



## Estratégia para modelagem da resposta sísmica de reservatórios delgados

Sérgio Adriano M. Oliveira, Roseane Marchezi Misságia e Viatcheslav I. Priimenko. Laboratório de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense LENEPI/UENF

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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

**Thin bed reservoirs are very common in the Brazilians coast sedimentary basins and they are responsible for an expressive percentage of the oil production of this country. These reservoirs are in the limit or bellow the resolution power that is achieved by the seismic method, which makes interpretation for a correct characterization and oil reserves evaluation a difficult task. This work presents a seismic modeling strategy that is based on the finite-difference solution of the wave equation and is very appropriated for this kind of reservoirs. It also brings some solution to decrease the computational demand that is required when modeling, in a realistic scale is necessary. Trough a realistic example from Campos Basin, we demonstrate how an accurate seismic modeling may be useful to help in the interpretation of the seismic signature of such structures.**

### Introdução

A modelagem sísmica por solução da equação da onda, é uma poderosa ferramenta para simulação do campo de onda. Este método pode ser utilizado para elucidar questões acerca da resposta das estruturas com geologia complexa dando base para uma interpretação mais correta das mesmas. Um caso onde isto ocorre são os reservatórios delgados presentes nas bacias sedimentares Brasileiras, como especialmente a de Campos. Tais reservatórios estão no, ou mesmo abaixo, do limite de resolução atingido pela sísmica feita nesse referido local, onde a frequência máxima não costuma passar os 70 Hz, na profundidade em estudo. Isto faz com que a caracterização geofísica de tais estruturas se torne uma tarefa cheia de incertezas. Uma maneira de abordar este problema é usar a modelagem sísmica e a partir da análise da resposta sintética tentar determinar parâmetros que vão desde a melhor configuração de levantamento, fluxo de processamento e, na interpretação, quais atributos de traço seriam os mais indicados para tal caso. Obviamente, esta tarefa torna-se sem sentido caso não se parta de um modelo bastante realista e representativo da geologia da região e também a modelagem não seja feita com bastante precisão. Como tais reservatórios geralmente possuem falhas e ou acunhamentos com *pinchs* o método do raio talvez não

seja o mais indicado para esta tarefa, pois não pode simular o espalhamento de onda gerado por tais heterogeneidades.

Neste trabalho abordamos um exemplo de modelo de reservatório delgado, bastante representativo de um caso real da Bacia de Campos. Como resultados, foram obtidos sismogramas sintéticos com diferentes conteúdos de frequências. Procedendo-se desta maneira, a assinatura sísmica do reservatório pode ser analisada quando se muda a frequência de pico do pulso sísmico. Para modelagem utilizamos uma estratégia que permite minorar a demanda computacional requerida pelo método das diferenças finitas. Um dos pontos principais de tal estratégia consiste no uso de um esquema que suporte discretização com malha irregular. O outro é proceder com o registro do campo numa cota mais próxima do reservatório e após isto, fazer a continuação para cima, de fontes e receptores, por meio da integral de Kirchoff. Desta maneira pudemos evitar propagar o campo pela camada de água usando a Equação da onda. No caso estudado, esta idéia tornou-se fundamental para poupar tempo de computação, uma vez que a profundidade do oceano é muito alta no modelo considerado, e a água possui baixa velocidade e assim necessitar de malha com pequeno espaçamento para evitar a dispersão numérica. Estratégia semelhante para poupar tempo de computação é proposta por (Lecomte et al., 2004), só que aí o método do raio é usado para calcular o campo da superfície até uma determinada cota, e o método das diferenças finitas é então usado para propagar o campo na área alvo e o campo na superfície é obtido fazendo a continuação para cima apenas dos receptores. Neste trabalho também chamamos a atenção para outros detalhes que devem ser levados em conta quando se faz modelagem tendo-se em vista a respostas de reservatórios delgados.

