



Modelagem Acústica e Elástica para a Bacia do Solimões

Francisco de Assis Silva Neto, CPGF/UFGA, Jessé Carvalho Costa, DGF/UFGA, Jaime Eiras, PETROGEO, Ellen Gomes, DGF/UFGA

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

Seismic modeling of paleozoic basins in the Amazon has its challenges for numerical simulation and interpretation. The low velocity layer, associated with the weathering zone, needs a more accurate rheological model; strong velocity contrasts at the Cretaceous-Paleozoic unconformity; highly fractured diabase layers, and reservoir rocks with thickness below seismic waves resolution. We present the results of acoustic and elastic wave propagation simulation in models with some of these features. Long period multiples between the free surface and Cretaceous-Paleozoic unconformity are marked features in the acoustic modeling. Strong P-S conversions and surface waves are main features in the elastic modeling. Surface waves present a special problem for numerical modeling due its dispersive nature which requires fine meshing. Besides, absorbing boundary of PML type do not have good performance for surface waves.

Introdução

Neste trabalho apresentamos a comparação entre a modelagem da propagação das ondas acústica e elástica, através de um modelo sintético baseado no modelo geológico da sub-bacia do Juruá (Lima, 2003; Eiras, 1998) pertencente à bacia paleozóica do Solimões.

A modelagem numérica foi efetuada através programas implementados a partir do método de diferenças finitas em 2-D. Os campos de velocidade e pressão são calculados para o caso acústico e os campos de velocidade e tensão são determinados na modelagem elástica, utilizando diferenças finitas em malhas intercaladas (Levander, 1988). Os dois programas utilizam operadores de diferenças de alta ordem, condições de fronteira livre na superfície (Mittet, 2002) e camadas absorventes com casamento perfeito de impedância para minimizar os efeitos de borda (Chew e Liu, 1996). Na modelagem elástica a acuidade do algoritmo permite modelar ondas de superfície do tipo Rayleigh e ondas tipo Stoneley em interfaces com forte contraste de impedância. Seções de tiro comum foram computadas sobre a região de maior complexidade estrutural do modelo. Instantâneos dos campos de ondas foram utilizados para identificar os eventos que mais se destacam nas seções.

Nosso maior objetivo foi avaliar o efeito de ondas convertidas nas seções sísmicas. Entretanto o experimento numérico revelou outros eventos importantes e apontou algumas limitações no algoritmo de modelagem elástica. Entre estes se destacam:

A modelagem de ondas de superfície indicou que as fronteiras absorventes do tipo PML não apresentam um bom desempenho na atenuação destes eventos;

A presença de ondas de superfície e reverberações como um possível mecanismo de atenuação efetiva em torno da região do reservatório;

Fortes conversões P-S são evidentes na discordância Cretáceo-Paleozóico e na região com redução de velocidade em torno da região do reservatório.

Estes resultados preliminares apontam a necessidade de informações de poço e testemunhos para uma escolha mais criteriosa da reologia a ser utilizada na modelagem. Particularmente a zona de baixa velocidade e efeitos devido ao fraturamento de soleiras precisam ser mais estudadas para se determinar a importância e limitações da modelagem acústica neste ambiente.

Metodologia

A implementação da modelagem acústica e elástica foi efetuada em malhas intercaladas de modo a permitir modelar todo o campo de ondas. Os algoritmos permitem modelar variações de densidade, velocidade P e velocidade S. A implementação foi feita em FORTRAN90 usando o paradigma de orientação por objetos (Karrenbach, 1995). Os programas de modelagem acústica e elástica compartilham a maior parte dos módulos, os quais podem ser estendidos para reologias mais complexas como modelos visco-elásticos e poroelásticos (Emmerich e Korn, 1987; Carcione et al., 1988; Carcione, 1993; Zeng et al., 2001). Adicionalmente os algoritmos podem ser imediatamente paralelizados por decomposição em domínio.

