

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

MODELAGEM NUMÉRICA DE DADOS SÍSMICOS MARINHOS SIMULANDO ARRANJOS DE FONTE DO TIPO CANHÕES DE AR (AIRGUNS)

Marcelo S. Silva¹, Marco A. B. Botelho², Saulo P. Oliveira³

¹ CPGG/UFBA, Salvador, Bahia, Brasil, mss@cpgg.ufba.br,

² botelho@cpgg.ufba.br, ³ saulopo@cpgg.ufba.br

Resumo – Realizamos a modelagem de dados sísmicos marinhos resolvendo a equação acústica da onda com o método de diferenças finitas (MDF). A simulação utiliza um campo de velocidade bidimensional que corresponde a um modelo da plataforma continental, na área do talude marinho, de um exemplo típico da costa atlântica brasileira. A técnica adotada usa operadores de quarta ordem no espaço e segunda ordem no tempo. O uso de malhas retangulares auxiliam na geração de dados menos ruidosos, porque podemos variar os incrementos espaciais em ambas direções x e z para controlar a estabilidade e dispersão numéricas. As funções fonte (wavelet) definidas pelas derivadas de ordem 1 e 2 da função Gaussiana são simples de implementar na geração de sismogramas sintéticos com o MDF. A assinatura da fonte airgun é mais apropriada para simular dados sísmicos marinhos, mas as reverberações devem ser tratadas para aproximar a fonte de fase mínima, de modo a obter uma resolução excelente para cada refletor. A simulação de campos de onda com MDF implica controlar o limite de estabilidade do método, qualquer que seja o campo de velocidade fornecido, tendo como variáveis de controle as dimensões da malha retangular, e também empregando taxas de amostragem compatíveis.

Palavras-Chave: modelagem sísmica; talude continental; airgun

Abstract – We model marine seismic data by solving the acoustic wave equation with the finite difference method (FDM). The simulation employs a synthetic bidimensional velocity field that represents a typical continental slope from the Brazilian Atlantic coast. The finite difference scheme is explicit, fourth-order accurate in space, and second-order accurate in time. The use of a rectangular grid allows one to decrease the noise in the solution, since we can vary the space increments in both x and z directions to control numerical stability and dispersion. The source (wavelet) functions defined by the first and second derivatives of the Gaussian function are simple to implement in the generation of synthetic seismograms by the FDM. The airgun signature source is more appropriate to simulate marine seismic data, but the reverberations on airgun signature must be treated to approximate a minimum phase wavelet, in order to give excellent resolution to each reflector. To properly simulate wavefields with FDM, one has to control the numerical stability limit through the space increments, and through the temporal sampling as well.

Keywords: Seismic modeling, continental slope, airgun

1. Introdução

As ferramentas geofísicas mais importantes para o estudo do fundo do oceano se baseiam na propagação das ondas acústicas. Os principais métodos de investigação do fundo e do sub-fundo marinho que utilizam a propagação de ondas acústicas são a sísmica, a sonografia e a batimetria. Estes sistemas de aquisição funcionam segundo o mesmo princípio: a emissão, transmissão e reflexão de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas.

Existem vários tipos de fontes sísmicas utilizadas na aquisição sísmica marinha, cada um emitindo um sinal dentro de um determinado espectro de frequência e com uma assinatura característica conforme o tipo de aplicação desejada. Por isso cada tipo de fonte é utilizado para uma finalidade. De uma maneira geral, quanto mais alto for o espectro de frequência de uma fonte sísmica maior será a sua atenuação e, por conseguinte menor sua capacidade de penetração abaixo do fundo marinho.

Os canhões de ar (airguns) de grande volume emitem um sinal de baixa frequência, em torno de 60 Hz, e são usados para investigação geológica até profundidades da ordem de 4 a 5 quilômetros abaixo do fundo marinho. É utilizado principalmente pela indústria do petróleo em arranjos de vários canhões que são disparados para melhorar a forma do pulso acústico transmitido.

A modelagem numérica é vista como solução do problema direto na metodologia sísmica, participa na formulação da inversão sísmica não-linear, que requer uma teoria para a simulação de ondas sísmicas, sendo também útil nos processos de migração, podendo ser utilizada na interpretação sísmica de regiões com geologia complexa, assim como pode gerar dados para teste de algoritmos de processamento.

2. Metodologia

2.1. Equação Acústica da Onda

Consideramos meios acústicos na realização do estudo da influência que diferentes tipos de parametrizações do meio exercem na modelagem, pois características distintivas básicas devem ser investigadas, preliminarmente em modelos representativos de meios menos complicados. Além disso, espera-se que tais características se tornem cada vez mais acentuadas com o aumento do grau de complexidade do meio e, consequentemente do modelo que o representa.

