



## A Modelagem Física Sísmica na UENF/LENEP: descrição e teste do sistema

Roseane M. Misságia (LENEP/UENF), Marco Ceia (LENEP/UENF), Carolina Pessanha (PETROBRAS)

Copyright 2010, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGF ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGF.*

### Resumo

Os experimentos de modelagem física em escala ultra-sônica têm sido usados como ferramenta efetiva para melhorar o conhecimento acerca dos fenômenos físicos que ocorrem durante a exploração e produção em reservatórios portadores de óleo e gás, em escala de campo. Através do entendimento do que representa a expressão sísmica ultra-sônica ajustada a equações empíricas é possível ganhar novos conhecimentos para serem aplicados nos reservatórios em produção.

### Introdução

Os pesquisadores japoneses Terada and Tsuboi, (1927) foram os primeiros a fazerem uso da modelagem física para reproduzir fenômenos físicos em laboratório. Estes autores tentaram simular a transmissão de ondas Rayleigh produzida por terremotos. O próximo avanço aconteceu durante a segunda guerra mundial, quando sismólogos Russos introduziram amplificadores no sistema de modelagem física para estimar o tamanho das bombas detonadas pelos seus adversários. Evans (1958) mostrou como transdutores piezo-elétrico poderiam ser usados para produzir ondas ultra-sônicas compressionais e cisalhantes. Nos anos 60, a indústria de exploração sísmica investiu fortemente em robustos métodos computacionais para tentar resolver problemas do processamento de dados sísmicos 3D. A partir disto, surgia a demanda por dados sísmicos físicos representativos da geologia 3D da terra, viabilizando assim, a calibração e teste dos algoritmos de processamento sísmico 3D propostos (Ebrum and McDonald, 1994). Hilterman (1970) publicou a experiência adquirida com a construção do primeiro sistema de modelagem física 3D automatizado. French (1974) introduziu o uso do computador no sistema de modelagem física para controlar o deslocamento dos transdutores fonte e receptor. Em 1985 a Exxon Houston construiu um sistema de modelagem física com 24 receptores, voltado para acomodar grandes modelos físicos.

Atualmente, as universidades de Curtin/Austrália, Calgary/Canadá, Delft/Holanda, Houston/EUA, Colorado School of Mines (CSM)/EUA, e China, mantêm cada uma, um sistema de modelagem física operando em condições de pressão e temperatura ambiente. Na Curtin, este sistema é usado para pesquisas de anisotropia, entendimento da resposta sísmica transmitida em decorrência de variações no fluido, tamanho do poro e pressão (Evans et al., 2007; Evans et al. 2008), imageamento de fraturas e falhas através de dados

sísmicos 3D de superfície e VSP (Luo and Evans, 2002; Luo and Evans, 2004, Luo et al., 2009). Em Calgary as pesquisas estão voltadas para o entendimento de estruturas geológicas complexas 3D (Bland et al. 2006; Wong et al., 2009). Por exemplo, como a amplitude dos eventos de reflexão varia quando a espessura da camada diminui para valores abaixo do comprimento de onda dominante (Cooper et al., 2010), e estudo de viabilidade da AVO 3D para identificação e interpretação estrutural (Hrabi et al., 1992). Na CSM, Dewangan et al. (2006) estudaram as ondas convertidas PS para ganhar conhecimento na análise de velocidade em meios transversalmente isotrópicos (TI). Em Delft foram realizados estudos básicos da propagação da onda sísmica (Veldhuizen et al., 2004). Em Houston, Chen (1996) analisou a forma da onda viscoelástica confrontando a modelagem numérica e física. A universidade da China mantém seu interesse focado na variação da resposta sísmica em relação ao fluido do reservatório (Wang et al., 2009) e detecção de fraturas usando dados sísmicos 2D (Ekanem et al., 2009). Também pode ser citado o sistema de modelagem física instalado na companhia de petróleo Saudi Aramco/Arabia Saudita, cujo foco esta voltado para o estudo de estruturas complexas próximas a superfície e carbonatos fraturados rasos, (Evans, 2007).

O sistema de modelagem física ultra-sônico, recentemente instalado no Laboratório de Modelagem Integrada de Reservatório/UENF/LENEP, Macaé/RJ, tem capacidade para registrar e demonstrar os efeitos sísmicos das ondas  $V_p$ ,  $V_s$  e  $V_{ps}$ , amplitudes  $A_p$ ,  $A_s$  e  $A_{ps}$ , e fator de qualidade ( $Q$ ) refletido e transmitido, em uma grande variedade de cenários geológicos. Desta forma, espera-se fazer uso da modelagem física para melhorar o entendimento dos reservatórios em produção.

