

INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE GEOFONE NAS MEDIDAS DE VIBRAÇÃO EM SOLO

Lucas Roncarati GOMES¹; Jair Carlos KOPPE²; Enrique MUNARETTI³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lucasroncarati@hotmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jkoppe@ufrgs.br; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, enrique@ufrgs.br

RESUMO

Os principais impactos ambientais decorrentes de desmontes de rochas com explosivos estão associados à geração de vibrações no maciço circundante e pressão acústica. Um dos aspectos mais críticos do monitoramento de vibrações é a fixação (acoplamento) dos geofones no campo. Considerando-se diferentes recomendações de fixação de geofones no terreno, nesse trabalho foi estudada a influência de quatro métodos de fixação nas medidas de vibração. Para este propósito, o primeiro geofone foi colocado sob um saco de areia, o segundo foi enterrado no solo, o terceiro foi cravado no solo e o quarto foi livremente colocado sobre o solo. Estes geofones foram dispostos lado a lado e as vibrações de desmontes com explosivos de uma mina de carvão a céu aberto foram monitoradas. Vibrações em termos de velocidade de partícula de pico para os diferentes métodos de acoplamento foram analisadas. Dada a tolerância especificada para erros instrumentais dos sismógrafos, leituras anômalas ocorreram em alguns casos. As formas de onda do geofone enterrado foram então comparadas com as dos demais. Os resultados indicaram que o desacoplamento é mais provável com o geofone sob o saco de areia. No entanto, os geofones sobre o solo e cravados também são propensos ao desacoplamento. Os resultados obtidos indicam que o enterramento do geofone deve ser o método usado para fixação ao solo.

Palavras-chave: Acoplamento de geofone. Velocidade de partícula de pico. Monitoramento sismográfico.

ABSTRACT

The main environmental impacts from rock blasting are ground vibrations and air overpressure. One of the most critical aspects of vibration monitoring is the mounting (coupling) of geophones in the field. From different mounting recommendations, the influence of four of these methods on vibration measurements was studied. For this purpose, the first geophone was sandbagged, the second one was buried in soil, the third one was spiked and the fourth one was placed freely on the ground. These geophones were mounted side by side and ground vibrations at an opencast coal mine were monitored. Vibrations in terms of peak particle velocity for the different coupling methods were analyzed. Given the specified tolerance for instrumental errors of the seismographs, anomalous readings occurred in some cases. The waveforms of the buried geophone were then compared with those of the others. The results indicated that decoupling is most likely with the sandbagged geophone. However, surface and spiked geophones are also prone to decoupling. The results showed that the method of buried geophones in soil should be used.

Key-Words: Geophone coupling. Peak particle velocity. Ground vibration monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Um dos aspectos mais críticos do monitoramento sismográfico é a fixação de geofones no campo. O bom acoplamento refere-se ao geofone que mantém um contato adequado com o solo. O acoplamento fraco pode causar trepidação do geofone, resultando em níveis de vibração distorcidos, frequentemente mais altos (Instantel, 2013).

A maioria das recomendações (ABNT, 2005; Geosonics, 2013; Instantel, 2013; Wheeler, 2004) concorda que o melhor acoplamento pode ser alcançado enterrando o geofone quando a superfície de medição consistir em solo. O enterramento é desejável para aceleração de partículas superior a 0,2 g, mas é essencial se for maior que 1,0 g (ISEE, 2015; ISRM, 1992; Stagg e Engler, 1980).

Se o atrito entre o geofone e a superfície de monitoramento for suficiente para manter o geofone no lugar, o que é esperado a uma aceleração menor que 0,2 g, nenhum enterramento ou fixação é necessário (ISEE, 2015; ISRM, 1992; Stagg e Engler, 1980). Para Dowding (1996), abaixo de 0,3 g as possibilidades de trepidação do geofone são pequenas, e este pode ser colocado sobre uma superfície de medição horizontal sem enterramento ou dispositivo para fornecer uma força de retenção.