A equação escalar da onda no caso bidimensional acústico é dada por:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (1)$$

onde $P = P(x, z, t)$ representa o deslocamento dos pontos do meio e $c = c(x, z)$ a velocidade de propagação da onda.

2.2. Método de Diferenças Finitas

Consideremos uma malha uniforme formada pelos pontos (x_i, z_j, t_n) . Utilizamos o método DF explícito de segunda ordem no tempo e quarta ordem no espaço, ou seja, as derivadas de solução $P(x_i, z_j, t_n) \approx P_{i,j}^n$ são aproximadas da seguinte forma:

$$(P_{xx})_{i,j}^n = \frac{1}{12\Delta x^2} [-P_{i-2,j}^n + 16P_{i-1,j}^n - 30P_{i,j}^n + 16P_{i+1,j}^n - P_{i+2,j}^n] \quad (2)$$

$$(P_{zz})_{i,j}^n = \frac{1}{12\Delta z^2} [-P_{i,j-2}^n + 16P_{i,j-1}^n - 30P_{i,j}^n + 16P_{i,j+1}^n - P_{i,j+2}^n] \quad (3)$$

e

$$(P_{tt})_{i,j}^n = \frac{1}{\Delta t^2} [P_{i,j}^{n-1} - 2P_{i,j}^n + P_{i,j}^{n+1}] \quad (4)$$

Em geral, quanto mais precisas as aproximações para as derivadas, mais pontos vizinhos são requeridos e, portanto mais dispendioso torna-se o cálculo. No entanto, não só a precisão tem de ser levada em consideração, devemos, também, considerar critérios de estabilidade que são importantes para garantir convergência, que é assegurada por determinada largura da malha espacial, assim como pelo intervalo temporal a ser usado.

2.3. Procedimento Recursivo do MDF

Substituindo em (1) as aproximações para as derivadas segundas representadas pelas equações (2), (3) e (4), obtemos a seguinte expressão recursiva necessária à implementação computacional do MDF aplicado a equação da onda:

$$P_{i,j}^{n+1} = \left(2 - \frac{5c^2\Delta t^2}{2\Delta x^2} - \frac{5c^2\Delta t^2}{2\Delta z^2} \right) P_{i,j}^n - P_{i,j}^{n-1} - \frac{c^2\Delta t^2}{12\Delta x^2} [-P_{i-2,j}^n - 16(P_{i-1,j}^n + P_{i+1,j}^n) + P_{i+2,j}^n] - \frac{c^2\Delta t^2}{12\Delta z^2} [-P_{i,j-2}^n - 16(P_{i,j-1}^n + P_{i,j+1}^n) + P_{i,j+2}^n]$$

2.4. Condição para Estabilidade e não Dispersão Numérica

No método MDF, o cálculo das derivadas envolvidas nas equações diferenciais são realizados segundo aproximações com maior ou menor precisão, o que gera erro no resultado numérico. No caso particular da equação da onda, este erro se apresenta sobre a forma de dispersão numérica. Este problema geralmente se manifesta gerando oscilações intermitentes na forma temporal do pulso sísmico. Outro problema causado é a presença de ruído em um determinado ponto antes da chegada vertical do sinal.

O intervalo de amostragem temporal Δt deve satisfazer a seguinte relação de estabilidade:

$$\frac{v^2(x,t)\Delta t^2}{\Delta x^2} + \frac{v^2(x,t)\Delta t^2}{\Delta z^2} \leq \frac{3}{4}, \quad (5)$$

que é uma generalização para malhas retangulares da condição obtida por Lines et al (1999). No modelo de talude empregado (Figura 1), a velocidade máxima é 4100 m/s, $\Delta x = 12,5\text{m}$ e $\Delta z = 8\text{m}$. De (6), podemos utilizar $\Delta t = 1,4\text{ ms}$.

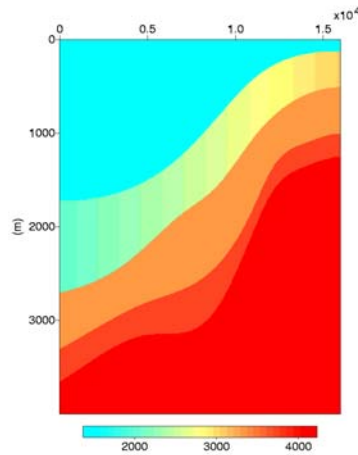


Figura 1: Modelo sintético da variação de velocidades na quebra do talude da plataforma continental brasileira.

