



## Cabo de Fundo Oceânico (O.B.C.): Emprego de Múltiplas para o Imageamento de Estruturas Complexas em Sub-Superfície

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 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 the first ghost energy - traditionally treated as noise - to make a new depth image, using Reverse Time Migration (RTM). A new image condition is 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 para o imageamento de modelos geológicos *off-shore* contendo estruturas complexas em sub-superfície. Tal metodologia utiliza como informação adicional a energia proveniente das ondas múltiplas em um levantamento sísmico de cabo de fundo oceânico (OBC), que é convencionalmente tratada como ruído, para a formação de uma nova imagem em profundidade. Desta forma auxiliando o interprete na determinação do posicionamento correto dos refletores.

Na migração dos dados sísmicos empregou-se a Migração Reversa no Tempo (RTM) utilizando operadores acústicos. Um novo tipo de condição de imagem é apresentado para a formação da matriz de tempo de trânsito, além da tradicional condição de amplitude máxima (Bording et al., 1997).

Para validar a metodologia proposta 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). Destaca-se que a metodologia apresentada pode ser prontamente aplicada a outros tipos de levantamentos sísmicos, inclusive para casos 3D.

### 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-se a imagem da seção sísmica em profundidade. Os principais fatores que influenciam o 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 sísmicos foram registrados;
- 4) a aplicação de uma condição de imagem apropriada.

### 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 e do campo de ondas depropagado prescrevendo-se o dado sísmico registrado nos respectivos receptores (geofones).

Na RTM a condição 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:  $u(i,j,t)$  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.

No caso do critério da amplitude máxima 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.

No novo critério proposto para a formação das matrizes de tempo de trânsito - denominado amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (*first break*) - 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):

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

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.

Para obter-se uma condição de imagem que empregue a energia associada às ondas múltiplas, para a formação de imagens em profundidade, deve-se ter um critério capaz de registrar o tempo de trânsito associado a tais ondas.

Para levantamentos sísmicos com cabo de fundo oceânico (OBC) pode-se aplicar o princípio da reciprocidade, deste modo, para efeito das simulações numéricas, supõem-se que nas estações de receptores encontram-se as fontes sísmicas e que nas posições de tiros encontram-se os receptores.

Assim, após a aplicação do princípio da reciprocidade, para registrar os tempos de trânsito associados às ondas múltiplas provenientes da interface água-ar, pode-se adotar um esquema semelhante ao apresentado na figura 1, onde re-posiciona-se a fonte sísmica.

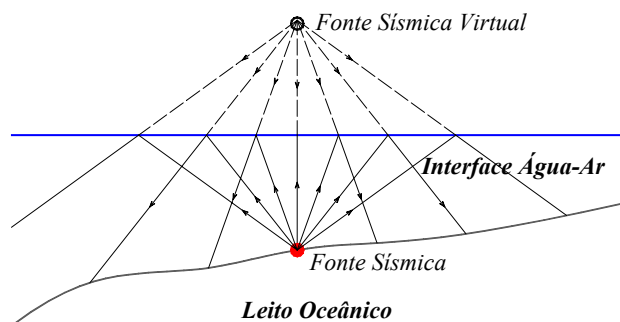


Figura 1 – Esquema para o registro da matriz de tempo de trânsito relacionada à primeira múltipla.

Conforme indicado na figura 1 estende-se a camada de água de modo a modelar o problema com a fonte sísmica

posicionada de forma a registrar o tempo de trânsito associado à primeira múltipla (indicado na figura pela fonte sísmica virtual). Após a propagação e o registro da matriz de tempo de trânsito, relacionada a este novo modelo de velocidades estendido, cortam-se as amostras da matriz de tempo de trânsito referentes à camada de água que foi estendida, obtendo-se uma matriz com as mesmas dimensões do modelo de velocidades original.

Ressalta-se que outros procedimentos podem ser empregados para a obtenção das matrizes de tempo de trânsito (Yilmaz, 2001), como por exemplo: a solução da equação Eikonal, *Ray Tracing*, etc. Sendo que no caso do *Ray Tracing* podem-se especificar as reflexões em determinadas interfaces, associando, desta forma, o tempo de trânsito à primeira múltipla ou a outro evento sísmico de interesse ao qual se deseje obter uma imagem em profundidade.

## Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada no modelo de velocidades proposto pela SEG/EAGE (Aminzadeh et al., 1996) (seção A-A', vide figura 2). Sendo uma das características importantes a serem destacadas deste modelo de velocidades são as interfaces estratigráficas entre suas camadas. Uma vez que, excluindo-se 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 são: a lâmina d'água e o domo salino.