### O Equipamento

A Figura 1 apresenta o sistema de modelagem física instalado no Laboratório de Modelagem Integrada de Reservatório do LENEPUENF- Macaé/RJ. Este sistema, desenhado para simular levantamentos sísmicos em modelos geológicos reduzidos, consiste numa estrutura de aço, onde braços motorizados constituídos por um conjunto de correntes, polias e dois motores de passo, são controlados por um computador e fazem deslocar 2 transdutores (transmissor e receptor) nas 3 dimensões ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Cada motor de passo pode combinar movimentos independentes para cada um dos transdutores, e simular diferentes geometrias de aquisição.

A sincronização entre o conjunto transmissor (pulsador e transdutor) e o conjunto receptor (transdutor, amplificador

e osciloscópio digitalizador) é feita através de uma placa de temporização, conforme mostra a Figura 1A. O conjunto transmissor emite um sinal ultra-sônico que viaja através do modelo, até que o campo de onda refletido alcance o transdutor receptor. O sinal elétrico gerado no receptor é amplificado, digitalizado e armazenado no formato SEG-Y, similar ao registro sísmico em escala de campo.

Um transdutor ultra-sônico converte energia elétrica para energia mecânica, na forma de som e vice-versa. Os principais componentes são o elemento ativo, o revestimento protetor e a placa de desgaste. O Elemento ativo é um material piezo ou ferro-elétrico, que converte energia elétrica tal como um pulso de excitação em energia ultra-sônica. Os materiais cerâmicos são mais utilizados na fabricação de transdutores, e de acordo com a opção de corte produzem diferentes formas de onda. O revestimento protetor geralmente é composto por um material de alta densidade, altamente atenuante, sendo usado para controlar a vibração do transdutor. Quando as impedâncias acústicas do revestimento protetor e elemento ativo se ajustam, obtêm-se um transdutor fortemente amortecido, de alta resolução e menor amplitude. No entanto, se houver alguma diferença nas referidas impedâncias acústicas, uma maior quantidade de energia será refletida para além do ponto de interesse, resultando num transdutor com resolução mais baixa. A placa de desgaste tem como princípio básico proteger o elemento transdutor do ambiente de teste (Panametrics, 2009). Em geral estes transdutores operam com frequência central na faixa de 50 KHz a 10 MHz, e podem simular ondas ultra-sônicas compressoriais ou cisalhantes.

Os transdutores podem ser posicionados na superfície dos modelos, simulando levantamentos terrestres, ou na lâmina d'água, quando os modelos estão imersos num tanque d'água, simulando levantamentos marinhos. No primeiro caso, deve-se usar algum tipo de solução para melhorar o acoplamento acústico entre o transdutor e o modelo (Couvreux & Thimus, 1996), tais como: Gel, vaselina ou graxa. No segundo caso, a própria água cumpre a função de acoplante.

### Software de Aquisição

O equipamento conta com um software de aquisição de dados desenvolvido no sistema de controle de instrumentos chamado LabView (National Instruments, 2007). Este software, projetado como uma série de painéis de instrumentos permite configurar os parâmetros necessários a execução do experimento. Todas estas configurações são acessadas a partir de um painel frontal, que permite o acesso a diferentes janelas para configuração da geometria, sinal, parâmetros do arquivo de dados e parâmetros de aquisição, conforme Figura 3. Entre as opções de geometria disponíveis estão: Zero Offset, Constant offset, CMP ("Common Mid-Point"), 2D, e utilizar os transdutores para medidas diretas de tempo de trânsito em um determinado material. Também é possível mudar o ângulo da direção de levantamento e importar uma geometria pré-definida em um arquivo externo. A Figura 4 apresenta o painel de configuração da forma do sinal transmitido, frequência, fase e o número de ciclos do sinal podem ser alterados. Existem opções como uma onda senoidal, um pulso e algumas formas de onda mais complexas. O software permite

configurar os parâmetros de aquisição do sinal, tais como; comprimento da janela de tempo, a amostragem temporal do sinal e o tempo de espera entre as aquisições. Também é possível configurar o número de tiros numa mesma posição e empilhar verticalmente estes traços. A Figura 5 demonstra o painel que permite acompanhar o progresso da aquisição. Os dados adquiridos são gravados em arquivos no formato SEG-Y, com ordenação de bytes *big-endian* ou *little-endian*, além do formato SU (Seismic Unix-CWP).