2.5. Função Fonte

Um conceito muito discutido quando se fala em resolução vertical é o poder de resolução, P_a , do pulso sísmico. Fisicamente é uma medida de quanto um pulso de banda limitada tende a se aproximar de uma função impulso perfeita. A cada iteração o campo de velocidades de partícula a tempo avançado é atualizado a partir dos esforços calculados com base nos campos de velocidades e esforços da iteração anterior. Antes da atualização, o campo de esforços do tempo atual é acrescido do campo de esforços devido à uma fonte sísmica simulada, compressional, que se caracteriza por apresentar um ponto de inserção em (x_s, z_s) e uma função memória da fonte $F(t)$. Para este trabalho foram utilizadas como funções fonte os pulsos que possuem as formas da assinatura de um airgun (vide Seção 2.6) e da primeira derivada da função Gaussiana. A fonte Gaussiana é dada por:

$$F(t) = te^{-\alpha t^2}, \quad (6)$$

Sendo que α determina o intervalo entre a amplitude máxima e mínima da função. (Alford et al, 1974).

2.6. Modelo Teórico Aproximado da Assinatura de um Airgun

Para o caso ideal de uma bolha esférica em um volume infinito, com pressão hidrostática P_0 , o movimento da bolha aproximadamente torna-se:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{P}{\rho r} - \frac{3}{2r} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho v} \frac{dP}{dt}, \quad (7)$$

onde r é o raio da bolha em função do tempo, P é a pressão acústica da bolha ver equação (9), ρ é a densidade da água, e v é a velocidade acústica da água. A densidade ρ e a velocidade acústica v são considerados constantes nesta equação. A assinatura aproximada de um airgun mostrada na figura 2 é dada por:

$$F(t) = r \left(P + \frac{\rho u^2}{2} \right), \quad (8)$$

$$P = P_a - P_0, \quad (9)$$

onde P_0 é pressão hidrostática da água e P_a a pressão absoluta do ar dentro da bolha que é dada por:

$$P_a = P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3\gamma} \quad (10)$$

onde, r_0 é o raio de equilíbrio da bolha, e γ um parâmetro termodinâmico.

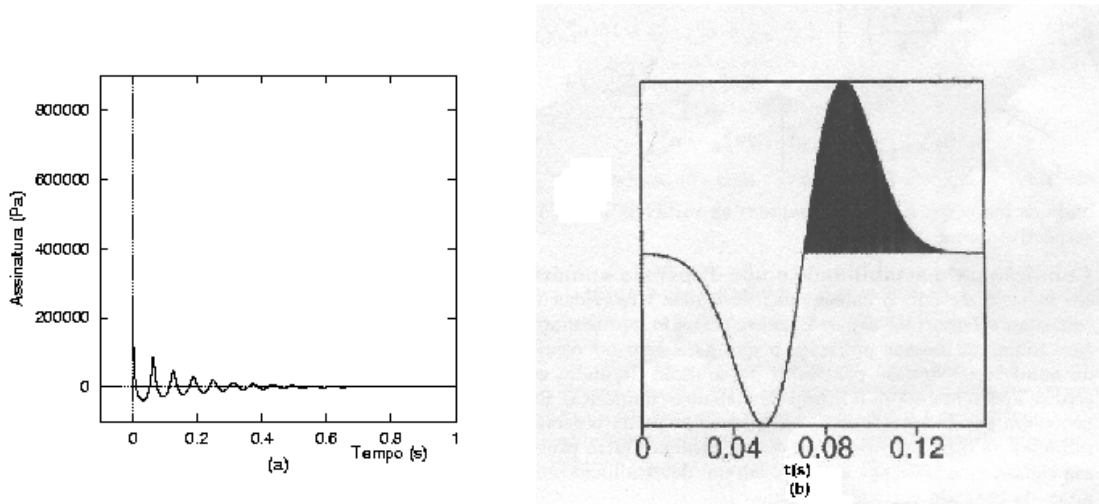


Figura 2: (a) Assinatura de um airgun de volume 1.0 dm^3 , com a pressão do ar igual a 13 MPa e pressão hidrostática correspondente a 6 m de profundidade em relação ao nível do mar e (b) Pulso com a forma da primeira derivada da função Gaussiana.

2.7. Arranjo de Airguns

Num primeiro experimento vamos colocar múltiplos airguns no modelo 2D usado. A separação entre as fontes será de somente uma (1) unidade de largura da malha adaptada na direção x , ou seja, $\Delta x = 12,5\text{m}$.