Muitos fabricantes fornecem seus sismógrafos com cravos para fixação do geofone e recomendam usá-los. Os cravos podem ser eficazes para acelerações do solo abaixo de 1,0 g (ISEE, 2015; Stagg e Engler, 1980). ISRM (1992), por outro lado, desencoraja o uso de cravos, uma vez que estes podem afetar a resposta do movimento gravado. A NBR 9653 (ABNT, 2005) admite o uso de cravos de comprimento máximo de 20 cm, desde que o sistema não fique em balanço.

No que diz respeito à utilização de sacos de areia para melhorar o acoplamento, Instantel (2013) observa que um saco de areia pode ser usado onde os níveis de velocidade são muito baixos, porém não especifica o nível de vibração. Stagg e Engler (1980) mencionam que os sacos de areia podem ser usados quando a aceleração de partícula esperada está abaixo de 1,0 g. Por outro lado, Robertson (1993) sugere que a utilização de sacos de areia sobre geofones deve ser evitada.

Os parágrafos anteriores revelam que os métodos sugeridos de fixação do geofone diferem, e são por vezes contraditórios. Embora o enterramento seja reconhecido como o melhor método, métodos alternativos são comumente usados. Alguns deles podem não fornecer acoplamento suficiente, resultando em medições não acuradas da vibração do solo. O objetivo deste estudo é, portanto, avaliar os métodos de acoplamento de geofone mais comuns e sua influência nos parâmetros de vibração.

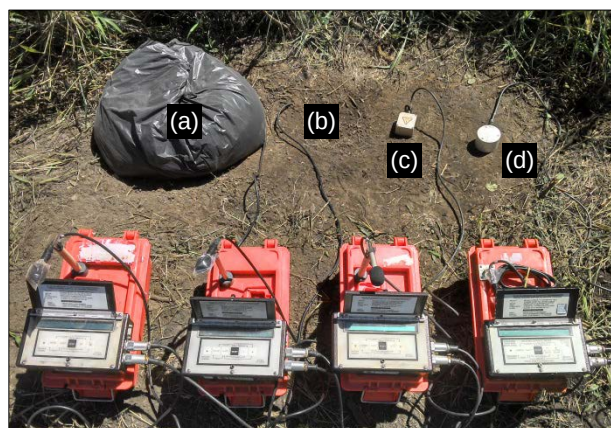
2 METODOLOGIA

Dez detonações em carvão foram monitoradas na mina a céu aberto B3, pertencente à empresa Copelmi Mineração Ltda., no município de Butiá/RS. Quatro sismógrafos White, modelo Mini-Seis, foram montados lado a lado usando quatro métodos diferentes para registrar simultaneamente

as vibrações do solo. Esses instrumentos atendem ou excedem as especificações de desempenho definidas por ISEE (2014). Uma área foi limpa para permitir a instalação dos geofones no solo sem intervenção da grama.

Quatro métodos comuns de instalação de geofone foram selecionados para este estudo (Figura 1). Sobre o primeiro geofone foi colocado um saco de areia de 30 kg de modo que todos os lados do saco estivessem em contato com o solo. O segundo foi completamente enterrado no solo, sendo o solo firmemente compactado ao redor e sobre o geofone. O terceiro geofone com cravos fixados foi firmemente pressionado no solo de tal modo que a sua base estivesse em contato direto com o solo. O quarto foi colocado sobre uma superfície horizontal sem qualquer dispositivo para fornecer uma força de retenção.

Figura 1 - Quatro métodos de instalação de geofones usados neste estudo: (a) sob saco; (b) enterrado; (c) cravado; (d) sobre o solo.



3 RESULTADOS

Um total de 40 eventos, quatro por detonação, foram registrados durante o programa de monitoramento. Estes eventos foram analisados quanto às velocidades das partículas e os resultados são apresentados na Tabela 1. A velocidade de partícula de pico (*peak particle velocity*, PPV) é a velocidade máxima em qualquer dos componentes perpendiculares medidos. O método da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) foi aplicado para calcular frequências dominantes do movimento do solo. A frequência na maior amplitude espectral foi considerada como frequência dominante e

corresponde à frequência associada à velocidade de partícula de pico. A aceleração das partículas foi calculada pela diferenciação dos históricos de velocidade à taxa de 1024 amostras por segundo por canal.