### Os Modelos

Os modelos utilizados nos experimentos de modelagem física são basicamente de 2 tipos: porosos e não-porosos. Os primeiros são geralmente confeccionados com rochas naturais ou sintéticas, pequenas esferas de vidro ou plásticos porosos. Já os modelos não-porosos são confeccionados em acrílico, vidro ou qualquer outro material cuja velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas seja similar as da rocha reservatório natural. Note que a premissa básica para construção de modelos físicos em escala reduzida é a fidelidade com que o modelo físico reproduz as propriedades físicas do cenário real. Então as dimensões do modelo, a frequência do sinal transmitido, o afastamento fonte-receptor, a amostragem espacial e temporal devem corresponder em escala a situação real.

O modelo apresentado neste trabalho foi confeccionado através da colagem de nove placas de Plexiglass com velocidade  $V_p=2777\text{m/s}$ , semelhante às 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 mostrado na Figura 6, de modo a simular a borda acunhada de um reservatório.

### Experimento

Os experimentos foram conduzidos com objetivo de testar e calibrar o sistema simulando um levantamento marinho com afastamento constante entre fonte-receptor de 50 mm. Os registros foram efetuados a partir da borda esquerda do modelo, atravessando o reservatório acunhado preenchido com água. O modelo estava imerso num tanque com lâmina de água de 90 mm. A velocidade de propagação da onda ultra-sônica na água foi medida no laboratório em 1494 m/s. O espaçamento entre aquisições foi de 2 mm e foram disparados 50 tiros em cada posição para melhorar a razão S/R, veja Figuras 7 e 8. Note que cada sinal é uma média de N medidas individuais. Neste experimento utilizamos transdutores de contato não-focados, modelo V-303 da Panametrics.

A Tabela 1 sumariza as características da forma de onda utilizada pela fonte, conforme Figura 9. Note que a frequência central do sinal utilizado variou entre 100 e 250 KHz, veja a Figura 10.

Frequência de amostragem do sinal injetado	4.000.000 c/s
Comprimento da amostra (sinal) transmitido	5000
Comprimento do sinal transmitido	1,25 ms
Tipo de sinal	Tone Burst
Janela de modulação do sinal transmitido	Bartlett

Frequência do "Tone Burst"	100 e 250 KHz
Fase inicial do "Tone Burst"	0 graus
Ciclos do "Tone Burst"	1
Atraso do início do sinal	0 ms

Tabela 1 – Parâmetros de configuração do sinal transmitido.

A Tabela 2 sumariza os parâmetros de configuração do sinal registrado. Para melhorar a relação sinal-ruído e eliminar ruídos acima de 5.0 MHz, optamos por um filtro passa-baixa, e efetuamos um empilhamento vertical com os traços referentes aos diversos tiros disparados em uma mesma posição. Os espectros de Frequência dos sinais registrados são mostrados na Figura 11.

Frequência de amostragem do sinal registrado	10.000.000 c/s
Comprimento total da amostra (sinal) registrada	3000
Comprimento do sinal registrado	0,3 ms
Frequência de Nyquist filtrada	0,1
Intervalo de tempo entre aquisições	1.0 ms

Tabela 2 – Parâmetros de configuração do sinal registrado.

### Discussão e Conclusões

Os resultados são mostrados na Figura 12. Note nestas imagens a presença dos modos de ondas (direta, P e múltiplas) compatível com o transdutor de face plana usado no experimento. Também é possível visualizar os efeitos de atenuação da onda P, através do plexiglas e cavidade (reservatório). O levantamento na frequência de 100 KHz não conseguiu identificar as estruturas de topo e base do reservatório acunhado devido ao limite de resolução imposto pelo comprimento de onda do sinal, e podemos observar o surgimento da interferência destrutiva ou efeito de *tunning*. Enquanto isso, o levantamento conduzido com frequência de 250 KHz, conseguiu separar as estruturas de topo e base inclinada do reservatório acunhado.

