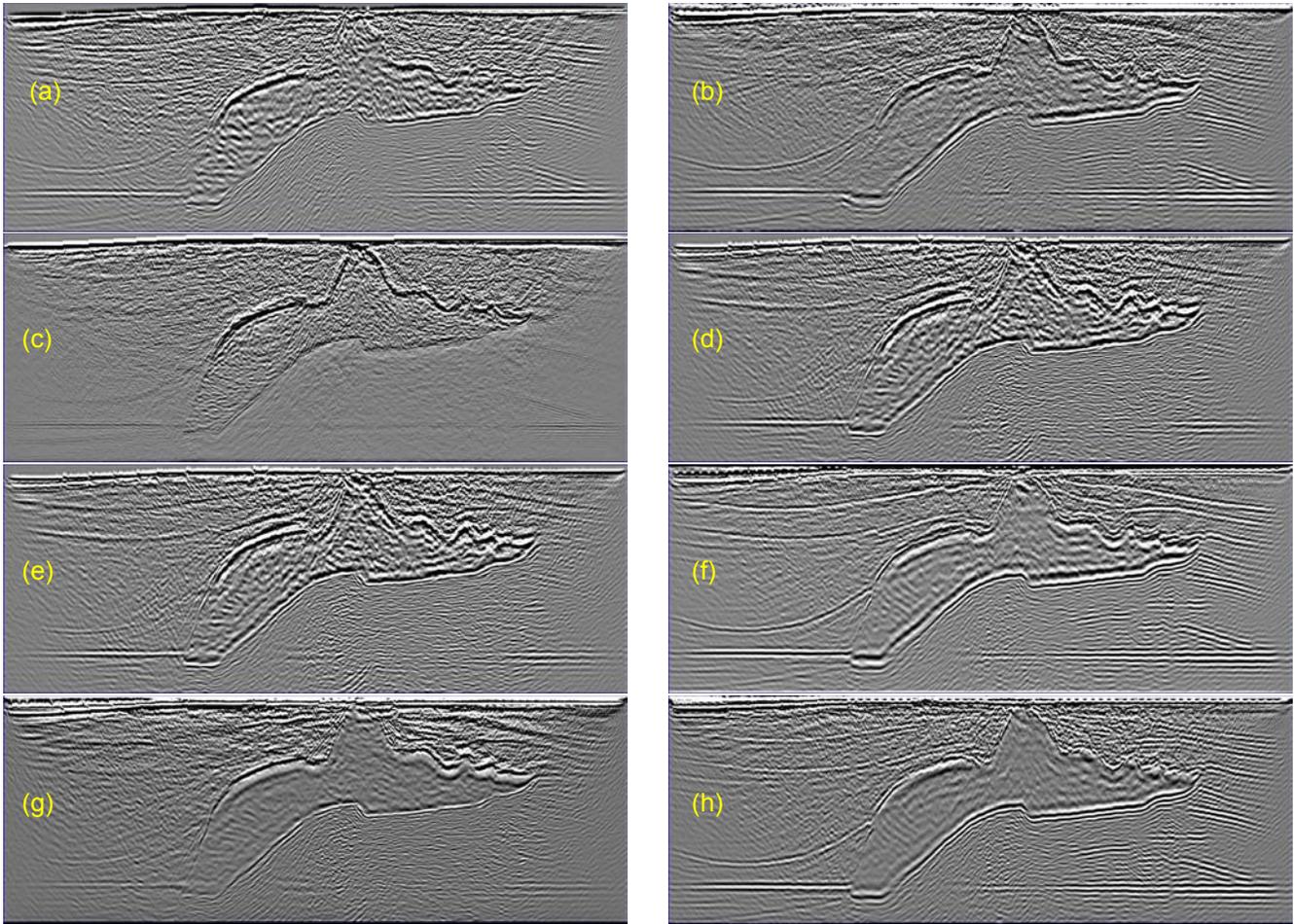


Figura 4 – Imagens em profundidade referentes aos seguintes modos de ondas e critérios de formação das matrizes de tempo de trânsito: (a) Op. EL – Energia Cinética; (b) Op. EL – σ_1 ; (c) Op. EL – tensão cisalhante máxima; (d) Op. EL – τ_{xz} ; (e) Op. EL – τ_{xx} ; (f) Op. EL – τ_{zz} ; (g) Op. EL – V_x ; (h) Op. EL – V_z .