Modelagem acústica

A modelagem acústica foi efetuada resolvendo as equações de balanço de momento linear e a relação constitutiva para um meio acústico linear (Aki e Richards, 1980):

$$\begin{aligned} \partial_t v_j(\mathbf{x}, t) &= -\frac{1}{\rho(\mathbf{x})} \partial_j P(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{\rho(\mathbf{x})} f_j(\mathbf{x}, t), \\ \partial_t P(\mathbf{x}, t) &= -\rho(\mathbf{x}) c^2(\mathbf{x}) \partial_j v_j(\mathbf{x}, t) + q(\mathbf{x}, t), \quad (1) \\ j &= 1, 3 \quad ; \end{aligned}$$

em que $v_j(\mathbf{x}, t)$ representa a velocidade da partícula na posição \mathbf{x} e instante t , $P(\mathbf{x}, t)$ é o campo de pressão, $\rho(\mathbf{x})$ indica a densidade, $c(\mathbf{x})$ é a velocidade de propagação da onda P no meio, $f_j(\mathbf{x}, t)$ representa a densidade de forças dipolares e $q(\mathbf{x}, t)$ indica a densidade de fontes de injeção de volume.

A solução numérica deste sistema de equações por diferenças finitas com malhas intercaladas para os campos de velocidade e pressão (Levander, 1988), e utilizando esquemas de ordem arbitrária nas derivadas em relação às coordenadas espaciais e esquema de segunda ordem para as derivadas temporais, está discutida em (Silva Neto, 2004). Fronteiras absorventes do tipo PML (Chew e Liu, 1996) foram implementadas nas laterais e na base do modelo e a condição de fronteira livre foi implementada no topo utilizando o esquema proposto por Mittet (2002).

Modelagem elástica

A modelagem elástica de todo o campo elástico foi efetuada integrando as equações de balanço de momento linear e a relação constitutiva em meio elástico linear (Aki e Richards, 1980):

$$\begin{aligned} \partial_t v_j(\mathbf{x}, t) &= -\frac{1}{\rho(\mathbf{x})} \partial_j \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{\rho(\mathbf{x})} f_j(\mathbf{x}, t), \\ \partial_t \sigma_{ij}(\mathbf{x}, t) &= -\rho(\mathbf{x}) (c_p^2(\mathbf{x}) - 2c_s^2(\mathbf{x})) \partial_k v_k(\mathbf{x}, t) \delta_{ij} + (2) \\ &\rho(\mathbf{x}) c_s^2(\mathbf{x}) (\partial_j v_i - \partial_i v_j) + \rho(\mathbf{x}) c_p^2(\mathbf{x}) q(\mathbf{x}, t) \delta_{ij}, \\ i, j, k &= 1, 3 \quad ; \end{aligned}$$

em que $v_j(\mathbf{x}, t)$ representa a velocidade da partícula na posição \mathbf{x} e instante t , $\sigma_{ij}(\mathbf{x}, t)$ é o campo de tensão, $\rho(\mathbf{x}, t)$ indica a densidade, $c_p(\mathbf{x})$ é a velocidade de propagação das ondas P, e $c_s(\mathbf{x})$ é a velocidade de propagação das ondas S; $f_j(\mathbf{x}, t)$ representa a densidades de forças de volume e $q(\mathbf{x}, t)$ indica a densidade de fontes de injeção de volume. Este sistema de equações foi discretizado utilizando diferenças finitas com malha intercalada para os campos de velocidade e tensão (Levander, 1988). A implementação admite esquemas diferenças de ordem arbitrária na aproximação das derivadas espaciais e segunda ordem nas derivadas temporais.

A condição de estabilidade é a mesma para o esquema acústico apresentado em (Silva Neto, 2004). Fronteiras absorventes do tipo PML foram aplicadas na base e nas laterais da malha de discretização e a condição de fronteira livre foi aplicada ao topo da malha (Mittet, 2002).

Para avaliar a implementação da simulação elástica, calculamos o campo de ondas em um semi-espaco elástico homogêneo limitado por uma superfície livre. O meio tem densidade igual a 2000 kg/m³, velocidade das ondas P igual a 2000 m/s e velocidade das ondas S igual a 1200 m/s. O modelo foi amostrado em uma malha regular com espaçamento de 5 m entre os nós. Utilizamos uma fonte de injeção de volume pontal com pulso fonte Blackman-Harris de frequência dominante 15 Hz. Neste exemplo e nas simulações mostradas a seguir, as derivadas espaciais foram aproximadas por um operador de diferenças de ordem 12. A Figura 1 mostra um instantâneo da componente vertical do campo de velocidade, observa-se a onda P, a onda S convertida na superfície livre a onda de Rayleigh e a onda S* conectando a onda S e a onda de Rayleigh. Este exemplo ilustra a acuidade da implementação da superfície livre proposta por Mittet(2002), Para esquemas de diferenças finitas de alta ordem.