Entre as diversas aplicações desta tecnologia podemos citar:

- Comparação dos resultados obtidos com diferentes geometrias e parâmetros de aquisição de dados sísmicos (dip, strike, circular, etc.) e (frequência central, fase e forma de onda do pulso de excitação da fonte);
- Estudos do efeito de "tunning" nos dados;
- Simulação de levantamentos 4D;
- Estudos do efeito da granulometria, saturação e pressão na resposta sísmica;
- Prover dados para testes de algoritmos de processamento (migração, filtragem, etc.);
- Estudos de comportamento sísmicos em reservatórios anisotrópicos;
- Estudo de ondas dirigidas ("guided waves");
- Estudo de padrões de falhamento;
- Determinação direta da velocidade de propagação de ondas P e S;

### 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

- Bland, H. C., Wong, J., Gallant, E.V. and Hall, K. W., 2006. Physical modeling:CREWES Report, vol 18.
- Couvreur, J.-F. & Thimus, J.-F. 1996. The Properties of Coupling Agents in Improving Ultrasonic Transmission. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, No. 4, pp. 417-424.
- Cooper, J. K, Lawton, D. C., Margrave G. F, 2010, The wedge model revisited: A physical modeling experiment: Geophysics, 75,T15-T21.
- Dewangan, P., Tsvankin, I., Batzle, M., Wijk, K, and Haney, M.,2006, PS wave moveout inversion for tilted media:A physical modeling study:Geophysics, vol 71, p D135-143.
- Ebrom, D.A. and McDonald, J.A., eds, 1994, Seismic Physical Modeling:Geophysics reprint series No 51, Soc. Expl. Geoph., Tulsa.
- Evans, J.F., 1958, Seismic model experiments with shear waves: 28<sup>th</sup> Inter. Mtg. Soc. Expl. Geoph., San Antonio.
- Evans, J. B.,MacDonald, J., and French, W.,2007, Seismic physical modeling of reservoirs, it past, present and future:ASEG 2007 Conference-Perth, Australia.
- Evans, J.B. and Khah, N. K. F., and Nakatsuka, Y., 2008, Effect of pore geometry and dissolved CO<sub>2</sub> on ultrasonic transmission during pore pressure changes:Gephysics, 73, E181-E185.
- Ekanem, A. M., Wei, J., Wang, S., Di, B., Li, X-Y, and Chapman, M., 2009, Fracture detection using 2D P wave seismic data:A seismic physical modeling study:SEG Houston.
- French, W.S., 1974, Two dimensional and three dimensional migration of model experimental reflection profiles:Geophysics,39,265-277.
- Hrabi, K.D. and Lawton, D.C, 1992,#D physical modeling study of lower Cretaceous channel in central Alberta: CREWES Research Report, vol 4.
- Hilterman, F.J.,1970, Three dimensional seismic modeling:Geophysics, 35, 1020-1037
- Luo M., Evans J.B.,2004, An amplitude-based multiazimuth approach to mapping fractures using P-wave 3D seismic data:Geophysics,69,p.690-698.
- Luo, M., and Evans, B. J.,2002, Imaging fractures and faults from 3D VSP(s):SEG 2002- Salt Lake City, Utah.
- Luo, M. and Arihara N., Evans B., 3D analysis of complex fracture systems: SEG 2009.
- National Instruments, 2007. <http://www.ni.com/labview/> .
- Panametrics, 2010. Manual of Ultra-sonic Transducers for Non-Destructive Tests. <http://www.olympusndt.com/en/panametrics-ndt-ultrasonic/>.
- Terada, T. and Tsuboi, C., 1927, Experimental studies on elastic waves:Bull, Earthquake Res. Inst,3,55-65, Univ. of Tokyo.
- Wang, S., Aminzadeh, F., Di, B. Zhang, S. 2009, Assessing impact of reservoir fluid on the seismic response, a physical modeling experiment:Geophysics.
- Wong, J., Hall, K.W, Gallant, E. V., Bertram, M.B., and Lawton, D.C., 2009, Seismic physical modeling at the University of Calgary:CREWES Report, vol 10,