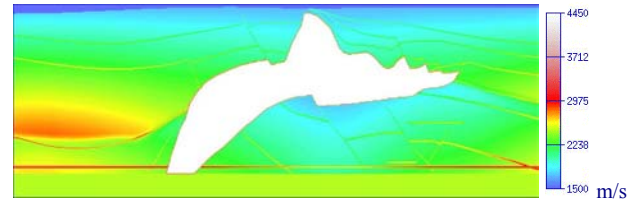


Figura 2 – Modelo de velocidades de ondas primárias (VP)

Destaca-se que nas simulações numéricas, ou seja nas modelagens e nas migrações, 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  $1.0 \text{ gm/cm}^3$  e  $2.1 \text{ gm/cm}^3$  para o restante do modelo.

Durante as fases de depropagação do campo de ondas registrado e na obtenção das matrizes de tempo de trânsito o modelo de vagarosidades (S) (definida como sendo o inverso da velocidade) foi suavizado 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  $n=9$ ).

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

A modelagem da aquisição sísmica do tipo OBC foi realizada empregando-se operadores acústicos com os

seguintes parâmetros de aquisição: i) 200 m entre estações de receptores; ii) 20 m entre *shot-points*; iii) 6.0 s tempo de registro.

A função matemática utilizada como fonte sísmica nas simulações numéricas realizadas é a derivada segunda da função Gaussiana (Bulção, 2001), tendo como uma frequência de corte ( $f_c$ ) 40 Hz.

Para a formação dos sismogramas sintéticos empregou-se o Princípio da Reciprocidade (Yilmaz, 2001), sendo apresentado na figura 3 os dados registrados por uma das 76 estações de receptores referentes à aquisição sísmica proposta.

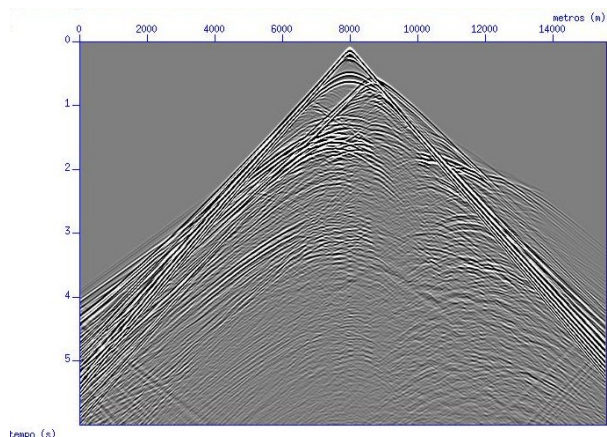


Figura 3 – Sismograma sintético oriundo da modelagem elástica para uma determinada estação de receptores

São ilustrados na figura 4, considerando-se a propagação da onda direta, os dois critérios propostos neste trabalho para registrar-se a matriz de tempo de trânsito: figura 4 (a) – amplitude máxima e figura 4 (b) – amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra. Em tais figuras empregou-se um esquema de cores no qual são ressaltadas as discontinuidades existentes.

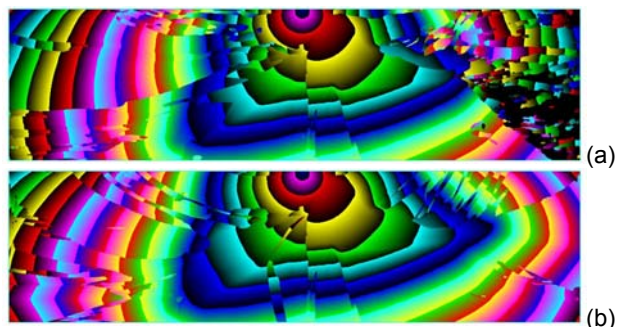


Figura 4 – Representação das matrizes de tempo de trânsito obtidas de acordo com os critérios: (a) amplitude máxima e (b) amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra.

Observa-se, vide figura 4, que no caso da adoção do critério da amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra a matriz de tempo de trânsito possui um número bem inferior de descontinuidades. Neste trabalho 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.

Com o intuito de melhor qualificar as diferenças existentes entre os tipos de condições de imagens, expressos em função dos critérios que foram avaliados durante a fase de propagação para a formação das matrizes de tempo de trânsito, são apresentados na figura 4 ilustrações do campo de ondas (*snapshot*) considerando-se 1.5 segundos (em escala de cinza) sobrepostos a “frente de propagação” obtida com o respectivo critério avaliado (representado nas figuras pela linha em vermelho).