### Metodologia de modelagem

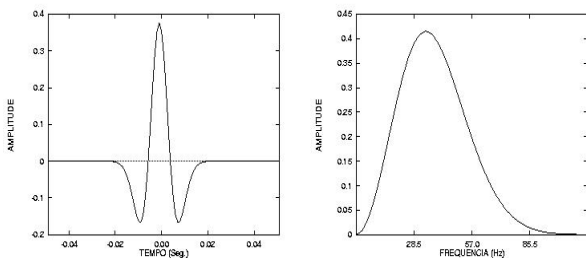
A modelagem por diferenças finitas da resposta sísmica de modelos que contenham detalhes estruturais tais como reservatórios delgados, constitui um desafio. A representação de tais estruturas exige uma malha refinada, o que aumenta o custo computacional e acaba trazendo sérias dificuldades no caso de modelos em escala real, onde o reservatório encontra-se a grandes profundidades. Para fazer frente a esta demanda, optamos por usar um esquema especial de diferenças finitas para solução da equação acústica da onda. Tal esquema permite modelar em uma malha retangular irregular, desta maneira temos a flexibilidade de adensar na região do reservatório e usar um espaçamento maior nas outras regiões do modelo. Este procedimento permitiu uma grande economia de custo computacional, pois o número total de pontos da malha se reduziu a menos da metade. Para se ter uma idéia, na região do

reservatório foi usado um espaçamento vertical de 2 metros, enquanto que nas regiões com velocidades mais altas do modelo este chegou a 8 metros. Tal esquema é baseado em uma aproximação explícita onde são usados operadores de quarta ordem para as derivadas espaciais (Oliveira, 2003). Neste ponto devemos chamar atenção para certos cuidados que devem ser tomados quando se faz modelagem para aferir a resposta de reservatórios delgados. A dispersão numérica é um problema crítico. Para mantê-la sob controle, o que é difícil quando a onda percorre grandes distâncias, procuramos sempre usar não menos que seis pontos por comprimento de onda mínimo ao longo de todas as regiões da malha. Observe que para modelagem cujo objetivo seja estudar as estruturas maiores e dominantes, normalmente são usados não mais de cinco pontos por comprimento de onda mínimo.

Outro parâmetro fundamental para a modelagem é a *wavelet* a ser utilizada. Pulsos de fase zero são preferíveis para interpretação dos resultados e neste trabalho optamos por usar como função fonte o pulso definido pela segunda derivada da função Gaussiana:

$$f(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] e^{-\pi f_p t^2}, \quad (1)$$

onde  $f_p$  é a frequência de pico. A máxima frequência presente em tal pulso pode ser estimada como  $2.5f_p$  (ver Figura 1).