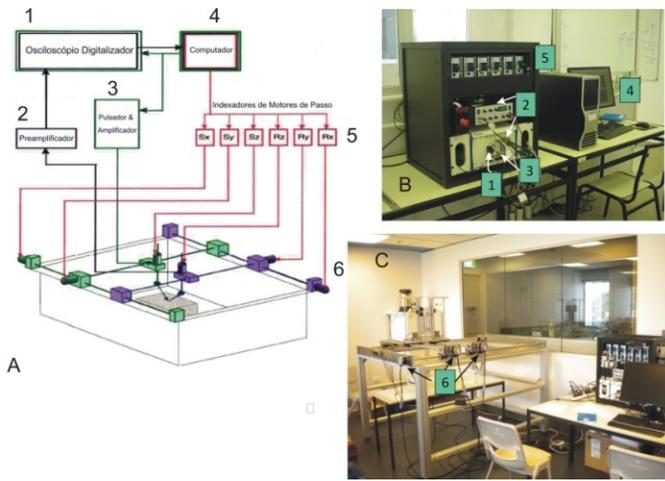


Figura 1- (A) Esquema do sistema de modelagem sísmica física do LENEP/UENF. (B) Módulo de aquisição de dados. (C) Foto da estrutura do sistema de modelagem sísmica física.

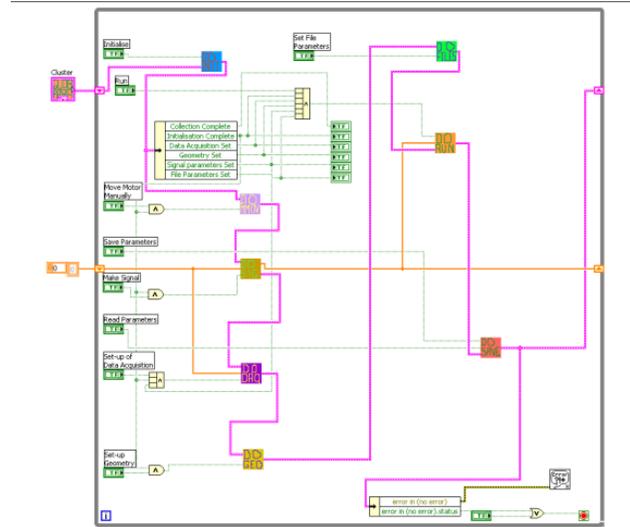


Figura 2 – Diagrama de funções do LabView

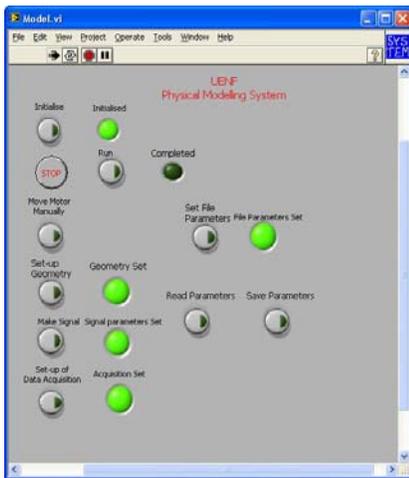


Figura 3 – Painel frontal de acesso a painéis secundários para configuração de parâmetros.

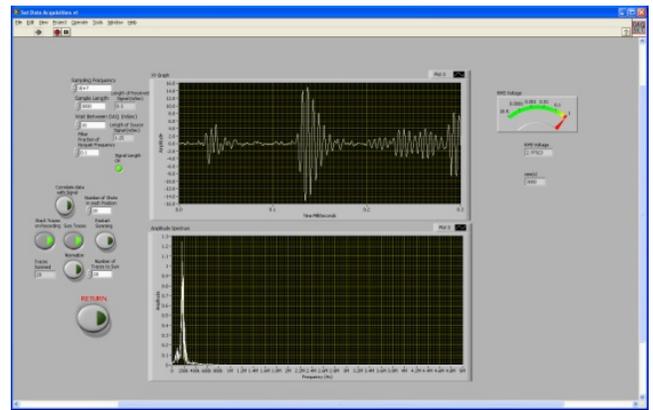


Figura 4 – Painel para parametrização da forma do sinal transmitido.

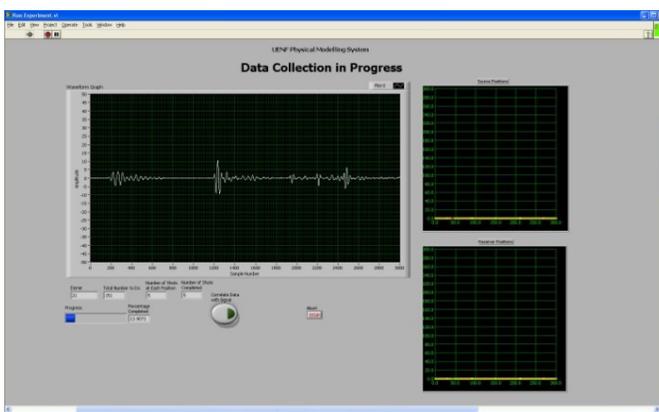


Figura 5 – Painel para acompanhamento do progresso da aquisição.