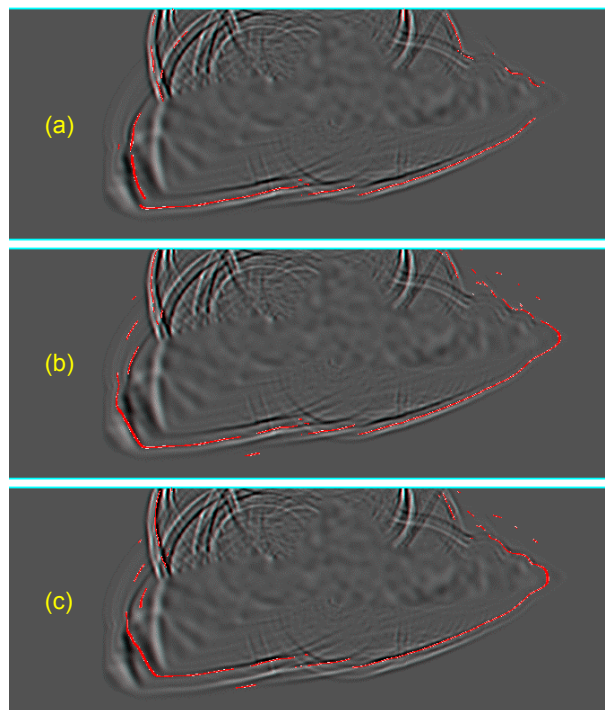


Figura 4 – Representação da frente onda (*snapshot*) sobrepostos aos diferentes tipos de condições de imagens, expressos através dos seguintes critérios:

- Amplitude máxima;
- Amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra;
- Amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, associada à energia da primeira múltipla.

A seguir na figura 5 são apresentadas às imagens em profundidade relativas aos diferentes tipos de condições de imagens. Tais figuras são o resultado da soma das respostas das 76 estações de receptores, sendo que em tais resultados foram aplicados filtros polinomiais em frequência (Cohen et al., 1998), cortando os baixos números de ondas presentes nas imagens iniciais, além da aplicação de um ganho para ressaltar as baixas amplitudes.

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

- Comparando-se as figuras 5 (a) e (b) – ambas associadas à energia da onda direta – referentes aos



critérios de amplitude máxima (fig. 5a) e amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra (fig. 5b), observa-se uma ligeira melhoria na relação sinal/ruído que é expressa principalmente em termos de uma melhor continuidade dos refletores na região abaixo do domo salino;

- 2) Considerando-se as figuras 5 (b) e (c), referentes ao critério proposta para a amplitude máxima nas

proximidades da primeira quebra – respectivamente – associadas à energia da onda direta e a energia da primeira múltipla, observa-se a mudança de fase na polaridade dos refletores. Este efeito é decorrente do imageamento com a energia da primeira múltipla.