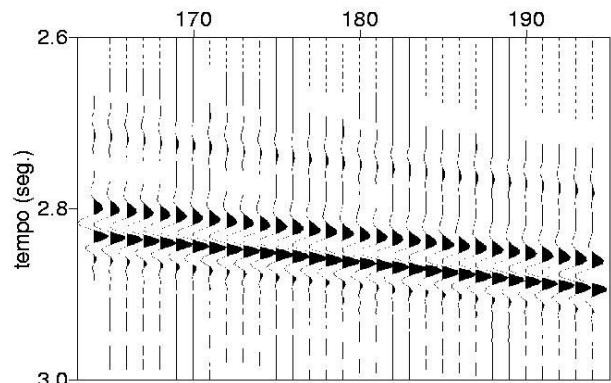


**Figura 1** – Exemplo de pulso com a forma da segunda derivada da função Gaussiana e seu espectro de amplitude .

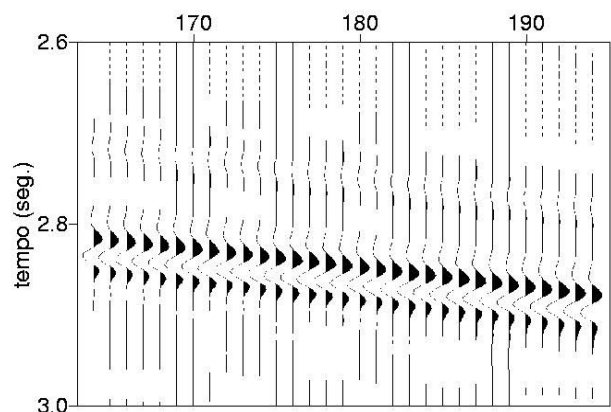
Dois efeitos podem vir a distorcer a característica de fase zero deste pulso durante a modelagem. Um deles, como já mencionado, é a dispersão numérica. O outro é devido a modelagem ser 2-D, pois neste caso a onda é gerada por uma fonte em linha. O pulso propagado por uma fonte em linha não terá a mesma forma da *wavelet* usada como função fonte. Este efeito pode ser corrigido facilmente aplicando-se um filtro de meia derivada na função fonte antes de propaga-la (Oliveira e Mufti, 1997). Contudo, é difícil manter um controle estrito sobre a forma do pulso, pois a dispersão numérica pode ser posta sob controle, mais não eliminada.

As condições de contorno usadas ao longo das bordas do modelo podem afetar bastante os resultados finais. Uma maneira pela qual isto ocorre, é pela geração de reflexões numéricas ao longo destas bordas. Tais ondas

devem ser evitadas a todo custo, caso contrário acabam se sobressaindo em relação ao sinal de interesse. O procedimento aqui adotado consistiu da aplicação de condições não irradiantes conjugadas com paredes absorvedoras que atenuam apenas os sinais que retornam das bordas. Outra questão é definir qual condição de contorno usar na borda superior. Como esta é uma modelagem acústica, para simular um levantamento marinho, a condição de campo de pressão zero (superfície livre) seria a mais realista. No entanto, tal condição dá origem ao fenômeno do *ghost* (tanto da fonte como do receptor). Este efeito então deveria ser retirado durante o processamento, pois influencia muito a forma de onda registrada. Para evitar este trabalho extra, decidimos eliminar o *ghost* impondo uma borda absorvedora também acima das fontes e receptores. Este procedimento também elimina as múltiplas de superfície livre, facilitando ainda mais a interpretação dos resultados. Nas Figuras 2 e 3 são exibidos trechos de sismogramas que foram obtidos com e sem a superfície livre.



**Figura 2** – Detalhe da reflexão em uma interface obtido com a presença da superfície livre. Observe que o efeito do *ghost* deixa este evento cheio de picos e vales.



**Figura 3** – Sismograma obtido sem a presença da superfície livre, detalhe da mesma reflexão da figura 2.

### Construção do modelo do reservatório

A primeira etapa para a construção do modelo em estudo constou da análise e seleção de horizontes alvos em uma seção sísmica 2D migrada em tempo. Também usamos informações provenientes dos perfis de poço sônico e de densidade, localizados próximos à linha 2D, para auxiliar na identificação dos horizontes a serem selecionados. A próxima etapa consistiu na conversão de tempo para profundidade dos horizontes selecionados, e na geração do modelo 2D em profundidade. Após isso, esses horizontes foram importados em um pacote de modelagem comercial para construção do modelo.

A estimativa das propriedades das camadas foram definidas tomando como base os valores de profundidade e tempo (z,t) para cada ponto dos horizontes selecionados. Assim, definimos  $V_p$  média e desta, usando a fórmula de Dix,  $V_p$  intervalar para cada camada. A densidade, exceto no reservatório, foi calculada baseada na relação empírica de Gardner:

$$\rho = 0.31 * V_p^{1/4}, \quad (2)$$

conforme a Tabela 1. O modelo, a partir do fundo do mar, consiste basicamente de algumas camadas de folhelho com diferentes propriedades, intercaladas por um reservatório arenito delgado, conforme Figura 4. A espessura deste reservatório varia entre 10 e 20 metros, o que é coerente com medidas obtidas a partir dos dados de poços. O detalhe do reservatório pode ser visto na figura (6).