2.8. Reflexão nas Bordas

Qualquer aproximação de diferença finita, bem como qualquer outro método de solução numérica da equação da onda, enfrenta problemas com as bordas do modelo. Uma solução, no caso de fonte pontual e aproximação explícita, seria estender os limites do modelo, de modo que estas reflexões indesejadas não tenham tempo de estar presente no sismograma. Porém, este método é muito caro computacionalmente. Outra maneira de atacar este problema é tentar anular as reflexões impondo-se condições de contorno apropriadas nas referidas bordas, vide Cerjan et al (1985). O esquema aqui utilizado aplica, a cada iteração, uma diminuição gradativa das amplitudes em uma faixa nas proximidades de cada borda. Pontos a uma distância i da borda tem sua amplitude P_0 reduzida a P através de:

$$(P)_i = (P_0)_i R^N \quad (11)$$

onde N é o número de pontos da faixa, $R = 0,998$ e i é a distância em pontos até a borda do modelo.

3. Resultados

Apresentamos nas seguintes figuras o sismograma sintético e o instantâneo (snapshot) da propagação da onda acústica gerados sobre o modelo de talude empregando as funções fonte descritas nas seções 2.5-2.7. A duração da fonte correspondente à primeira derivada da função Gaussiana é de 28ms, enquanto a duração das fontes utilizando um canhão de ar ou um arranjo de canhões de ar é de 0,46s.

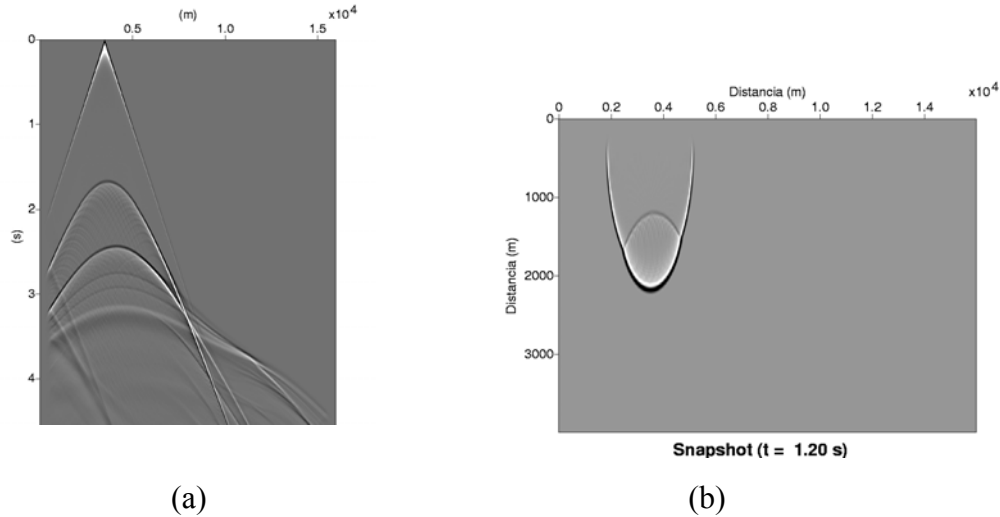


Figura 3: (a) Sismograma sintético gerado sobre o modelo do talude; (b) instantâneo (snapshot) da propagação da onda acústica em 1.2 s utilizando a primeira derivada da função Gaussiana.

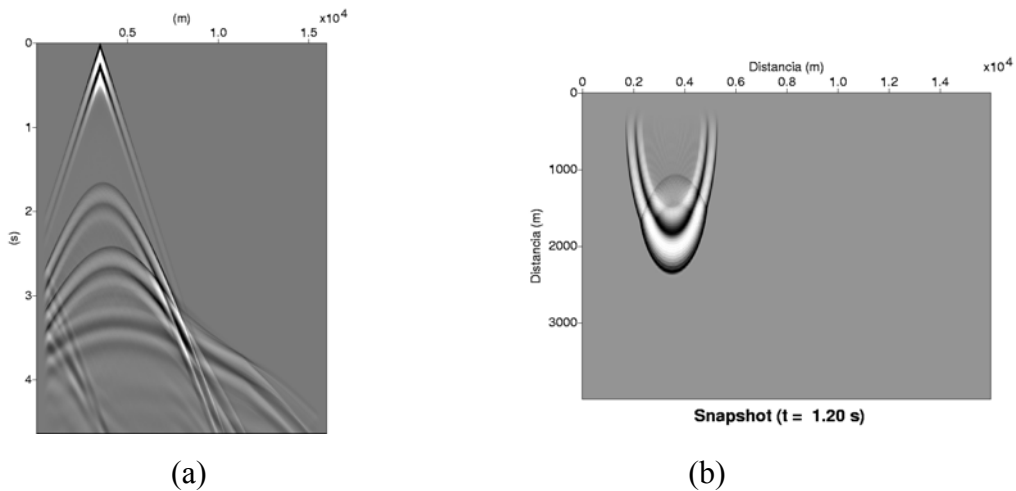


Figura 4: (a) Sismograma sintético gerado sobre o modelo do talude; (b) instantâneo (snapshot) da propagação da onda acústica em 1.2 s utilizando a assinatura de um canhão de ar (airgun).

