



Ensaio de sísmica rasa multicomponente 9-c

Daiane Rossi Rosa¹ & Liliana Alcazar Diogo¹, ¹Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (IAG/USP)

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III 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

Motivated by the advantages that multicomponent seismic data can offer to shallow exploration, in this work preliminary multicomponent-9C data acquisition tests were performed. Different sources to create shearing component were used, in order to compare the efficiency of them and to verify how much energy in one component is registered in the other components.

To create P wave, a sledge hammer was shocked on a metal plate coupled on the surface. To create S wave, the same sledge hammer was shocked on a metal plate coupled in bent ramps with slopes of 48° approximately, in the laterals of the edges of a metal plate, and in the laterals of a timber.

Shear reflected waves were clearly observed, but none of sources was totally effective in the generation of the S wave with proper resolution to identify shallower interfaces.

Introdução

A sísmica de reflexão com ondas P tem sido bastante utilizada para investigações rasas, pois permite imagear as estruturas de maneira contínua, em vários casos com boa resolução na escala de investigação entre 5 a 100 metros (Knapp & Steeples, 1986a, 1986b; Miller et al., 1988, 1990; Black et al., 1994; Jeng, 1995; Steeples et al., 1997). A geração da energia compressional e a identificação das ondas P nos sismogramas são bem mais efetivas do que para a energia de cisalhamento. No entanto, há grandes incentivos para o estudo e desenvolvimento de técnicas empregando ondas S, superando algumas deficiências do uso das ondas P, uma vez que são menos afetadas pelo ruído gerado pelo tráfego em áreas urbanas e pela interferência do *ground roll*; são menos atenuadas em materiais inconsolidados e secos, e podem indicar melhor as mudanças litológicas e detectar refletores abaixo do nível d água (Goforth & Hayward, 1992; Dasios et al., 1999).

O uso integrado das ondas P e S pode trazer várias vantagens, possibilitando a determinação de um modelo mais preciso e completo das estruturas geológicas em

subsuperfície. Além disso, sabe-se que a informação das velocidades das ondas P e S se relacionam diretamente com as propriedades elásticas do meio, possibilitando a identificação anisotropia do meio e a obtenção dos módulos de elasticidade, importantes para a caracterização e avaliação das propriedades mecânicas dos maciços.

A utilização de dados multicomponente-9C oferece a possibilidade de resultados ainda melhores, em especial tratando-se de dados de sísmica rasa (Ata et al., 1993 e Dasios et al., 1999), pois, a interpretação complementar entre as diversas componentes permite observar refletores não visíveis em registros com apenas uma componente e confirmar a presença de reflexões, por vezes duvidosa, devido à estreita janela de afastamentos em que o sinal refletido é observado livre de ruídos característicos à escala de investigação rasa. Apesar das vantagens dos levantamentos multicomponente na escala de investigação rasa, encontram-se poucos trabalhos publicados nessa área.

Neste trabalho realizaram-se ensaios para a aquisição de registros multicomponente 9-C: foram utilizados diferentes expedientes para gerar a componente de cisalhamento, a fim de comparar a eficiência das diferentes fontes de energia e verificar o quanto da energia gerada em uma componente é registrada nas outras componentes; e procurou-se avaliar a viabilidade da obtenção do modelo de velocidade-profundidade para as ondas P e S na região.

Metodologia

Para efetuar a aquisição dos dados sísmicos multicomponente (9-C) é necessária a configuração da fonte e dos geofones, ambos com três componentes (vertical, radial e transversal). Para cada componente de fonte são registradas três componentes, envolvendo a geração e registro de onda P polarizada na direção de propagação da onda, no plano vertical, e de ondas S polarizadas perpendicularmente à direção de propagação, nos planos vertical (SV) e horizontal (SH). O registro das três componentes neste trabalho correspondeu a um arranjo de três geofones, um de componente vertical e dois de componente horizontal (radial e transversal) (Figura 1), simulando um geofone de três componentes e possibilitando o registro de dados sísmicos de reflexão multicomponente (9-C) (Figura 2).

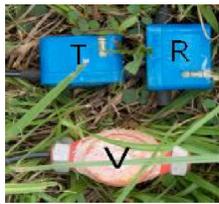


Figura 1 – Arranjo dos três geofones simulando um único geofone de três componentes. V: componente vertical, T: componente transversal e R: componente radial.