### Resultados

Levantamentos sísmicos completos foram simulados usando-se os seguintes parâmetros de aquisição, compatíveis com levantamentos reais voltados para reservatórios: Número de geofones por tiro: 248, espaçamento entre geofones: 12 metros, espaçamento entre tiros: 24 metros, número de tiros: 200, afastamento máximo: 2964 metros (decidimos também incluir o afastamento zero no dado modelado). Como na área em estudo, a frequência máxima presente no sinal varia entre 50 e 80 Hertz, foram obtidos três resultados; um com frequência máxima de 62.5 Hz ( $f_p=25$  Hz), outro com freq. max. de 75 Hz ( $f_p=30$ Hz) e por último, foi considerada uma resposta de alta resolução com freq. max. de 87.5 Hz ( $f_p=35$ Hz). As seções de afastamento zero correspondentes são exibidas nas figuras (5), (6) e (7). A reflexão no topo da camada de folhelho, no qual o reservatório está inserido, aparece como um forte evento devido ao alto contraste de impedância. Fazendo uma análise preliminar dos resultados nota-se, como era de se esperar, que não é possível separar nitidamente topo do reservatório com o topo do folhelho, nem topo e base do reservatório, já que a espessura deste não ultrapassa  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda dominante. No entanto a presença do mesmo se torna evidente pelo padrão de interferência do sinal que se nota a partir  $x=2250$  metros. A variação da amplitude da reflexão também se torna muito forte devido à presença do reservatório, com um notável *bright spot* na região do acunhamento, seguido

por um declínio na amplitude e posterior aumento que volta a ocorrer em torno de  $x=4400$ m, em um aparente efeito de *tuning*. Tal efeito parece estar realmente associado com a variação de espessura do reservatório, pois a distância topo folhelho-reservatório é praticamente constante. É interessante notar que estes *bright spots* ficam mais concentrados nestas regiões na medida que a frequência sobe. É possível notar a difração ocorrida no *pinch*, embora esta não seja muito forte. Várias outras fracas difrações são visíveis na base do reservatório, mas isto é devido ao efeito escada da discretização por malha retangular e é natural que ocorra quando se usa o método das diferenças finitas.

### Conclusões

Neste trabalho ressaltamos os cuidados que devem ser tomadas em uma modelagem sísmica por solução numérica da equação da onda, cujo objetivo seja a resposta de reservatórios delgados. É aconselhável que neste caso, a malha deva ter um espaçamento menor do que uma malha para modelagem estrutural. Uma grande economia de custo computacional pode ser conseguida usando-se malha com espaçamento irregular. Também para diminuir o custo da modelagem, o dado sintético pode ser obtido sem a necessidade de incluir a camada de água. O efeito desta pode ser incluído através da continuação para cima de fontes e receptores através da integral de Kirchhoff, que é uma técnica bem mais rápida e econômica do que as diferenças finitas. O exemplo em que nos baseamos e os resultados obtidos permitem afirmar que a modelagem sísmica por solução da equação da onda é a ferramenta ideal para dar base a interpretação de estruturas que contenham reservatórios que estejam no limite de resolução da sísmica. No caso estudado, ficou claro que um aumento de poucos Hertz no conteúdo de frequência do sinal é importante, principalmente no que se diz respeito à variação de amplitude devido ao efeito de *tuning*.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem à Petrobrás (Projeto número 6502094032) pelo apoio financeiro que viabilizou a pesquisa na qual este trabalho está inserido.

### Referências

- Lecomte, I., Gjøystdal, H., Drottning, A., Maaø, F., Jhoansen, T. A., Bakke, R., 2004. Efficient and flexible seismic modeling of reservoirs: A hybrid approach. The Leading Edge, 23, 432-437.
- Oliveira, S. A. M., 2003. A fourth-order finite-difference method for the acoustic wave equation on irregular grids. Geophysics, v. 68, p. 672-676.
- Oliveira, S. A. M. e Mufti, I. R., 1997. A influência da fonte em linha na resposta da modelagem sísmica. Resumo expandido, v. 1 p. 127-129, São Paulo, SBGF.