outros três geofones foram realizadas em relação às do enterrado. Para fins de calibração, ISEE (2014) exige uma acurácia de $\pm 5\%$ ou uma diferença máxima de 0,02 pol./s (0,51 mm/s), o que for maior. Dados dois sismógrafos, estas especificações permitiriam uma diferença entre os dois de até 10% ou 0,04 pol./s (1,02 mm/s), o que for maior.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Assumindo-se que o enterramento do geofone proporciona o melhor acoplamento, as leituras dos

Tabela 1 – Resultados de vibração do solo para diferentes métodos de instalação

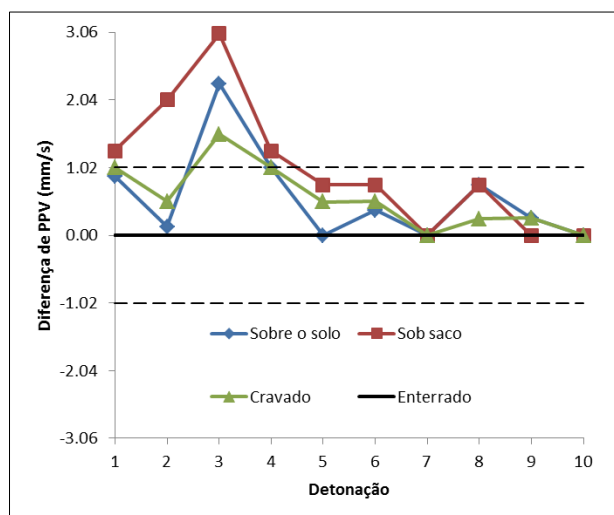
Detonação	Método de instalação	PPV (mm/s)	Frequência (Hz)	Aceleração (g)
1	Sobre o solo	6,22	6,0	0,05
	Sob saco	6,60	6,4	0,09
	Cravado	6,35	6,2	0,05
	Enterrado	5,33	6,4	0,05
2	Sobre o solo	1,65	23,2	0,04
	Sob saco	3,56	39,3	0,08
	Cravado	2,03	34,1	0,05
	Enterrado	1,52	17,0	0,04
3	Sobre o solo	5,84	39,3	0,13
	Sob saco	6,60	32,0	0,15
	Cravado	5,08	36,5	0,13
	Enterrado	3,56	26,9	0,08
4	Sobre o solo	3,56	8,5	0,11
	Sob saco	3,81	8,9	0,08
	Cravado	3,56	8,6	0,12
	Enterrado	2,54	8,5	0,05
5	Sobre o solo	2,29	20,4	0,07
	Sob saco	3,05	42,6	0,07
	Cravado	2,79	23,2	0,05
	Enterrado	2,29	23,2	0,05
6	Sobre o solo	5,97	4,4	0,05
	Sob saco	6,35	15,0	0,05
	Cravado	6,10	13,8	0,07
	Enterrado	5,59	4,4	0,05
7	Sobre o solo	1,27	7,7	0,01
	Sob saco	1,27	5,6	0,01
	Cravado	1,27	7,8	0,01
	Enterrado	1,27	5,8	0,01
8	Sobre o solo	4,57	25,6	0,08
	Sob saco	4,57	25,6	0,07
	Cravado	4,06	24,3	0,07
	Enterrado	3,81	25,6	0,05
9	Sobre o solo	4,32	3,7	0,05
	Sob saco	4,06	3,6	0,05
	Cravado	4,32	3,7	0,04
	Enterrado	4,06	3,7	0,04
10	Sobre o solo	1,02	6,2	0,01
	Sob saco	1,02	5,2	0,01
	Cravado	1,02	6,5	0,01
	Enterrado	1,02	6,3	0,01

4.1 COMPARAÇÃO DE PPV

O gráfico da Figura 2 mostra a diferença de PPV dos diferentes métodos de instalação em relação ao geofone enterrado, para todas as detonações. Dados com uma diferença de PPV maior que 1,02 mm/s foram considerados anômalos, de acordo com as especificações determinadas por ISEE (2014). Os valores de PPV do geofone sob o saco são anômalos para as detonações 1, 2, 3 e 4. Os geofones cravado e sobre a superfície ultrapassaram o limite para a detonação 3. Valores anômalos de PPV obviamente não são representativos das vibrações monitoradas no solo.