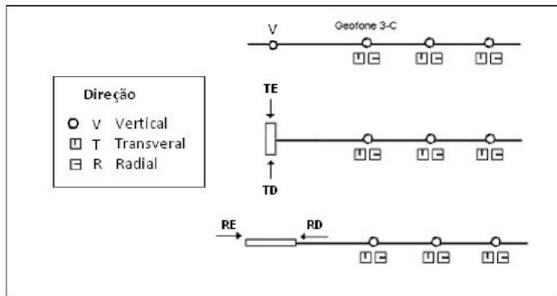


Figura 2 - Ilustração da direção da linha sísmica, orientação da fonte e dos geofones. O arranjo receptor com três orientações das componentes dos geofones e as três direções da fonte corresponde às nove componentes.

Na convenção para a nomenclatura de cada componente, a primeira letra (maiúscula) indica a direção da aplicação da fonte e a segunda letra (minúscula) indica a orientação da componente do geofone, sendo as letras Z (ou V) para as componentes verticais, X (ou R) para as componentes horizontais radiais e, Y (ou T) para as componentes horizontais transversais, conforme indicado na Figura 3.

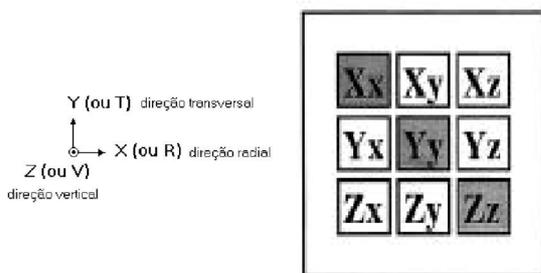


Figura 3 - Organização esquemática das nove componentes que correspondem às diferentes direções da fonte (letra maiúscula) e orientações das componentes dos geofones (letra minúscula).

A aquisição empregando uma fonte que gera componente de cisalhamento (denominada por componente horizontal no esquema de aquisição) sempre é realizada duas vezes em sentidos opostos, denominados aqui por D (direita) e E (esquerda)

conforme o referencial indicado na Figura 1. A aquisição em sentidos opostos fornece dois registros no mesmo ponto de tiro com a polaridade da onda S invertida. A subtração desses registros promove um cancelamento da energia compressional que tenha sido gerada e melhora a visualização das ondas de cisalhamento.

O levantamento dos dados foi efetuado com um sistema de 4 sismógrafos GEODE de 24 canais cada, totalizando 96 canais. Com o número de canais disponíveis, foram montados 32 receptores de 3 componentes. Foram empregados geofones verticais com frequência dominante de 40Hz, e geofones horizontais com frequência dominante de 28Hz, correspondendo aos geofones comumente empregados nos levantamentos convencionais de uma componente, respectivamente para as ondas P e S.

Foram realizadas 2 campanhas de testes. Em todos os ensaios, tanto para gerar onda compressional (P) como para gerar onda de cisalhamento (S) utilizou-se a marreta como fonte de energia impactada de diferentes formas.

O **Teste 1** foi do tipo análise de ruído: o ponto de tiro foi executado na mesma posição, enquanto que os grupos de geofones foram deslocados de modo a garantir continuidade dos afastamentos fonte-receptor. O afastamento mínimo foi de 1 metro e o máximo de 128 metros, com espaçamento entre o arranjo de receptores de 1 metro. Foram realizadas 4 movimentações dos 32 pontos receptores. Como fonte de energia utilizou-se a marreta impactada sobre uma placa de metal: acoplada na superfície do solo, para gerar onda P, e acoplada em rampas cavadas com inclinações de aproximadamente 48º, para gerar onda S (Figura 4).



Figura 4 – Ilustração das 4 rampas inclinadas e seus posicionamentos em relação à linha sísmica (em branco).

No **Teste 2** foi realizado um ensaio do tipo pseudo-análise de ruído, ou seja, os geofones permaneceram na mesma posição e o ponto de tiro foi deslocado. O afastamento mínimo foi de 1 metro e o máximo de 96 metros, com espaçamento entre os grupos de receptores de 1 metro. Gerou-se onda P com a mesma fonte empregada no Teste 1, e para gerar onda S utilizou-se a marreta impactada nas laterais de uma placa de metal

com bordas laterais (Figura 5) e a mesma marreta impactada nas laterais de uma tora de madeira (Figura 6). A aquisição com as diferentes fontes foi realizada com os arranjos de geofone no mesmo local.



Figura 5 – Ilustrações da placa de metal com bordas laterais.