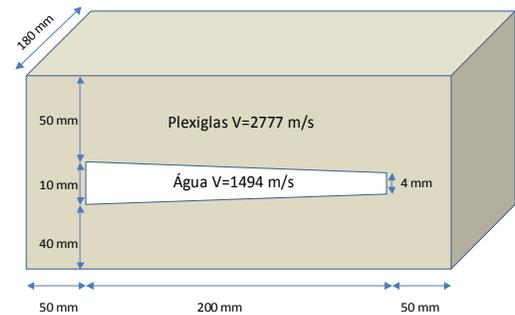


Figura 6 - Esquema do modelo utilizado no experimento. Este modelo ficou imerso num tanque com água, de modo a simular um levantamento marítimo.

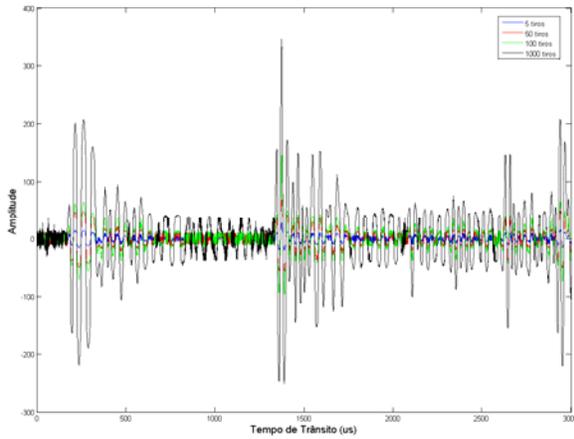


Figura 7 – Empilhamento de 5, 50, 100 e 500 tiros para melhorar a razão S/R.

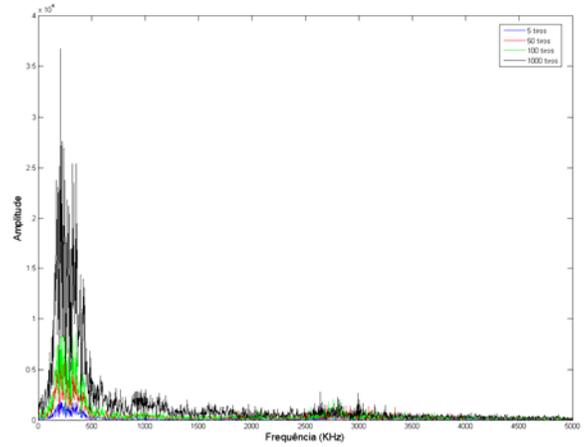


Figura 8 – Espectro Freqüência x Amplitude dos dados empilhados para 5, 50, 100 e 500 tiros.

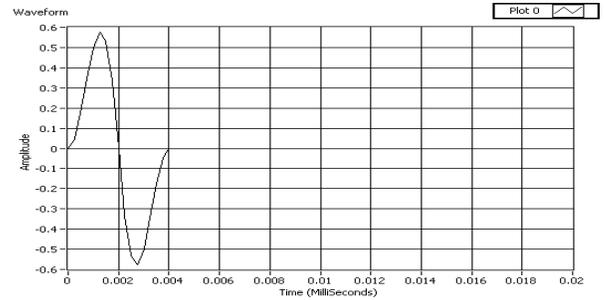
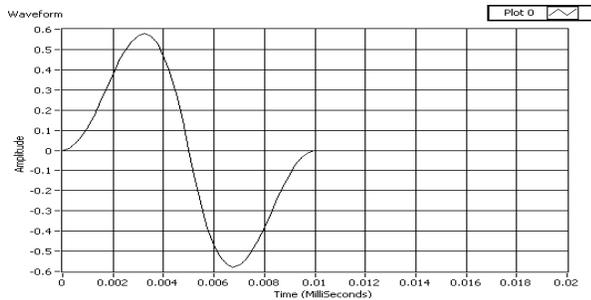


Figura 9 - Formas de Onda utilizadas para excitar o transdutor utilizado como fonte. Esquerda