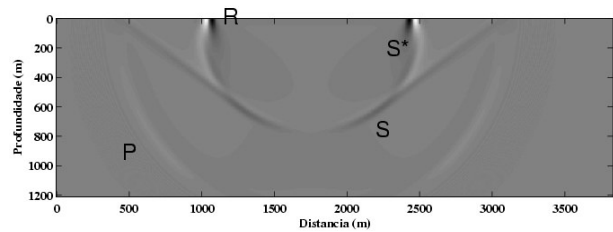


Figura 1: Verifica-se na figura a componente vertical da velocidade em um semi-espaco elástico e homogêneo. Os eventos em destaque são : (a) onda P; (b) onda S; (C) onda de Rayleigh – R; (d) onda S*.

A Figura 2 mostra a componente vertical da velocidade das partículas após o campo de ondas atingir as bordas da malha. Observa-se que as camadas absorventes do tipo PML atenuam adequadamente as ondas P e S, mas a onda de Rayleigh produz uma forte reflexão no canto superior esquerdo da Figura.

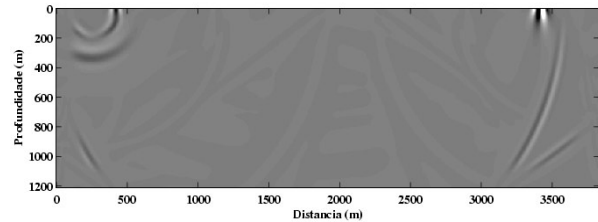


Figura 2: Componente vertical da velocidade em um semi-espaco elástico homogêneo, indicando que as fronteiras absorventes do tipo PML não atenuam apropriadamente ondas tipo Rayleigh, embora apresentem um bom desempenho atenuando as ondas P e S.

Aplicação ao modelo da bacia do Solimões

Para avaliar as limitações da modelagem acústica para a modelagem sísmica nas bacias paleozóicas na Amazônia utilizamos um modelo que apresenta algumas das feições estruturais presentes na sub-bacia do Juruá. Um forte contraste de velocidade representativo da discordância Cretáceo-Paleozóico, camadas de alta velocidade representativas de soleiras de diabásio e uma camada de baixa velocidade representando a rocha reservatório. A distribuição de densidade, velocidade de propagação das ondas P e S estão na Figura 3, respectivamente.

A malha de discretização do modelo é regular com espaçamento de 10 m entre os nós. Nas duas simulações utilizamos uma fonte de injeção de volume com o pulso fonte Blackman-Harris de frequência dominante 15 Hz. O tempo de simulação foi de 2,0 s e as seções sísmicas estão amostradas com 2 ms. Na modelagem elástica, para eliminar as ondas de superfície na camada com os receptores, modelamos esta camada como um meio fluido.

A Figura 4 mostra a componente vertical da velocidade das partículas após 1,0 s e 1,5 s de propagação. Destacam-se as fortes múltiplas de longo período produzidas entre a superfície livre e a discordância Cretáceo-Paleozóico. Esta região do modelo ainda retém grande parte da energia mesmo após 1,5 s. Outra característica do campo acústico é o grande comprimento de onda dos eventos abaixo da discordância Cretáceo-Paleozóico o qual é maior que a espessura da camada reservatório indicada na Figura 3.

A Figura 5 apresenta a componente vertical da velocidade das partículas após 1,0 s e 1,5 s de propagação. Destacam-se as fortes múltiplas de longo período produzidas entre a superfície livre e a discordância Cretáceo-Paleozóico, as reverberações são bem mais complexas que no caso acústico devido a dois eventos adicionais: as conversões entre ondas P e S e a presença de ondas de superfície na base da discordância e na interface sólido fluido. Outro evento marcante na Figura 5 são ondas transmitidas convertidas P-S, que aparecem após 1,0 s de propagação, as quais podem ser identificadas comparando-se com a figura correspondente na modelagem acústica na Figura 4. Um outro padrão de reverberação complexo produzido por ondas convertidas e ondas de superfície ocorre na região de menor velocidade em torno do reservatório, que não é observada no caso acústico. Esta energia se propaga lateralmente ao longo da camada e não retorna a superfície. Este fenômeno reduz a energia refletida para a superfície e funciona como um mecanismo de atenuação efetiva do campo de ondas.

A Figura 6 mostra os sismogramas com as componentes do campo de velocidade das partículas para modelagem acústica e elástica. Observa-se a presença as múltiplas de longo período comuns à modelagem elástica e a modelagem acústica. A modelagem elástica mostra ainda a presença de eventos com curva de afastamento linear após 1,0 s e para afastamentos maiores. Estes eventos estão associados às ondas que se propagam lateralmente entre a superfície livre e a discordância Cretáceo-Paleozóico.

A Figura 7 com o sismograma da componente horizontal também destaca a maior quantidade de eventos com curva de afastamento linear que ocorre no modelo elástico, para grandes afastamentos e acima de 1,0 s, observe que estes eventos possuem menor período inclinação um pouco maior que os eventos com curva de afastamento linear na Figura 6, pois se propagam com maior velocidade. A pouca energia nos receptores de menor afastamento a partir de 1,0 s se deve a pequena conversão de ondas P para S para ângulos de incidência pequenos. Adicionalmente observam-se eventos com curva de afastamento hiperbólica para afastamentos maiores provavelmente associados às ondas S convertidas.

Conclusões

Apesar das limitações do modelo apresentado, os resultados indicam a importância da modelagem elástica.

Entre as limitações mais importantes estão a falta de informação mais detalhada sobre os perfis de densidade e velocidades, P e S, e o desconhecimento da reologia da zona de baixa velocidade associada à camada de intemperismo. Entretanto a modelagem elástica indica que o contraste de impedância na interface Cretáceo-Paleozóico deve produzir forte conversão de ondas P para S o que deve afetar principalmente registros em afastamentos maiores. A forte reverberação que ocorre na região de baixa velocidade em torno do reservatório é outro evento importante que deve se manter quando informações mais precisas sobre os perfis de densidade e velocidade desta região estiverem disponíveis. A modelagem das ondas de superfície requer um melhor entendimento da zona de intemperismo e suas camadas vizinhas, entretanto as simulações indicam que estes eventos devem ter forte amplitude e vão exigir uma malha mais refinada para serem modelados.

A intensidade das conversões também vai depender do padrão de radiação da fonte, que depende do arranjo de fontes utilizadas. Alguns experimentos importantes que precisam ser efetuados, a influência do padrão de radiação nos resultados e a utilização de fontes de onda S para avaliar o potencial benefício do menor comprimento de onda associado a estas ondas na região do reservatório, são condições a serem investigadas.

Em relação aos aspectos computacionais, a modelagem elástica em 3-D vai requerer a decomposição em domínio, para poder modelar as ondas de superfície, mesmo utilizando esquemas de alta ordem; é necessário investigar fronteiras absorventes mais eficientes para atenuar as ondas de superfície.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Rede Cooperativa de Pesquisa em Risco Exploratório - Rede 01-FINEP/CT-PETRO, pelo apoio financeiro.

Francisco Neto agrade a CAPES pelo apoio financeiro durante o curso de mestrado.

Referências

Aki, K., e Richards, P.,1980,Quantitative seismology: Theory and methods, W.H. Freeman and Co., New York.

Carcione, J., Kosloff, D., and Kosloff, R., 1988, Viscoacoustic wave propagation simulation in the earth: Geophysics , Vol. 56 , No 6 , p. 769-777.

Carcione, J., 1993, Seismic modeling in viscoelastic media: Geophysics,V. 58, p.110-120.

Chew, W., e Liu, H. Q., 1996, Perfectly matched layers for elastodynamics: a new absorbing boundary condition. J.Computational. Acoust., Vol. 4, No. 4, p. 341-359.

Eiras, J. F., 1998, Tectônica, sedimentação e sistemas petrolíferos da Bacia do Solimões, Estado do Amazonas. *In: Searching for Oil and Gas in the Land of Giants.* TAHA, M. (Schlumberger Ed.). The Search, Edição Especial Sobre o Brasil, cap. 2, p. 23-31.

Emmerich, H., e Korn, M., 1987, Incorporation of attenuation into time-domain computation of seismic wave fields:Geophysics, Vol. 52, p.1252-1264.

Karrenbach, M., 1995, Elastic tensor wave fields: Ph.D. thesis, Stanford University.

Levander, A. R., 1988, Fourth-order finite-difference P-SV seismograms: Geophysics, Vol. 53, No. 11, p.1425-1436.

Lima, C. C. A., Garabito, German e Eiras, J. F., 2003. Modelagem sísmica por diferenças finitas - o exemplo da Bacia do Solimões. *In: Eighth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro. Abstracts Volume (CD-ROM).*

Mittet, R., 2002, Free-surface boundary conditions for elastic staggered-grid modeling schemes: Geophysics, Vol. 67, No. 5, p.1616-1623.

Silva Neto, F. A., 2004, Modelagem acústica por diferenças finitas e elementos finitos 2-d e 2,5-d: Dissertação de mestrado, CPGf-Universidade Federal do Pará.

Zeng, Y. Q., He, J. Q., e Liu, Q. H., 2001, The application of the perfectly matched layer in numerical modeling of wave propagation in poroelastic media: Geophysics, Vol. 66, No 4 , p.1258-1266.

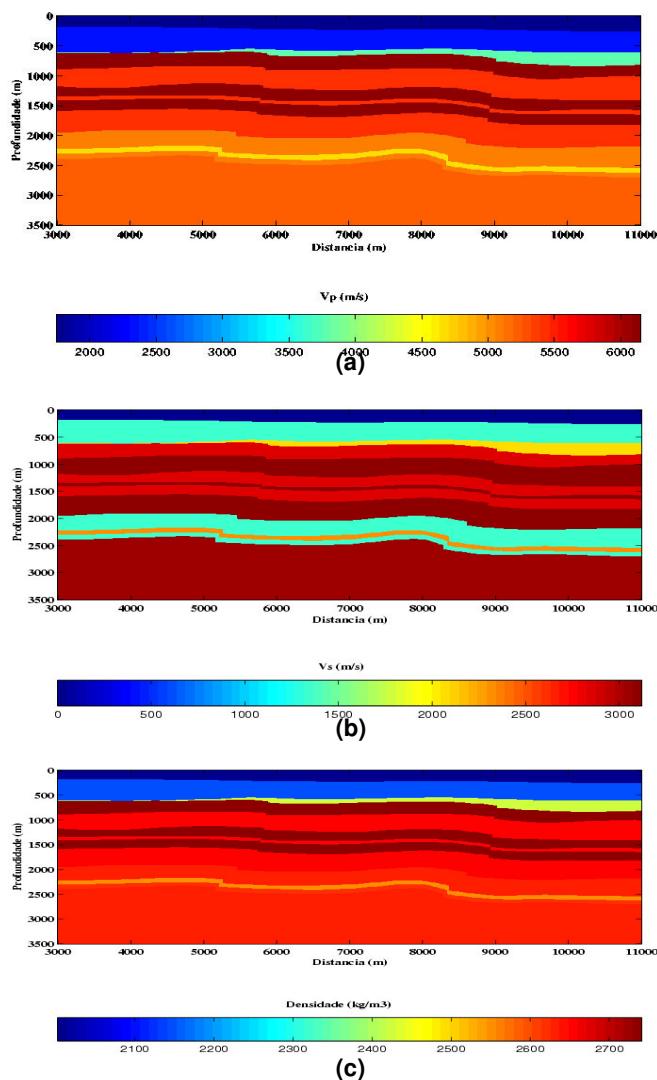
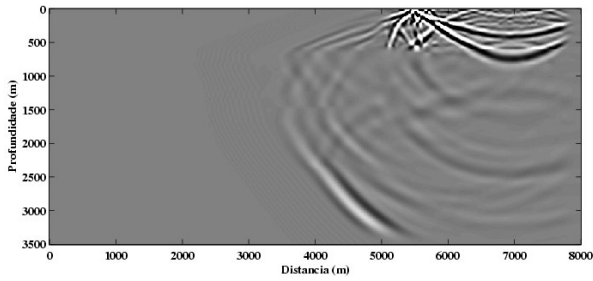
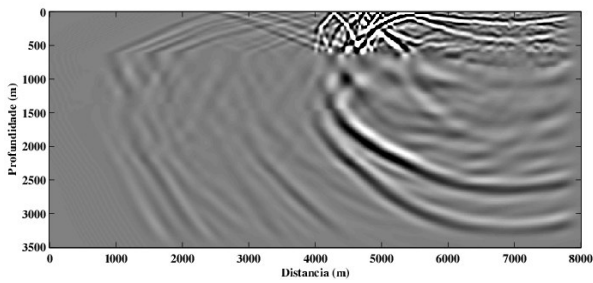


Figura 3: São apresentadas as propriedades físicas utilizadas na modelagem por diferenças finitas, a saber: (a) modelo de velocidade da onda P; (b) modelo de velocidade da onda S; (c) modelo de densidade. A fina linha amarela em (a) representa a rocha reservatório, região de maior interesse exploratório.

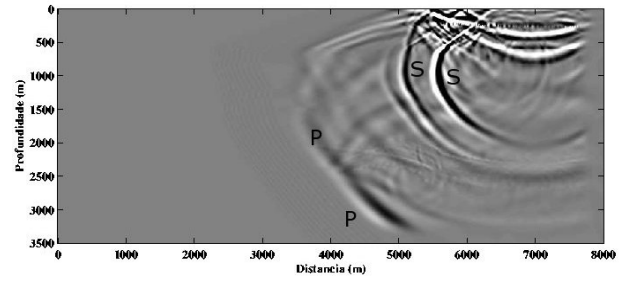


(a)

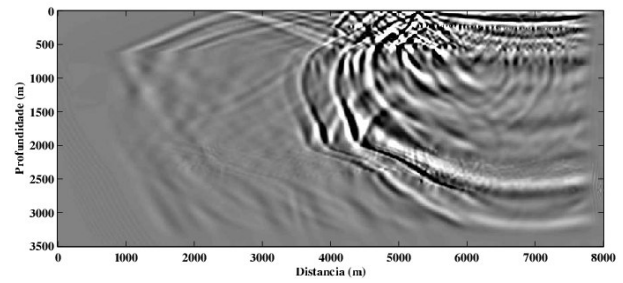


(b)

Figura 4: Instantâneos da modelagem acústica em 1,0 s (a) e em 1,5 s (b) ; Verifica uma grande quantidade de reflexões múltiplas de longo período entre a superfície livre e a discordância entre o Cretáceo e Paleozóico.

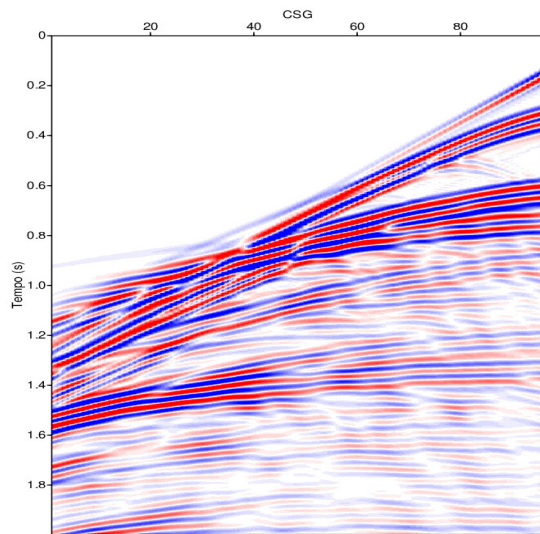


(a)

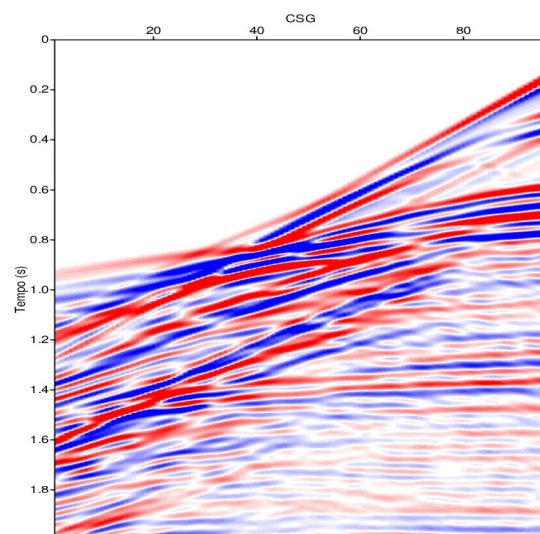


(b)

Figura 5: Instantâneos da modelagem elástica em 1,0 s (a) e 1,5 s (b) de propagação. Verifica-se nas figuras um novo padrão de múltiplas associado a reflexão das ondas-S na superfície livre e a discordância Cretáceo-Paleozóico. Destaca-se em (a) a diferença entre o comprimento da onda P e o da onda S , na região do reservatório.



(a)



(b)

Figura 6: Sismograma com a componente vertical da velocidade, foi aplicado o mesmo ganho aos dois sismogramas.(a) modelo acústico e (b) modelo elástico. As semelhanças entre as figuras (a) e (b) identificam as fortes múltiplas na discordância. A presença de eventos com curva de afastamento linear após 1,0 s, para afastamentos maiores, está associada as ondas que se propagam a baixo da superfície livre, ondas S aparecem e ocupam um maior intervalo de tempo por terem menor velocidade que as ondas P.

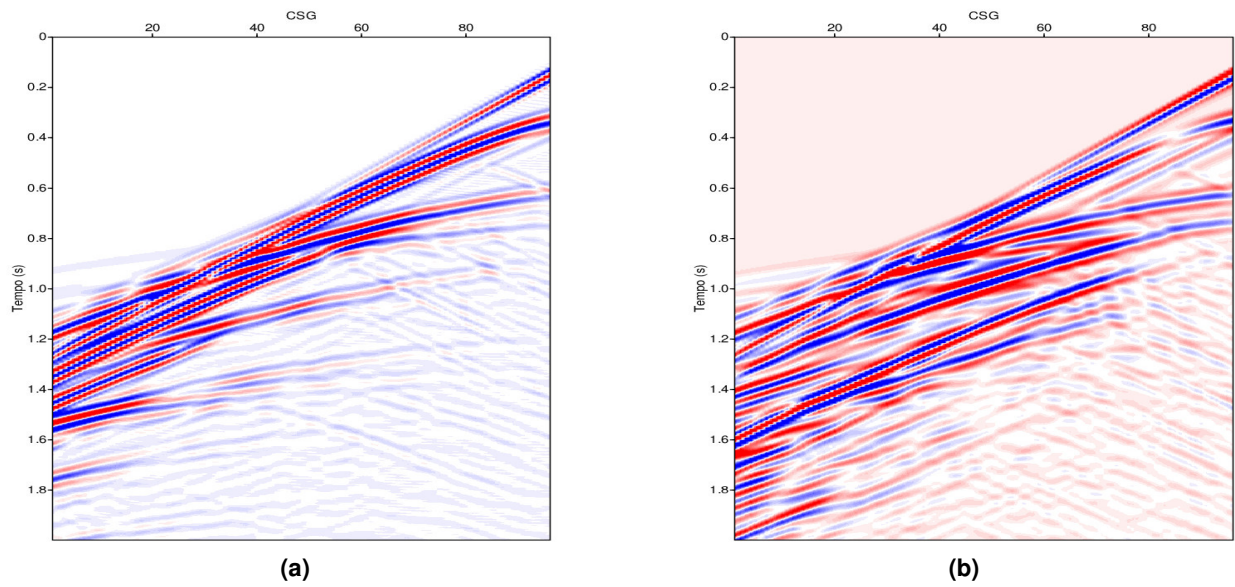


Figura 7: Sismograma com a componente horizontal da velocidade. (a) modelo acústico e (b) modelo elástico. As semelhanças entre as figuras (a) e (b) identificam as fortes múltiplas na discordância. A presença de eventos com curva de afastamento linear após 1,0 s está associada às ondas que se propagam lateralmente abaixo da superfície livre, ondas S aparecem e ocupam um maior intervalo de tempo por terem menor velocidade que as ondas P.