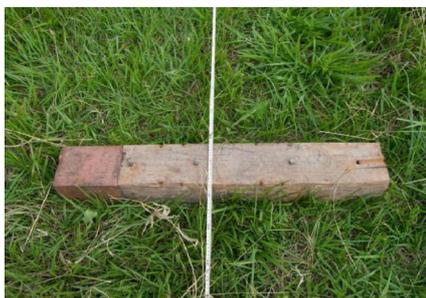


Figura 6 – À esquerda ilustração da tora de madeira na direção transversal à linha sísmica.

Para o processamento dos dados, utilizou-se o pacote SU - Seismic Unix (Cohen & Stockwell, 2006 e 2008).

A primeira etapa do tratamento dos dados consistiu em separar os registros referentes às diferentes componentes. A segunda etapa consistiu na aplicação de ferramentas para melhorar a visualização dos dados, como ganhos e filtros de frequência. O passo seguinte foi a interpretação dos eventos sísmicos, procurando identificar as ondas direta, refratada e refletida nos sismogramas obtidos.

Para comprovar os registros correspondentes às ondas S, verificou-se se os eventos interpretados apresentam polaridade invertida para a mesma componente em sentidos opostos da fonte (indicados na nomenclatura pelas letras D e E).

Nos eventos identificados, foram realizadas as leituras dos tempos de chegada e ajustadas as curvas, assumindo-se teoria de camadas planas, para uma interpretação preliminar dos valores de velocidade.

Geologia da área de estudo

A área utilizada para os testes de campo, situada na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, é constituída predominantemente por sedimentos areno-argilosos de idade terciária, sobrepostos ao embasamento granitognáissico de idade pré-cambriana, com diferentes graus de intemperização.

Dados de poços (Porsani *et al.*, 2004) mostram que a espessura dos sedimentos na área da pesquisa não ultrapassa 53 m. A correlação entre as colunas litoestratigráficas de três poços é representada na Figura 7: a partir da superfície, foram identificadas três unidades geológico-geotécnicas: aterro, sedimentos da Bacia de São Paulo e o embasamento cristalino. O aterro varia de 4,5m a 6,0m de espessura e é caracterizado por argila arenosa a siltosa, com alguns níveis intercalados de silte, ora argiloso, ora arenoso. Os sedimentos da Bacia de São Paulo compõem um pacote sedimentar constituído por horizontes argilosos e arenosos, intercalados entre si. Os testemunhos do embasamento foram descritos pelo termo “granito-gnaiss”. A parte superior do topo rochoso, com espessura média de 4 m, apresenta-se muito alterada e fraturada. Abaixo desta camada, a rocha apresenta-se praticamente sã, coerente e pouco fraturada (em geral, menos de 5 fraturas/m), com eventuais intercalações de rocha medianamente alterada e medianamente fraturada (5 a 10 fraturas/m). Até a profundidade máxima prospectada no maciço rochoso (34 m no poço P3), foram identificadas algumas descontinuidades subhorizontais.

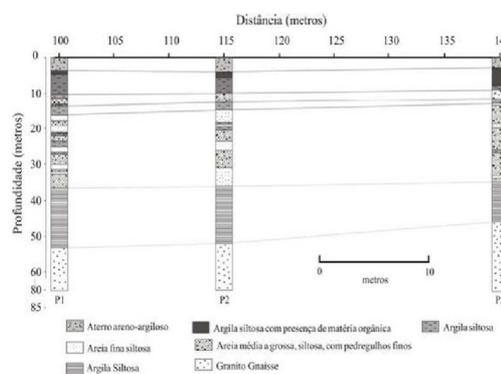


Figura 7 – Correlação entre os perfis litológicos dos poços. (Extraído de Porsani *et al.*, 2004). Os ensaios realizados estão mais próximos do poço P3.

Ensaio de sísmica rasa desenvolvidos no mesmo local deste trabalho (Le Diagon, 2000 e Diogo *et al.*, 2004) forneceram resultados compatíveis com as informações litológicas acima.

Resultados

Os dados adquiridos no **Teste 1** utilizando uma placa metálica acoplada ao solo em uma rampa inclinada para gerar de energia de cisalhamento mostraram nitidamente eventos refletidos para onda S. Foram identificadas duas reflexões da onda S (Figura 8).