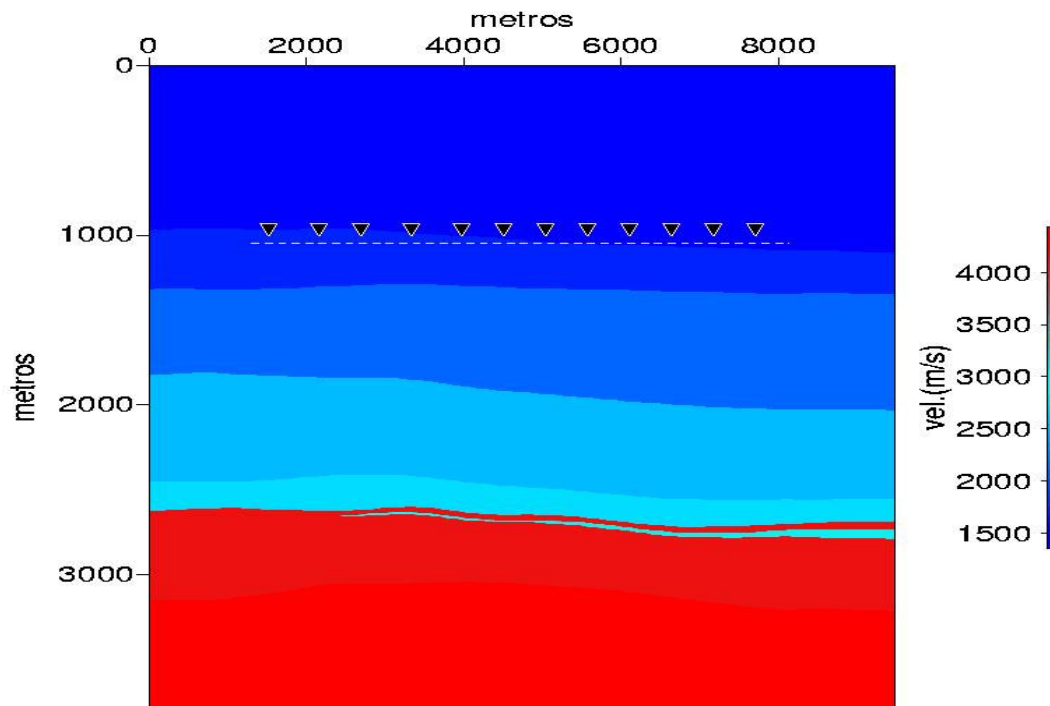


Figura 4 – Modelo contendo reservatório delgado

Horizonte	Prof. (m)	Tempo (ms)	Vp_media (m/s)	Vp_interv. (m/s)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )
Fundo	1078.35	1442.24	1495.38	1495.38	1.00
Horiz.1	1384.28	1792.34	1544.66	1732.95	1.99
Horiz.2	2032.96	2404.95	1690.65	2059.17	2.08
M.verm	2614.00	2849.70	1834.58	2471.72	2.18
M. azul	2797.99	2977.98	1879.12	2684.20	2.23
Topo reserv.	2798.75	3010.18	1859.53	2870.00	2.15
Base reserv.	2815.14			3050.00	2.19
Cretác.	3556.40	3260.13	2181.76	4210.87	2.49
Cretác.				4300.00	2.51