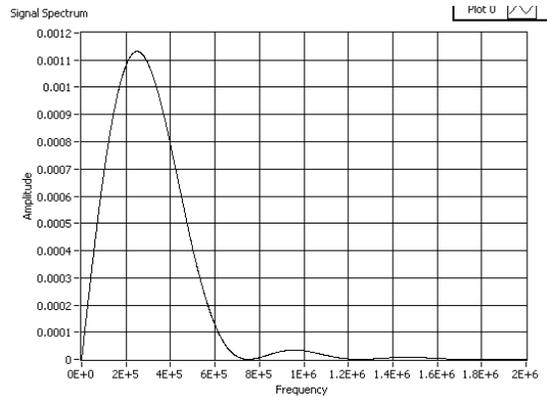
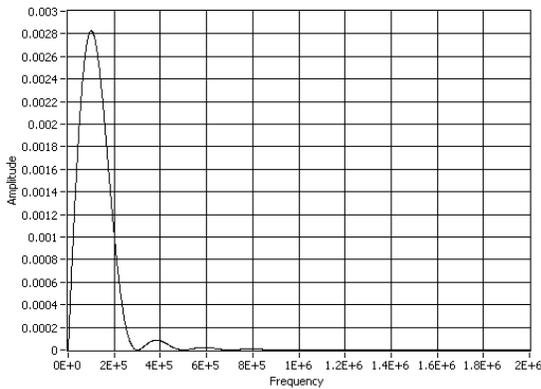


Figura 10 – Espectro de Freqüências das Formas de Onda utilizadas para excitar o transdutor fonte. Esquerda 100KHz, direita 250KHz.

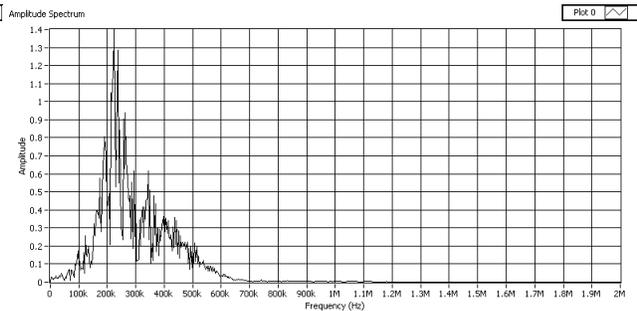
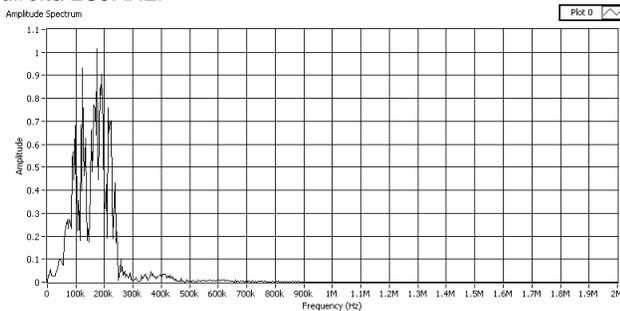


Figura 11 – Espectro de Freqüências dos sinais registrados. Esquerda 100KHz, direita 250KHz.

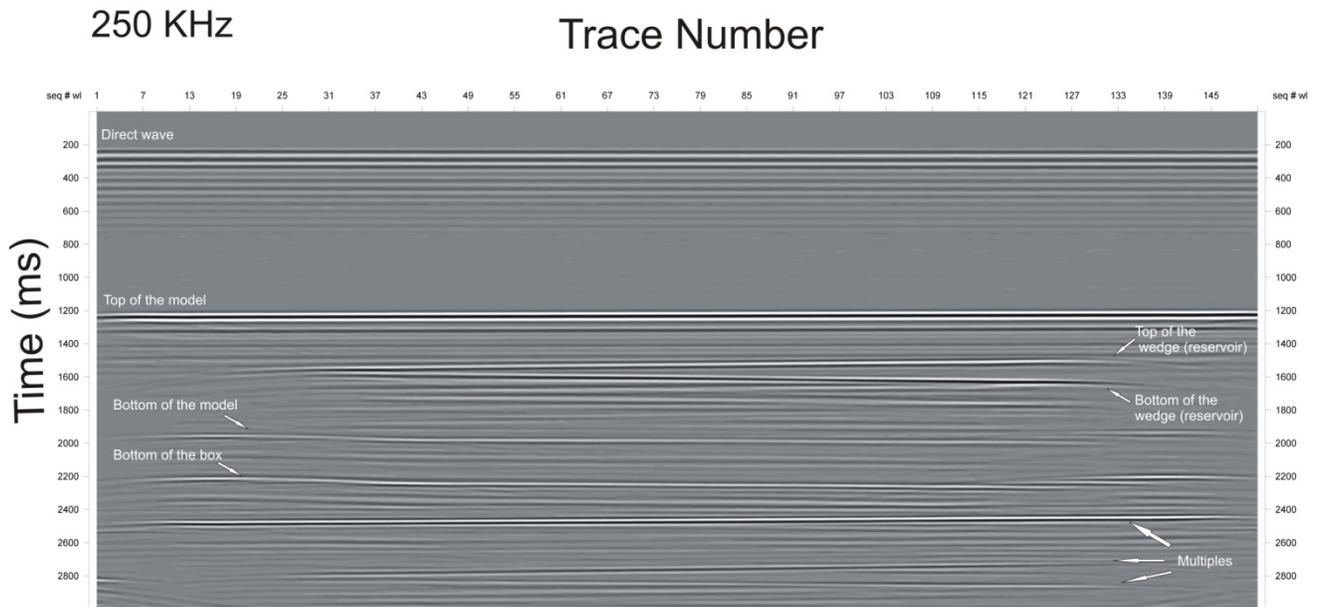
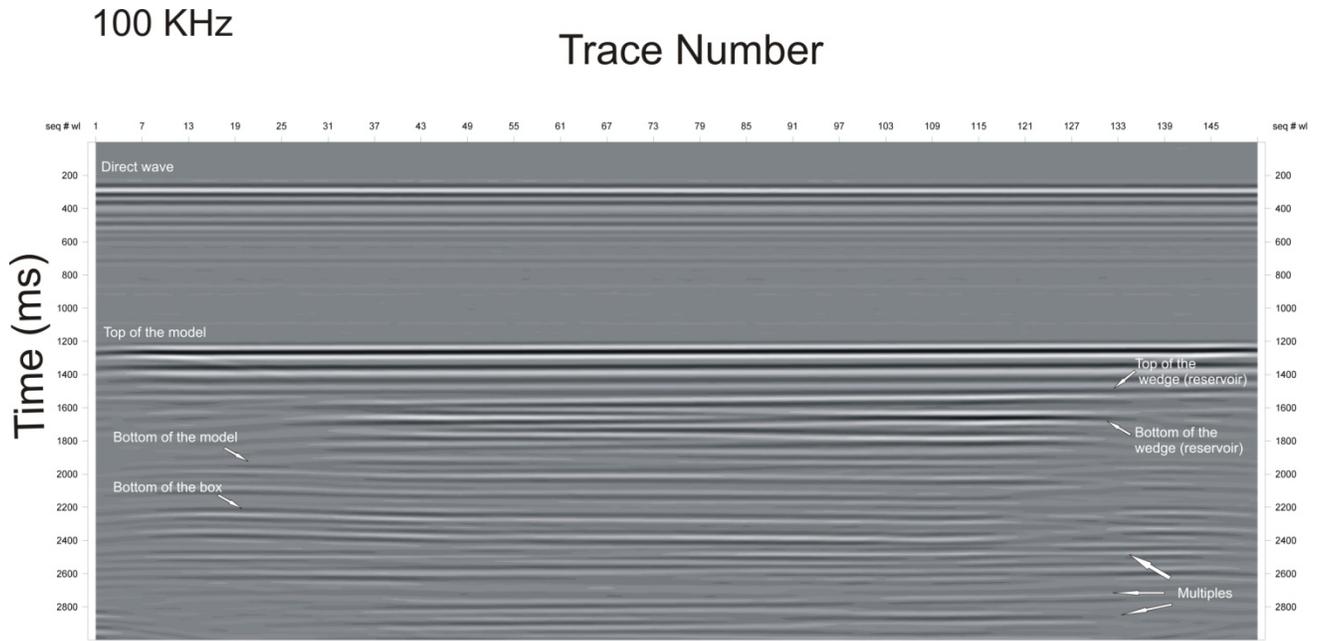


Figura 12 – Sismogramas obtidos com os levantamentos com frequência 100 KHz e 250 kHz. Observe o efeito de “tuning” no sismograma de 100 KHz, entre os traço 1 a 91.