Como o acoplamento fraco é mais provável em maiores magnitudes de vibração do solo, os problemas de acoplamento não eram esperados nas detonações 1, 2, 3 e 4, porque a aceleração foi inferior a 0,2 g. Isto mostra que o desacoplamento pode ocorrer mesmo a um pequeno nível de vibração.

Figura 2 - Influência dos métodos de fixação do geofone na velocidade de partícula de pico (PPV).



4.2 COMPARAÇÃO DE FORMAS DE ONDA

Os valores de PPV pertencem a um ponto particular no histórico de vibração do solo. É possível que os valores de PPV com dois métodos de montagem diferentes sejam quase iguais, mas

seus históricos de velocidade sejam totalmente diferentes. Nesses casos, a comparação de PPV não revelará o problema de desacoplamento. Comparações de formas de onda podem revelar as diferenças, se houver. A Figura 3 mostra os históricos de velocidade do geofone enterrado sobrepostos aos históricos de velocidade do geofone sob saco para a detonação 6. O coeficiente de correlação entre duas formas de onda indica o grau de similaridade. Os coeficientes de correlação entre as formas de onda do geofone enterrado e as dos outros geofones são apresentadas na Tabela 2. Se duas formas de onda fossem idênticas, uma correlação perfeita seria obtida. Se as amplitudes diferirem, o coeficiente de correlação diminuirá. Um coeficiente de correlação baixo ou uma forma de onda distorcida pode indicar uma possibilidade de desacoplamento.

Figura 3 - Formas de onda sobrepostas dos geofones enterrado e sob saco (detonação 6).

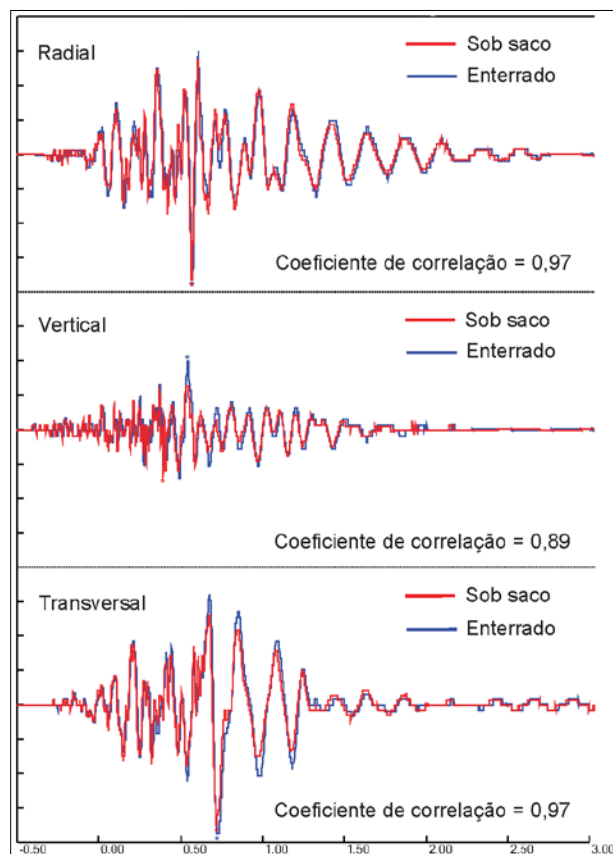


Tabela 2 - Coeficientes de correlação entre formas de onda (geofone enterrado e qualquer outro)

Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação		
		Radial	Vertical	Transversal
1	Sobre o solo	0.99	0.95	0.99
	Sob saco	0.95	0.80	0.96
	Cravado	0.98	0.96	0.99
2	Sobre o solo	0.95	0.94	0.92
	Sob saco	0.83	0.70	0.87
	Cravado	0.91	0.93	0.93
3	Sobre o solo	0.81	0.95	0.88
	Sob saco	0.82	0.88	0.79
	Cravado	0.86	0.98	0.89
4	Sobre o solo	0.90	0.83	0.82
	Sob saco	0.88	0.84	0.83
	Cravado	0.90	0.91	0.85
5	Sobre o solo	0.92	0.93	0.94
	Sob saco	0.90	0.86	0.94
	Cravado	0.91	0.94	0.92
6	Sobre o solo	0.98	0.96	0.98
	Sob saco	0.97	0.89	0.97
	Cravado	0.93	0.94	0.93
7	Sobre o solo	0.90	0.91	0.94
	Sob saco	0.93	0.86	0.94
	Cravado	0.86	0.87	0.94
8	Sobre o solo	0.98	0.96	0.97
	Sob saco	0.96	0.95	0.95
	Cravado	0.97	0.95	0.95
9	Sobre o solo	0.97	0.94	0.99
	Sob saco	0.98	0.95	0.99
	Cravado	0.97	0.97	0.99
10	Sobre o solo	0.95	0.94	0.95
	Sob saco	0.97	0.95	0.96
	Cravado	0.94	0.96	0.95

Considerando insatisfatório um coeficiente de correlação abaixo de 0,80, a sobreposição das formas de onda confirma o desacoplamento do geofone sob o saco para as detonações 2 e 3, porém não encontra problemas para as detonações 1 e 4. Os métodos de fixação com PPV anômalas que também são corroboradas por fraca correlação das formas de onda têm o desacoplamento considerado confirmado. Nos desvios de PPV que

não são confirmados pela sobreposição das formas de onda, o desacoplamento é considerado suspeito. Na Tabela 3 é apresentado um resumo de todos os métodos de montagem com desacoplamento confirmado ou suspeito. A instalação de geofone sob saco de areia é mais suscetível ao desacoplamento, embora a cravação e a colocação sobre o solo sem fixação também não sejam métodos confiáveis para a montagem do geofone.

Tabela 3 - Suspeitas e confirmações de desacoplamento

Detonação	PPV anômala	Fraca correlação das formas de onda	Consideração
1	Sob saco	—	Desacoplamento suspeito
2	Sob saco	Sob saco (Vertical)	Desacoplamento confirmado
3	Sobre o solo	—	Desacoplamento suspeito
3	Sob saco	Sob saco (Transversal)	Desacoplamento confirmado
3	Cravado	—	Desacoplamento suspeito
4	Sob saco	—	Desacoplamento suspeito

5 CONCLUSÃO

O desempenho relativo de geofones montados de quatro maneiras diferentes foi avaliado em termos de velocidade de partícula de pico (PPV). Para a tolerância dada, o geofone colocado sob saco de areia registrou valores anômalos de PPV a níveis de aceleração inferiores a 0,15 g, o que pode ser tido como suspeita de fraco acoplamento. A correlação pela sobreposição de duas formas de onda realçou a diferença entre ambas. Quanto maior a diferença, menor foi o coeficiente de correlação.

Com base neste estudo, pode-se concluir que os geofones nunca devem ser colocados sob sacos de areia independentemente dos níveis de vibração previstos. Como houve suspeita de desacoplamento com o geofone livre sobre o solo e o geofone cravado, seria sempre mais seguro não usar estes métodos para a montagem de geofones. A conclusão obtida é válida para níveis de aceleração de 0,01 g a 0,15 g e para as condições do solo no local de teste.

6 REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9653**: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2005.

DOWDING, C.H. **Construction vibrations**. 2006. 610p.

GEOSONICS. **SSU 3000LC Manual**. 2013. 53p.

INSTANTEL. **Minimate Plus Operator Manual**. 2013. 84p.

ISEE - INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. Blasting Seismograph Standards. In: **Blasters' Handbook**. 2014. p. 951–954.

_____. **ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs**. 2015. Cleveland. 10p.

ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested method for blast vibration monitoring. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.** 29(2), p. 143–156. 1992.

ROBERTSON, D.A. The neglected step to accurate blast monitoring: Proper coupling. **Proceedings 9th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research**. 1993. p. 83–98.

STAGG, M.S.; ENGLER, A.J. **Measurement of blast-induced ground vibration and seismograph calibration**. USBM report of investigation 8506. 1980.

WHEELER, R. The Importance of Proper Seismometer Coupling. **Proceedings 30th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique**. 2004. p. 147–160.