Tabela 1- Valores de  $V_p$  e densidade

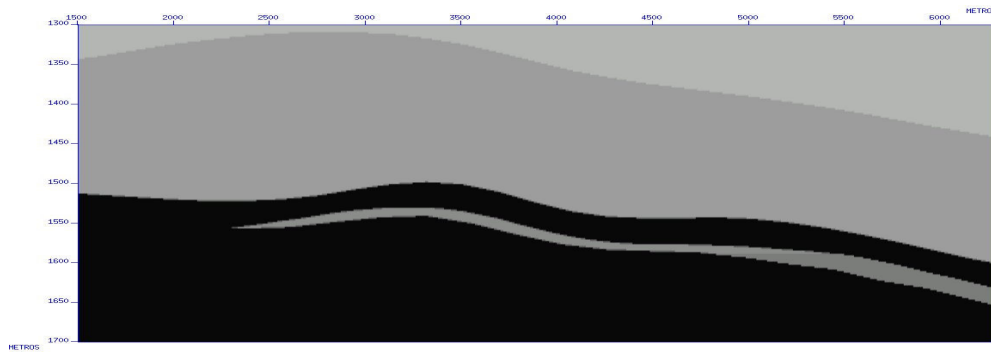


Figura 6 – Detalhe do reservatório delgado

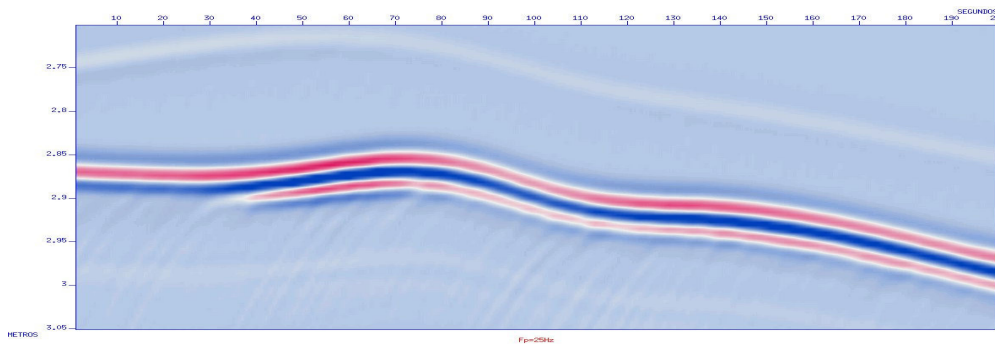


Figura 5 – Seção de afastamento nulo para  $F_p=25$  Hz

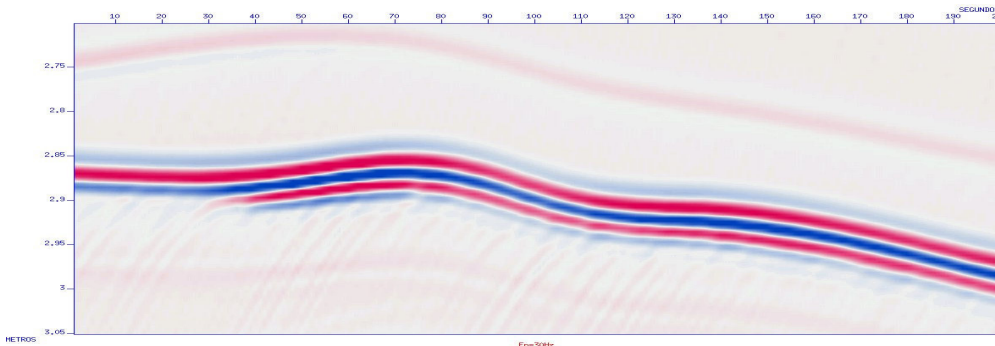


Figura 6 – Seção de afastamento nulo para  $F_p=30$  Hz

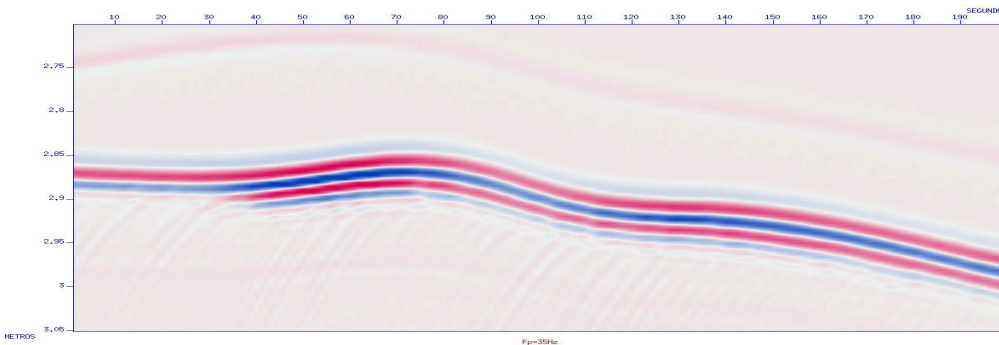


Figura 7 – Seção de afastamento nulo para  $F_p=35$  Hz