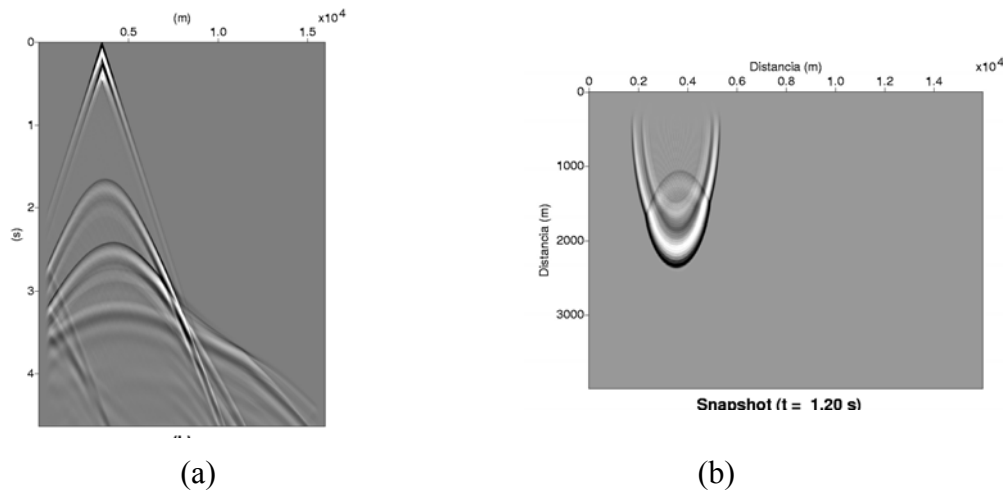


Figura 5: (a) Sismograma sintético gerado sobre o modelo do talude; (b) instantâneo (snapshot) da propagação da onda acústica em 1.2 s utilizando um arranjo de cinco canhões de ar (airguns).

4. Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo gerar dados sísmicos marinhos da maneira mais realística possível. Portanto, em vez de funções fontes bem comportadas como as derivadas de uma função Gaussiana, inserimos a assinatura de um canhão de ar comprimido (airgun). Conseguimos com sucesso realizar a propagação numérica da frente de onda, porém o caráter de vários ápices desta função fonte gera uma espécie de reverberação, que não tem nada a ver com a dispersão numérica das técnicas de diferenças finitas no caráter desta função fonte. Uma solução imediata foi simular um arranjo com cinco canhões de ar, com as mesmas características anteriores, o que melhora, em muito a relação sinal-ruído do sismograma gerado. Isto porque agora a amplitude do ápice inicial da função fonte aumentou em 5 vezes.

O desenvolvimento natural desta pesquisa será estudar arranjos de diferentes fontes airgun e técnicas de processamentos processamento, os quais minimizem os efeitos com aspecto de reverberação gerado por uma única função fonte airgun.

5. Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao CAPES pela bolsa de doutorado recebida; esta pesquisa contou com o apoio financeiro do convênio PGS-UFBA, da FAPEX e do projeto Rede 01/02 – Edital CTPETRO/CNPq-FINEP 03/2001.

6. Referências

- ALFORD, R. M., KELLY, K. R., BOORE, D. M. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation, *Geophysics*, v. 39, p. 834-842, 1974.
- BOTELHO, M. A. B., SANTOS, R. H. M., SILVA, M. S. Técnicas para simular a propagação e depropagação de ondas acústicas empregando operadores de diferenças finitas, *I Workshop da Rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório*, 2004.
- CERJAN, J., KOSLOFF, D., KOSLOFF, R., RESHEF. A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations, *Geophysics*, v. 50, p. 705-708, 1985.
- JOHNSON, D. T. Understanding air-gun bubble behavior, *Geophysics*, v. 59, p. 1729-1734, 1994.
- LINES, L. R., SLAWINSKI, R., BORDING, R. P. A recipe for stability of finite-difference wave-equation computations, *Geophysics*, v. 64, p. 967-969, 1999.