Empregou-se o critério da amplitude máxima na etapa de formação da matriz de tempo de trânsito que está associada à imagem em profundidade da figura 5. Tal figura é apresentada com o intuito de qualificar o tipo de resposta que seria obtida em termos do correto posicionamento dos refletores no caso da aplicação do esquema de migração reversa no tempo com operadores acústicos.

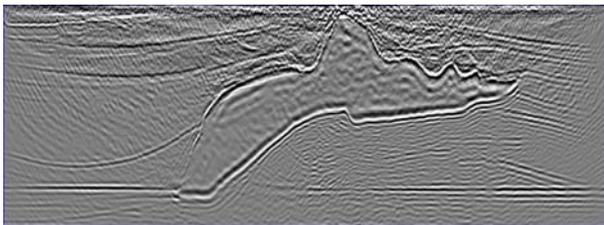


Figura 5 – Imagem em profundidade proveniente da composição do resultado das 76 estações de receptores considerando a migração reversa no tempo com um modelo matemático acústico durante todo o processo.

Conclusões

Apesar das interfaces estratigráficas presentes no modelo de velocidades proposto pela SEG/EAGE, as quais desfavorecem a formação de ondas convertidas, a metodologia proposta mostrou-se capaz de imagear refletores em sub-superfície utilizando ondas convertidas.

A adoção de operadores elásticos no processo de migração reversa no tempo proporciona a formação de um conjunto de imagens em profundidade, as quais – se corretamente interpretadas em função de suas características – podem fornecer informações valiosas aos profissionais encarregados da interpretação dos dados sísmicos.

Durante a composição das 76 imagens em profundidade para a formação de um único painel, no caso do uso da tensão cisalhante máxima, não houve a necessidade do emprego de medidas especiais devido à polaridade das ondas cisalhantes, pois esta grandeza obtida em função do diádico de tensões não apresenta tal característica.

Nos demais casos onde a polaridade das ondas cisalhantes deve ser levada em consideração durante a fase de composição das imagens referentes a cada

sismograma, como por exemplo das imagens *SS* e *SP*, adotou-se o sinal proveniente da matriz contendo o valor da amplitude máxima como forma de se corrigir a polaridade das diversas imagens em profundidade. Tal estratégia mostrou-se eficaz em fase a este grave problema.

Na migração reversa no tempo empregando operadores elásticos o emprego de outras grandezas para a formação de imagens em profundidade, além das tradicionalmente empregadas (relacionadas aos modos de ondas compressionais e cisalhantes), abre novos horizontes na busca de condições de imagens que proporcionem uma relação sinal/ruído após a composição dos diversos painéis.

A metodologia proposta para o imageamento empregando operadores elásticos durante o processo de migração reversa no tempo pode ser prontamente aplicada em outros tipos de levantamentos sísmicos, como por exemplo no caso da aquisição com *streamers*, pois apenas o registro das informações dos hidrofones é suficiente para a formação de imagens que levem em conta a conversão de energia entre os diversos modos de ondas.

Destaca-se que este esquema de migração pode ser associado com imenso sucesso, para a redução do tempo de execução, a estratégias de processamento paralelo (empregando o paradigma da divisão de tarefas) e sendo executado em *cluster* de computadores pessoais.

Referências

- Aminzadeh, F., Brac, J., Kunz, T.**, 1996, SEG/EAGE 3-D Modeling Series, no. 1, SEG – Society of Exploration Geophysicists.
- Bulcão, A.**, 2001, Migração Reversa no Tempo de Dados Sísmicos Empregando Operadores Vetoriais, Proposta de Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ.
- Bording, R.P., Lines, L.R.**, 1997, Seismic Modeling and Imaging with the Complete Wave Equation, Course Notes Series, n. 8, SEG – Society of Exploration Geophysicists.
- Virieux, J.**, 1986, P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, 51, p. 889-901.
- Levander, A.R.**, 1988, Fourth-Order Finit-Difference P-SV Seismogram, *Geophysics*, 53, p. 1425-1436.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N.**, 1980, Teoria da Elasticidade, Ed. Guanabara Dois, 3ª Edição, Rio de Janeiro.