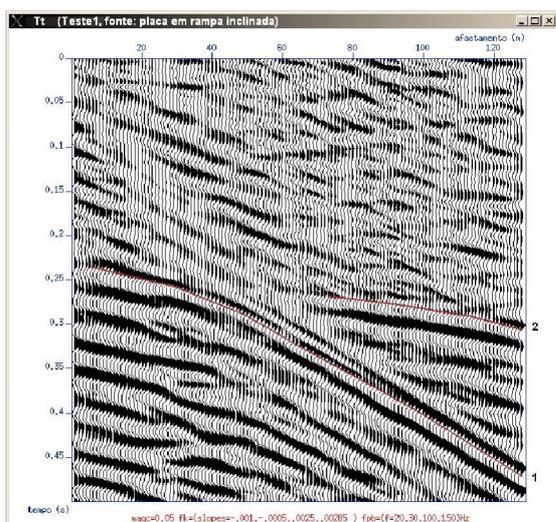


Figura 8 – Sismograma gerado da subtração das componentes T_t , após o processamento dos dados. Em vermelho são identificados dois eventos refletidos para a onda de cisalhamento.

Efetou-se a leitura dos tempos dessas reflexões e, assumindo-se um modelo de camadas planas, realizou-se um ajuste linear no domínio $X^2 - T^2$ (o que significa transformar a equação de tempo de percurso de uma hipérbole em uma reta) para obter os valores de velocidade (de RMS) e dos tempos normais. Os valores encontrados foram: $V_{RMS}=297\text{m/s}$ e $t_0=0,239\text{s}$, para a reflexão 1 e $V_{RMS}=728\text{m/s}$; $t_0=0,249\text{s}$ para a reflexão 2.

A partir dos valores acima, investigou-se o modelo intervalar. O cálculo utilizando o programa suintvel do pacote SU forneceu os valores: $V_1=297\text{m/s}$, $h_1=35,5\text{m}$ e $V_2=3330\text{m/s}$ $h_2=16,6\text{m}$. Só os erros associados à teoria utilizada nesse cálculo não justificam a discrepância dos valores citados acima em relação às informações geológicas que são conhecidas na área investigada (Figura 7). A velocidade de 3330 m/s também está muito alta para a onda S no local. Acredita-se, portanto, que deveria haver uma reflexão de onda S em interface superior às observadas.

Também não foram observados eventos para onda direta ou refratada que apresentassem inversão de polaridade nos registros de componente horizontal para a fonte impactada em sentidos opostos.

Visto que houve dificuldade na observação de eventos associados às velocidades das ondas S próximas à superfície, as aquisições realizadas no **Teste 2** tiveram como principal objetivo utilizar expedientes que gerassem menos energia compressional e mais energia de cisalhamento.

Os registros do **Teste 2** apresentaram-se, em geral, mais ruidosos que os dados do Teste1. Os dados obtidos

utilizando a tora de madeira (Figura 6) para a fonte de energia apresentaram-se melhores que os gerados com a placa de metal (Figura 5).

A velocidade medida para o evento identificado como onda S direta (Figura 9) para os dados gerados com a tora de madeira na componente transversal (T_t) foi de 341m/s. Isso foi concluído a partir da inversão de polaridade entre as componentes transversais obtidas com a fonte realizada nas direções direita e esquerda.

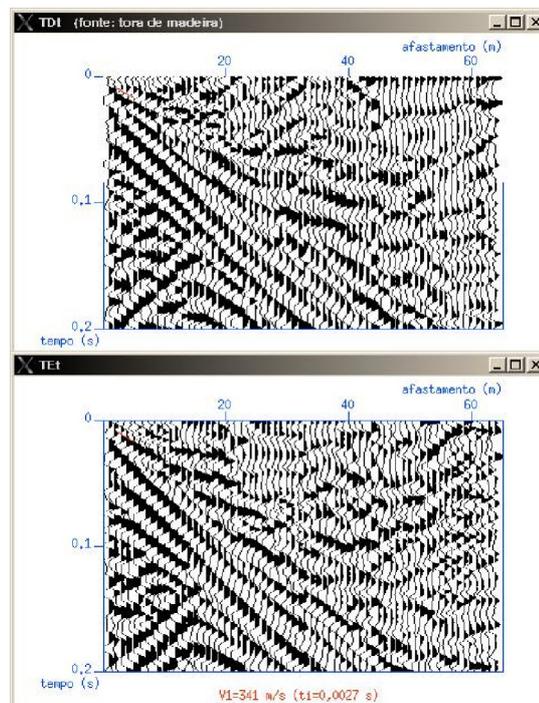


Figura 9 – Acima: sismograma da componente Tdt e abaixo: sismograma TEt , com a identificação da onda direta (em vermelho) e o valor do ajuste se sua velocidade.

Adotando o mesmo procedimento para identificação de ondas S na componente radial (R_r) (Figura 10), observou-se a velocidade de 343 m/s para o evento identificado como onda S direta, para os dados gerados também com a tora de madeira. Nesta componente também foi observado uma onda refratada, cuja velocidade medida foi de 616 m/s, em uma interface situada a 2 m de profundidade. De acordo com as informações litológicas (Figura 7), esse poderia ser um contato entre o aterro e sedimentos não consolidados. Entretanto, como a velocidade da onda P direta observada no sismograma V_v foi de 545 m/s, o valor de 343 m/s é muito alto para onda S direta. Esperava-se um valor de VS no local inferior a 315m/s, de forma que a razão VP/VS fosse superior a 1.73, uma vez que o terreno trata-se de material não consolidado (solo).

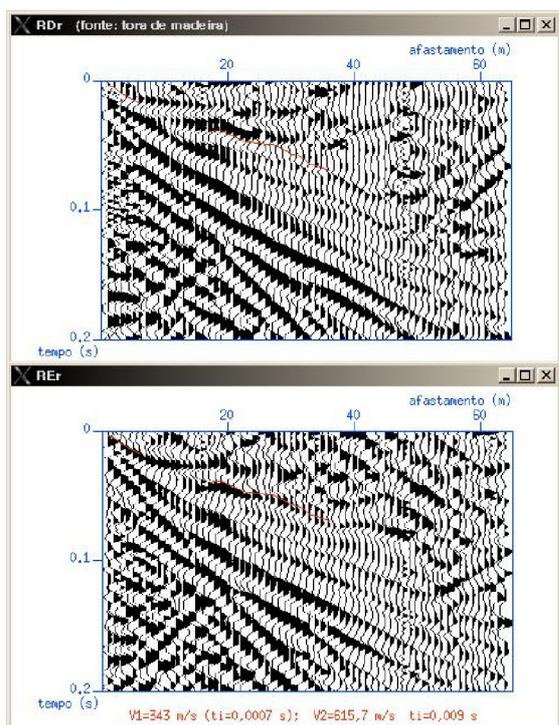


Figura 10 – Ondas S direta e 1ª refratada. Acima: sismograma da componente RDr e abaixo: sismograma da componente REr. Em vermelho V1 indica a velocidade da onda direta com o tempo de interseção deslocado no zero e V2 a velocidade da onda 1ª refratada, também com o tempo de interseção deslocado no zero.

Nos dados do Teste 2 (Figura 11), após aplicação do filtro fk, também foi possível identificar uma reflexão compatível com a primeira reflexão observada no dados do Teste1 (Figura 7).

Discussão e Conclusões

Os dados gerados com a placa metálica acoplada ao solo em uma rampa inclinada (Teste 1), mostraram nitidamente eventos refletidos para onda S (Figura 8). Entretanto, esse expediente para a fonte gerou muita energia compressional, e não foi possível identificar eventos para onda S associados à camada superficial de baixa velocidade (ondas direta, refratada e refletida), não permitindo a obtenção do modelo intervalar para as velocidades das ondas S.

Das fontes utilizadas no Teste 2, observaram-se resultados coerentes entre a placa (Figura 5) e a tora de madeira (Figura 6), porém, a tora de madeira foi a que permitiu identificar alguns eventos relacionados à onda S com maior confiança. Mas ainda assim, se faz necessário buscar outros tipos de fontes para gerar energia de cisalhamento.

Dos dados adquiridos, não foi possível fechar um modelo geológico em subsuperfície para a área investigada, uma vez que nenhuma das fontes, nos ensaios realizados, foi totalmente efetiva na geração de onda S com resolução adequada para imagear as interfaces mais superficiais; e também porque há irregularidades nas interfaces, requerendo que a aquisição dos dados seja conduzida segundo técnicas de refração e de reflexão capazes de permitir a interpretação de modelos de camadas não plano-horizontais. Os dados adquiridos neste trabalho são suficientes para orientar a escolha dos parâmetros de aquisição para esses levantamentos.

Deve-se também considerar que o local é bastante heterogêneo e talvez existam anisotropias locais, gerando complicações na interpretação dos dados. Xia *et al.* (2002) mostram que o método de refração rasa da onda S pode fornecer velocidades de uma onda convertida maiores que de uma onda SH em locais onde as camadas não são completamente horizontais.

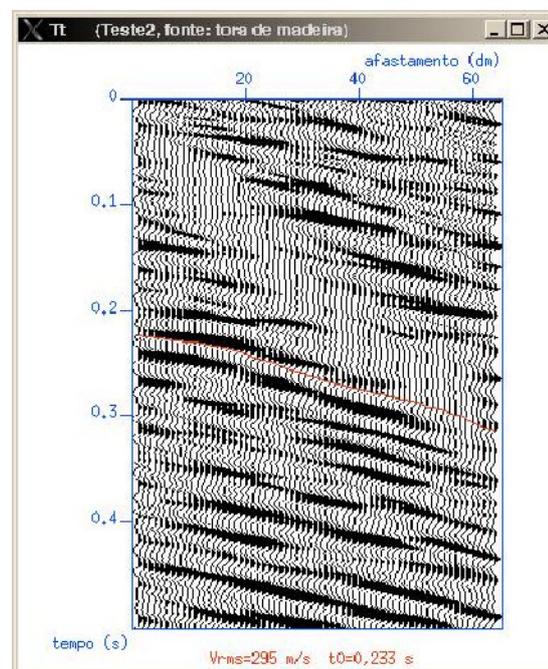


Figura 11 – Sismograma da componente Tt (Teste 2), com a identificação de evento refletido.

Agradecimentos

À FAPESP, pelo apoio referente ao Projeto Multi-usuário, processo n° 04/08834-9 e pela bolsa de Iniciação Científica, processo n° 06/57820-6R.

Referências

- ATA EZ, CORRIGAN D, McMECHAN GA & GAISER JE. 1993. Estimation of near-surface elastic parameters using multicomponent seismic data. *Geophysics*, 58: 1017-1029.
- BLACK RA, STEEPLES DW & MILLER RD. 1994. Migration of shallow seismic reflection data. *Geophysics*, 59: 402-410.
- COHEN JK; STOCKWELL JW CWP/SU: Seismic Unix Release 39: A Free Package for Seismic Research and Processing. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines, Colorado, Estados Unidos, 2006. Disponível em: <http://www.cwp.mines.edu.cwpcodes/index.html> ou <ftp://ftp.cwp.mines.edu>.
- COHEN JK; STOCKWELL JW CWP/SU: Seismic Unix Release 41: A Free Package for Seismic Research and Processing. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines, Colorado, Estados Unidos, 2008. Disponível em: <http://www.cwp.mines.edu.cwpcodes/index.html> ou <ftp://ftp.cwp.mines.edu>.
- DASIOS A, McCANN C, FENNING P. 1999. Seismic imaging of the shallow subsurface: shear-wave case histories. *Geophysical prospecting*, 47(4): 565.
- DIOGO LA, LE DIAGON FMM & PRADO RL. 2004. Bedrock imaging using post-critical shallow seismic reflection data. *Journal of Applied Geophysics*, 57: 1-9.
- GOFORTH T & HAYWARD C. 1992. Seismic reflection investigations of a bedrock surface buried under alluvium. *Geophysics*, 57(9): 1217-1227.
- JENG Y. 1995. Shallow seismic investigation of a site with poor reflection quality. *Geophysics*, 60: 1725-1726.
- KNAPP RW & STEEPLES DW. 1986a. High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Instrumentation. *Geophysics*, 51: 276-282.
- KNAPP RW & STEEPLES DW. 1986b. High-resolution common-depth-point seismic reflection profiling: Field acquisition and parameter design. *Geophysics*, 51: 283-294.
- LE DIAGON FMM. 2000. Investigações sobre metodologias de aquisição e interpretação de dados sísmicos de reflexão rasa para imageamento do topo rochoso. 82 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MILLER RD & STEEPLES DW & BRANNAN M. 1988. Mapping a bedrock surface under dry alluvium with shallow seismics. *Geophysics*, 54(12): 1528-1534.
- MILLER RD & STEEPLES DW. 1990. A shallow seismic reflection survey in basalts of the Snake River Plain, Idaho. *Geophysics*, 55(6): 761-768.
- PORSANI JL, BORGES WR, ELIS VR, DIOGO LA, HODOO FY, MARRANO A & BIRELLI CA. 2004. Investigações geofísicas de superfície e de poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. Vol. 22(3): 245-258.
- STEEPLES DW, GREEN AG, McEVILLY TV, MILLER RD, DOLL WE & RECTOR JW. 1997. A workshop examination of shallow seismic reflection surveying. *The Leading Edge*, 16(11): 1641-1646.
- XIA J, MILLER RD, PARK CB, WIGHTMAN E & NIGBOR R. 2002. A pitfall in shallow shear-wave refraction surveying. *Geophysics*, 51: 1-9.