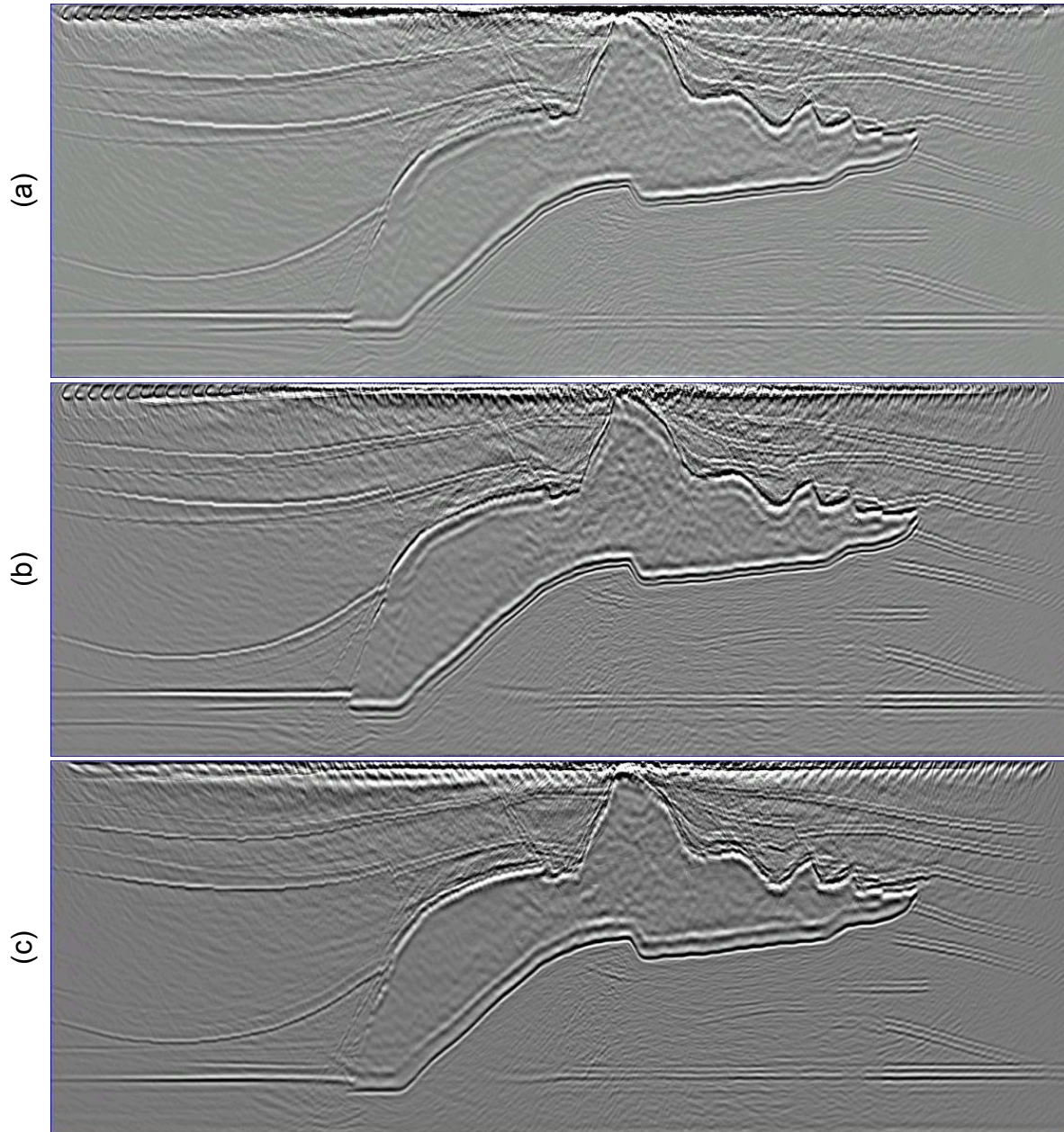


Figura 5 – Imagens em profundidade resultantes soma das respostas das 76 estações de receptores, relativas aos seguintes critérios: (a) Amplitude máxima associada à energia da onda direta; (b) Amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra associada à energia da onda direta; e (c) Amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, associada à energia da primeira múltipla.

- 3) O principal ponto a ser destacado nestas imagens em profundidades geradas a partir de critérios distintos é a coincidência dos refletores que estão

corretamente posicionados. Por exemplo, no caso da figura 5 (b) tem-se abaixo dos refletores um ruído oriundo da primeira múltipla (pois neste caso se está imageando com a onda direta) e no caso da figura 5

(c) tem-se acima dos refletores o ruído originário da onda direta (pois neste caso emprega-se a primeira múltipla para a formação da imagem), estando as corretas posições dos refletores inalteradas em todo o conjunto de imagens em profundidade.

De posse do conjunto de imagens em profundidade apresentadas na figura 5 os profissionais envolvidos na interpretação dos dados sísmicos terão a sua disposição um maior número de informações, de modo a compor tal conjunto em uma imagem final em profundidade contendo os refletores corretamente posicionados, nos quais houve coincidências em seu posicionamento no conjunto de imagens.

### Conclusões

Mostrou-se extremamente eficaz a metodologia proposta empregando a energia proveniente das ondas múltiplas para a formação de imagens adicionais em profundidade. Tais imagens podem ser interpretadas de forma conjunta e integrada com a imagem proveniente da onda direta, para a identificação do correto posicionamento dos refletores em sub-superfície.

A metodologia proposta para o imageamento empregando múltiplas pode ser prontamente utilizada em outros tipos de levantamentos sísmicos, além do caso apresentado com cabo de fundo oceânico. Para isto deve-se apenas utilizar um esquema ligeiramente modificado para o cálculo das matrizes de tempo de trânsito.

A consideração do novo critério apresentado de amplitude máxima nas proximidades da primeira quebra, para a formação das matrizes de tempo de trânsito, proporcionou uma melhoria no imageamento das estruturas abaixo do domo salino.

A Migração Reversa no Tempo mostrou-se capaz de imagear estruturas complexas em sub-superfície. Destacando-se que este esquema de migração foi aplicado associado a estratégias de processamento em paralelo (utilizando o paradigma da divisão de tarefas), de tal forma que o tempo computacional pôde ser reduzido substancialmente.

### Referências

- 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.
- Bulção, A.**, 2001, Migração Reversa no Tempo de Dados Sísmicos Empregando Operadores Vetoriais, Proposta de Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ.
- Aminzadeh, F., Brac, J., Kunz, T.**, 1996, SEG/EAGE 3-D Modeling Series, no. 1, SEG – Society of Exploration Geophysicists.
- Yilmaz, Ö.**, 2001, Seismic Data Analysis, SEG – Society of Exploration Geophysicists, Investigations in Geophysics n. 10.
- Cohen, J.K.; Stockwell, Jr.J.W.**; 1998; The New User's Manual; Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines.