

# Análise do limite da resolução vertical na borda do reservatório: um estudo de Modelagem Física

Roseane M. Misságia & Marco A. R. Ceia, (LENEP/UENF)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

Most reservoirs are thin in the vertical dimension, and even those that are not thin out to zero thickness at the edges. Current efforts to increase the resolving power of the seismic method suggest us to examine closely the fundamental concepts of resolvability through of the seismic physical modeling. This paper deals with vertical resolution of seismic reflection data using synthetic wedge model considering the conventional limits of the Widess Model, which assumes a pair of exactly equal and opposite reflection coefficients. In this specific case the experiments were directed to show some results obtained through seismic physical modeling in a range of frequency to identify individual reflections from the top and bottom of a thin bed.

## Introdução

O melhoramento da banda de frequência de dados sísmicos tem sido objeto de variados estudos geofísico (Marfurt and Kirlin, 2001; Partyka *et al*, 1999, Tirado, 2004; Okaya, 2005; Puryear, 2006. Isto pode ser justificado porque em uma aquisição sísmica os dados observados possuem banda de frequência limitada, e a terra funciona como um filtro que atenua as altas frequências da energia propagada, provocando a perda de resolução. Aumentar a resolução sísmica vertical é essencial quando a meta é extrair detalhes estratigráficos de imagens sísmicas de reservatórios compostos por camadas ou unidades de fluxo com espessura abaixo da resolução sísmica convencional. Como consequência direta, os geofísicos de exploração e de desenvolvimento freqüentemente se deparam com a necessidade de inferir sobre a espessura de camadas delgadas, quando o topo e base não podem ser mapeados individualmente. Widess (1973) analisou a forma da onda obtida após a convolução de um pulso de fase zero com dois picos de refletividades, um com amplitudes de igual magnitude e mesma polaridade, e outro com amplitudes de igual magnitude e polaridades opostas, Tipo I e II da Tabela I. Então, de acordo com o modelo proposto por Widess para análise da função refletividade em camadas delgadas, o limite fundamental de resolução sísmica é  $\lambda_d/8$ , sendo  $\lambda_d$  o comprimento de onda dominante nos dados. Na presença de ruídos, e consequente alteração da forma da onda sísmica propagada em subsuperfície, a transição entre o limite de  $\lambda_d/8$  e  $\lambda_d/4$  fica obscurecida,

impondo a adoção prática do limite inferior de  $\lambda_d/4$ . A Figura 1 mostra que se a espessura de uma camada afina para menos de  $\lambda_d/8$ , a forma do pulso não muda significativamente, mas o impacto maior pode ser visto na amplitude que diminui progressivamente, dificultando diferenciar se as mudanças de amplitudes estão associadas à variação do coeficiente de reflexão ou a espessuras menores que  $\lambda_d/8$ .

A partir disto, fica notório que o comprimento de onda é determinante para a definição da resolução vertical, que por sua vez depende da velocidade e freqüência dominante dos dados. Isto faz da freqüência o fator chave para determinar o limite de resolução, quando se busca definir detalhes mais precisos em dados sísmicos de reflexão. Com objetivo de resolver esta questão, muita atenção tem sido direcionada para as etapas de aquisição e processamento de dados, adotando-se procedimentos que visam o melhoramento dos limites superior e inferior da banda espectral.

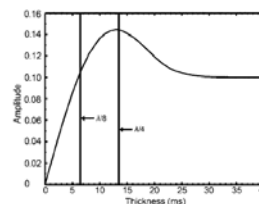


Figura 1. Gráfico da Amplitude x Espessura. Note o incremento da amplitude em  $\lambda_d/4$ , e a tendência linear abaixo da espessura de sintonia (*tuning*). Extraída de Puryear and Castagna, (2008). Por várias décadas, a teoria de Widess (1973) e Kallweit and Wood (1982), tem sido adotada como o método de mapeamento da espessura, quando se deseja analisar o efeito de sintonia (*tuning*) em reservatórios delgados e acunhamentos. No entanto, o modelo de Widess pressupõe um par de coeficientes de reflexão exatamente iguais ou opostos, caso particular de dois possíveis tipos de series de refletividades, veja Figura 2 e Tabela 1. E também, que os semi-espacos acima e abaixo da camada de interesse tenham a mesma impedância acústica homogênea.

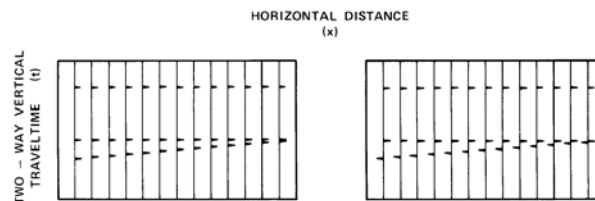


Figura 2. Par de seqüências de refletividades com igual amplitude e polaridade (esquerda), e igual amplitude e polaridade oposta (direita). Extraído de Kallweit and Wood (1982).

Tabela 1. Séries de refletividade, ocorrência no topo e base da camada. Adaptado de Tai (2009).

	Tipo I	Polaridade oposta e igual magnitude
	Tipo II	Igual polaridade e igual magnitude
	Tipo III	Polaridade oposta e diferente magnitude
	Tipo IV	Polaridade igual e magnitude diferente

Partyka *et al.* (1999), Marfurt & Kirilin (2001), Castagna *et al.* (2003) demonstraram a efetividade da decomposição espectral como uma ferramenta para estimar a espessura de sintonia. No entanto, tais métodos apresentam dificuldades com camadas delgadas, se a banda espectral é insuficiente para identificar com clareza a periodicidade dos espectros de picos e vales. Isto motivou a busca de métodos que prescindam de uma precisa identificação de picos e vales, dentro da banda de frequência sísmica. Puryear (2006), Puryear and Castagna (2008) mostraram como a inversão da decomposição espectral para propriedades da camada pode ser melhorada, quando os coeficientes de reflexão são determinados de forma simultânea. O resultado disto é a inversão esparsa da refletividade que pode ser parametrizada para fornecer uma estimativa robusta da espessura da camada, mesmo quando esta se encontra abaixo da visão convencional do limite de resolução, ou seja, inferir a espessura de sintonia abaixo da taxa de amostragem sísmica.

Neste trabalho, a discussão se restringiu a estimativa do limite de resolução vertical baseado no modelo clássico de cunha (Widess, 1973; Kallweit and Wood, 1882; Chung and Lawton, 1995), para um reservatório com espessura variável em direção a borda. Para isso, usamos um modelo físico, cuja configuração de refletividade pode ser representada pelo Tipo I da Tabela 1, amplitudes de igual magnitude e polaridades opostas.

Os dados sísmicos utilizados foram adquiridos através da simulação da onda sísmica ultrassônica, propagada na água, a fim de simular uma aquisição marinha. A Figura 3 apresenta o sistema de modelagem física instalado no Laboratório de Modelagem Integrada de Reservatório do LENEP/UENF- Macaé/RJ, onde os experimentos foram realizados (Misságia *et al.*, 2010).

#### Modelo de reservatório com borda acunhada

O modelo de trabalho foi confeccionado através da colagem de nove placas de Plexiglass com velocidade de propagação da onda primária medida em  $V_p=2777\text{m/s}$ , ver Tabela 2, semelhante às das rochas sedimentares siliciclásticas. Cada placa tinha  $300 \times 100 \times 20\text{mm}^3$  de espessura, comprimento, e largura, respectivamente. Após a colagem foi usinado uma cavidade no bloco resultante, conforme mostram as Figuras 4 e 5, de modo a simular a borda acunhada de um reservatório. Dessa forma, o modelo físico construído com material não poroso (Plexiglass) representa um meio geológico homogêneo, garantindo que a amplitude dos picos de reflexões tenha a mesma magnitude e polaridades opostas, no topo e base do reservatório, conforme mostra

Figura 6. A cavidade interna representa um reservatório, que pode ser saturado por alguma fase fluida.

#### Resolução vertical dos dados sísmicos

Com o objetivo de analisar os fenômenos associados ao limite de resolução vertical do método sísmico, a espessura de sintonia ( $T_{\text{tun}}$ ) do modelo de cunha foi definida a partir do pulso de Ricker, conforme Chung and Lawton (1995):

$$T_{\text{tun}} = \frac{1}{2} b, \quad (1)$$

Sendo “b” igual ao tempo entre os dois lobos laterais do pulso sísmico. Usando a definição de “b” do pulso Ricker, a espessura de sintonia, em tempo duplo, pode ser expressa por:

$$T_{\text{tun}} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi f_p}, \quad (2)$$

E o correspondente limite em unidades de distância:

$$\Delta z \cong \frac{\pi}{4\sqrt{6}} v_T T_{\text{tun}}, \quad (3)$$

onde  $f_p$  - frequência de pico, ou seja, componente de frequência que tem o maior valor no espectro de amplitudes de Fourier, e  $v_T$  - velocidade intervalar

A partir de (1), (2) é possível verificar que o efeito de sintonia é uma função direta do tamanho relativo do lobo lateral do pulso sísmico.

#### Software de Aquisição

O sistema de modelagem física conta com um software de aquisição de dados desenvolvido no sistema de controle de instrumentos LabView (National Instruments, 2007). Este software permite configurar os parâmetros necessários a execução do experimento, tais como: geometria, forma do sinal, parâmetros do arquivo de dados e parâmetros de aquisição.

Entre as opções de geometria disponíveis estão: Zero Offset, Constant offset, CMP (“Common Mid-Point”), 2D.

#### Experimento

Os experimentos foram conduzidos com objetivo de simular um levantamento marinho sobre a borda em forma de cunha do reservatório. Adotou-se a geometria de aquisição afastamento constante (CO – *constant offset*) entre fonte-receptor de 20 mm. Os registros foram efetuados a partir da borda esquerda do modelo, atravessando o reservatório saturado com água. O modelo esteve imerso num tanque com lâmina de água de 100mm, o que considerando a escala adotada de 1:10.000, representa 1000m na escala de campo. As propriedades físicas do Plexiglass e da água foram medida em laboratório, conforme apresenta a Tabela 2. A configuração de geometria adotada foi do tipo CO, com

espaçamento entre as aquisições de 2.5 mm e 151 traços espaçados de 2mm. Em cada posição de transdutores foram disparados 500 tiros para melhorar a razão S/R. Neste experimento utilizamos transdutores de contato não-focados, modelo V-303 da Panametrics.

Tabela 2 – Propriedades físicas do Modelo

Material/fluido	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade P (m/s)
Água	0,993	1540
Plexiglass	1.18	2777

A Tabela 3 sumariza as características da forma de onda utilizada pela fonte, conforme Figura 7. Note que a frequência central do sinal utilizado variou entre 250 e 500 KHz, veja a Figura 8, correspondendo as frequências de 25Hz e 50Hz na escala sísmica, respectivamente. As Figura 9 e 10 representam o espectro de amplitude de Fourier em relação ao tempo de transito e frequência, respectivamente

Tabela 3 – Parâmetros de configuração do sinal transmitido

Frequência de amostragem transmitida	4.000.000c/s
Comprimento da amostra transmitido	5000
Comprimento do sinal transmitido	1,25 ms
Tipo de sinal	Tone Burst
Janela de Modulação do sinal transmitido	Bartlett
Frequencia do sinal (Tone Burst)	250/500KHz
Fase inicial do sinal (Tone Burst)	0 graus

## Resultados

Os sismogramas apresentados nas Figuras 11,12 e 13 representam o resultado da simulação do modo de onda P para as frequências ultrassônicas 150KHz, 250KHz e 500KHz, respectivamente. A Figura 11 mostra o enriquecimento da amplitude na extremidade mais espessa do reservatório (10mm) até a extremidade oposta (4mm). Isto pode ser explicado pelo surgimento da interferência construtiva entre o pico central do pulso, associado à reflexão do topo da camada, e o lobo lateral do pulso, associado à reflexão da base da camada. Para a frequência de 150KHz a estimativa da espessura de sintonia em modelos livres de ruídos, pode ser considerada confiável a partir de  $T_{tur}=26ms$  e  $\Delta z=12,5mm$ . Dessa forma, a estimativa teórica confirma a identificação do efeito de enriquecimento da amplitude nos traços dentro do reservatório. Enquanto isso, com o levantamento conduzido na frequência ultrassônica de 250 KHz, é possível identificar o enriquecimento da amplitude a partir do traço 101, com diferença de tempos de trânsito de 11,20ms e espessura da camada de 8,3mm, definindo o limite de resolução vertical da camada. A diferença entre as espessuras da camada teórica e estimada foi de 3,8ms. No entanto, é importante lembrar que na análise teórica não foi levado em consideração os efeitos provocados pela presença de ruídos e atenuação do sinal, veja Figura 12. Na Figura 13, a simulação foi realizada com a frequência ultrassônica de 500KHz, é possível visualizar a ausência do efeito de enriquecimento da amplitude devido a largura da banda de frequência ser capaz de separar os eventos de reflexão no topo e base do reservatório.

## Conclusões

A investigação do limite de resolução vertical em modelo de cunha através da modelagem física ultrassônica se mostrou eficiente como ferramenta para reduzir incertezas na análise e identificação da interferência construtiva da amplitude, que surge durante o cálculo da espessura de sintonia e espessura da camada delgada em bandas espectral abaixo do limite de resolução da sísmica convencional.

As futuras investigações serão direcionadas para o melhoramento da banda de frequência através da inversão espectral da refletividade de camada delgadas e acunhadas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS pela criação do Núcleo Regional de Competência em Campos Marítimos na UENF/LENP, que financiou a implantação da infraestrutura essencial à linha de pesquisa Modelagem Integrada de Reservatório.

## Referências

- Castagna, J.P., S. Sun, and R.W. Siegfried, 2003.** Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons: *The Leading Edge*, 22, 120-127.
- Chung, H. and Lawton, D.C., 1995.** Frequency Characteristics of Seismic Reflections from Thin Beds: *Canadian J. of Explr. Geophysics*, 31, 32-37.
- Kallweit, R.S. and Wood, L.C., 1982.** The limits of resolution of zero-phase wavelets: *Geophysics*, 47(7), 1035-1046.
- Marfurt, K.J. and R.L. Kirlin, 2001.** Narrow-band spectral analysis and thin-bed tuning: *Geophysics*, 66, 1274-1283.
- Misságia, R. M.; Ceia, M.A.R. e Pessanha, C., 2010.** A Modelagem Física Sísmica na UENF/LENP: descrição e teste do sistema. IV Simpósio da Sociedade Brasileira de Geofísica. Brasília – DF.
- National Instruments, 2007.** <http://www.ni.com/labview/>.
- Okaya, D.A., 1995.** Spectral Properties of the Earth's Contribution to Seismic Resolution: *Geophysics*, 60(1), 241-251.
- Panametrics, 2010.** Manual of Ultra-sonic Transducers for Non-Destructive Tests. <http://www.olympusndt.com/en/panametrics-ndt-ultrasonic>.
- Puryear, C. I., 2006.** Modeling and Application of spectral inversion for determination of layer properties: M.S.Thesis, University of Houston.
- Puryear, C. I., and Castagna, J. P., 2008.** Layer-Thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: theory and application: *Geophysics*, 73(2), R37-R48.
- Partyka, G. A., J. A. Gridley, and J.A.Lopez, 1999.** Interpretational aspects of spectral decomposition in reservoir characterization: *The Leading Edge*, 18, 353-360.
- Tirado, S., 2004.** Sand thickness estimation using spectral decomposition: M.S. thesis, University of Oklahoma.

Widess, M.B.,1973. How thin is a bed? Geophysics, 38, 1176-1180.

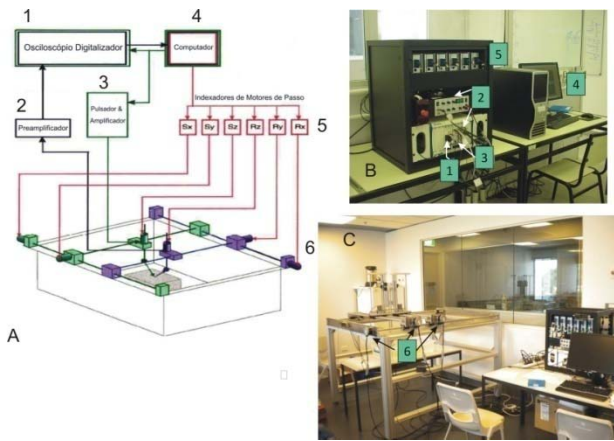


Figura 3. Sistema de modelagem física LENEP/UENF

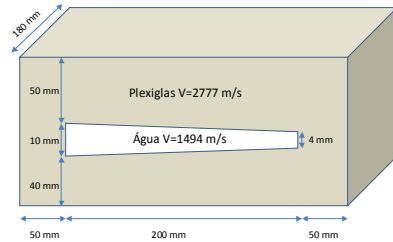


Figura 4. Esquema do modelo físico utilizado no experimento.

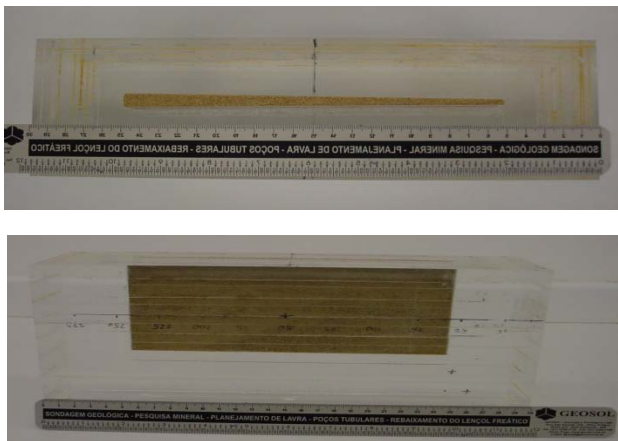


Figura 5. Foto do Modelo de trabalho. Superior - vista frontal do modelo evidenciando a cavidade reservatório preenchida com areia; inferior - uma vista lateral do modelo.

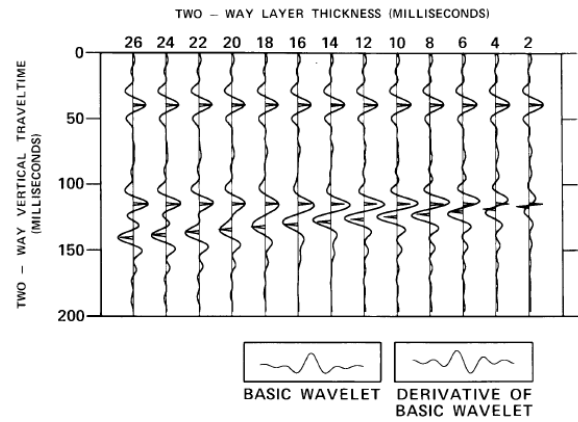


Figura 6. Pulso sísmico convolvido com duas series de refletividades de igual amplitude e polaridade oposta, converge para a derivada do pulso composto quando a separação entre os picos é reduzida. Extraída de Kallweit and Wood, (1982).

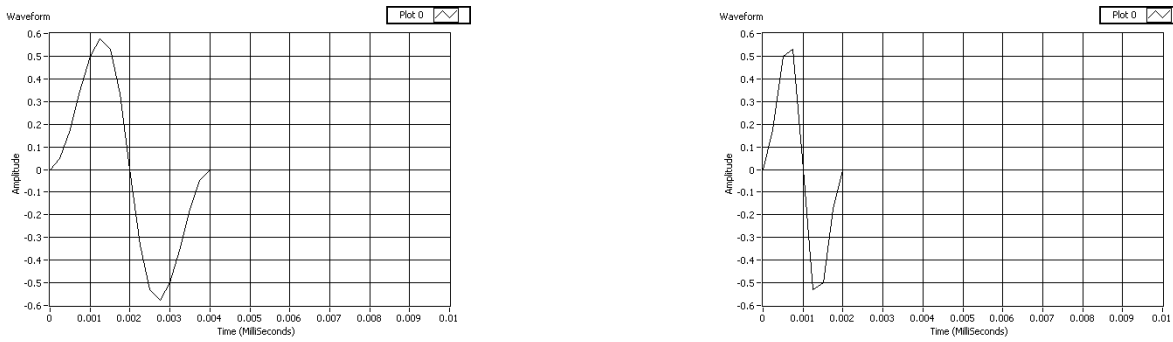


Figura 7 - Formas de onda utilizadas para excitar o transdutor fonte. Esquerda 250KHz, direita 500KHz



Figura 8 – Espectro de freqüências das formas de onda utilizadas para excitar o transdutor fonte. Esquerda 250KHz, direita 500KHz

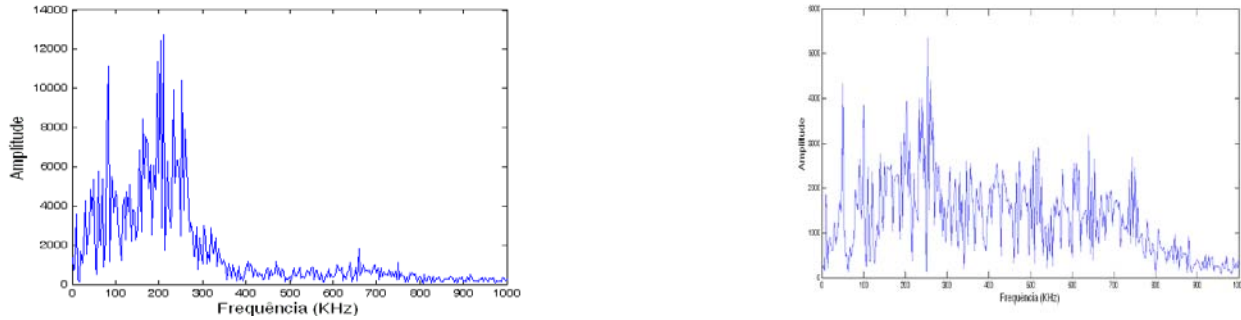


Figura 9 – Mostra o espectro de freqüência em função da amplitude do sinal. Esquerda - freqüência ultrassônica transmitida 250KHz; direita – freqüência ultrassônica transmitida 500KHz.

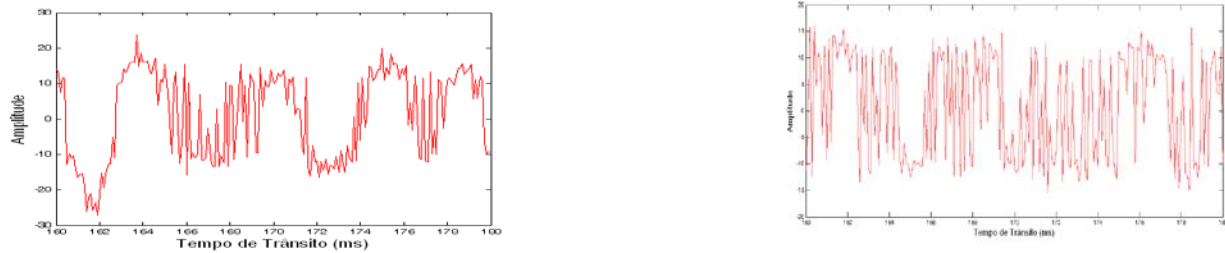


Figura 10 – Mostra o espectro de Amplitude em função do Tempo de Trânsito do sinal. Esquerda - freqüência ultrassônica transmitida 250KHz; direita – freqüência ultrassônica transmitida 500KHz. Note a correspondência entre os tempos de trânsito de 165,7 – 176,9 ms (esquerda) e 165,7 – 171,9 (esquerda) com os picos de amplitudes aproximadamente iguais e polaridades opostas, representando topo e base do reservatório.

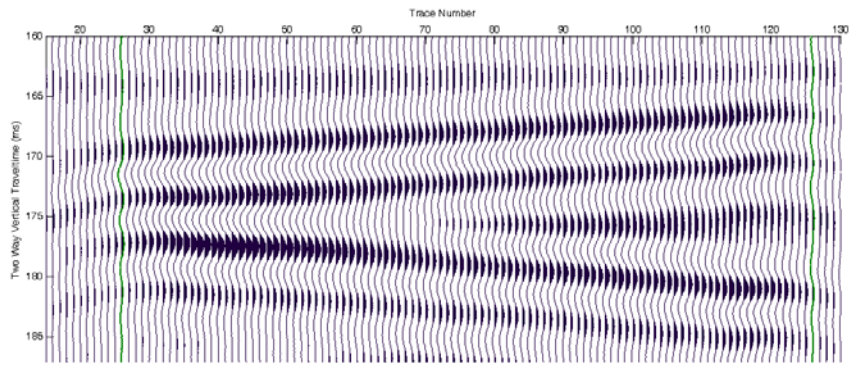


Figura 11 - Sismograma experimental produzido pela simulação da onda P para um pulso com frequência ultrassônica de 150KHz. Os limites do reservatório são delimitados pelos traços em verde 26 e 126, correspondendo a 50mm e 250mm, respectivamente. Note o enriquecimento de amplitude em todos os traços do reservatório, demonstrando a impossibilidade de distinguir os refletores do topo e base do reservatório.

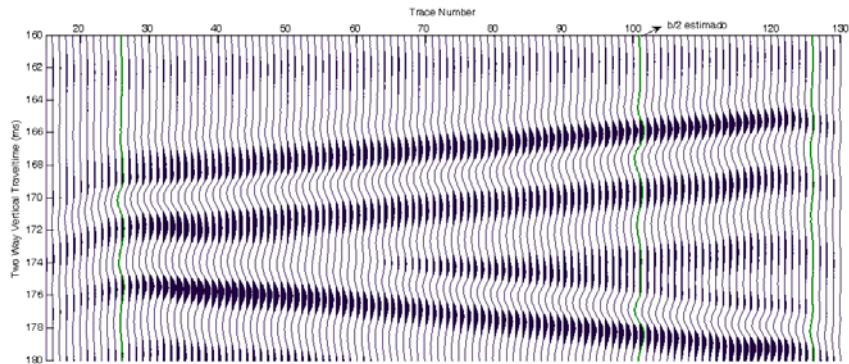


Figura 12 - Sismograma experimental produzido por um pulso com frequência de 250KHz. Os limites do reservatório são delimitados pelos traços em verde 26 e 126, e correspondem a 50mm e 250mm, respectivamente. Note o enriquecimento da amplitude a partir do traço 101 do reservatório, cuja diferença entre os tempos de trânsito do topo e base do reservatório é de 11,20ms e espessura de 8,3mm, bem próxima da espessura teórica de 15ms se considerarmos os efeitos provocados pela presença de ruídos e atenuação do sinal.

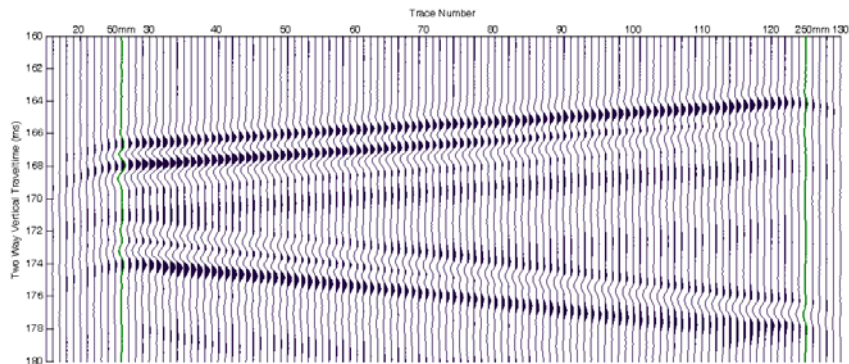


Figura 13 - Sismograma experimental produzido pela simulação da onda P ultrassônica. A frequência do sinal foi de 500KHz. Note os limites do reservatório definidos pelos traços 26 e 126, e o não surgimento do efeito de sintonia devido a capacidade do sinal transmitido de separar os eventos refletidos no topo e base do reservatório.