

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**LUCAS RONCARATI GOMES**

**INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE GEOFONE NOS PARÂMETROS DE  
VIBRAÇÃO**

**Porto Alegre**

**2017**

**LUCAS RONCARATI GOMES**

**INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE GEOFONE NOS PARÂMETROS DE  
VIBRAÇÃO**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.**

**Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe**

**Porto Alegre  
2017**

### CIP - Catalogação na Publicação

Gomes, Lucas Roncarati  
Influência do acoplamento de geofone nos  
parâmetros de vibração / Lucas Roncarati Gomes. --  
2017.  
65 f.

Orientador: Jair Carlos Koppe.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Desmonte de rochas. 2. Monitoramento  
sismográfico. 3. Acoplamento de geofone. I. Koppe,  
Jair Carlos, orient. II. Título.

**LUCAS RONCARATI GOMES**

**INFLUÊNCIA DO ACOPLAMENTO DE GEOFONE NOS PARÂMETROS DE VIBRAÇÃO**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

---

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti – UFRGS \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski – UFRGS \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza – UFPE \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, em especial, ao orientador Dr. Jair Carlos Koppe, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À empresa Copelmi Mineração por permitir a realização deste estudo e pelo apoio prestado por seus colaboradores.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) pelo convívio acadêmico.

À minha família pelo apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela provisão de bolsa de mestrado.

## RESUMO

Os principais impactos ambientais decorrentes de desmontes de rochas com explosivos estão associados à geração de vibrações no maciço circundante e pressão acústica. Para o monitoramento sismográfico apropriado, é fundamental que o sensor esteja bem acoplado ao meio, possibilitando a medição acurada da vibração do terreno. Devido à existência de diversas recomendações a respeito da montagem dos sensores de vibração (geofones) em campo, este estudo tem o intuito de avaliar os métodos de acoplamento de geofone mais comuns, determinando quais são aceitáveis para um adequado monitoramento sismográfico. Dessa forma, foi estudada a influência de quatro métodos de fixação nos parâmetros 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. As vibrações foram analisadas em termos de velocidade de vibração de partícula de pico, históricos temporais e frequência associada à vibração. Os resultados obtidos indicaram o desacoplamento do geofone sob saco de areia, descartando o método. O enterramento do geofone se mostrou preferível, entretanto, o uso de cravos registrou bom acoplamento. A colocação do geofone sobre o solo se mostrou aceitável de acordo com o nível de aceleração de vibração, decorrente do desmonte.

**Palavras-chave:** Desmonte de rochas. Monitoramento sismográfico. Acoplamento de geofone.

## ABSTRACT

The main environmental impacts from rock blasting are ground vibrations and air overpressure. For proper blast vibration monitoring, it is critical that the sensor be coupled to the medium, enabling accurate measurement of ground vibration. Due to the existence of several recommendations regarding the mounting of vibration sensors (geophones) in the field, this study intends to evaluate the most common geophone coupling methods, determining which are acceptable for adequate vibration monitoring. The influence of four mounting methods on vibration parameters 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. The vibrations were analyzed in terms of peak particle velocity, time histories and frequency spectra. The results indicated the decoupling of the sandbagged geophone, discarding the method. The burial of the geophone proved to be preferable, however, the use of spikes recorded good coupling. The free placement of geophone proved to be acceptable according to the expected acceleration level.

**Keywords:** Blasting. Ground vibration monitoring. Geophone coupling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perturbações originadas pelo desmonte de rochas com explosivos.....	13
Figura 2 - Fontes de pressão acústica nos desmontes de rochas. ....	16
Figura 3 - Componentes medidos das ondas de vibração. ....	17
Figura 4 - Variação do movimento de partícula com o tipo de onda: (a) compressiva; (b) cisalhamento; (c) <i>Rayleigh</i> . ....	19
Figura 5 - Aproximações sinusoidais das vibrações decorrentes das detonações....	20
Figura 6 - Histórico de vibração ou forma de onda (canal transversal). ....	23
Figura 7 - Três componentes de vibração do solo. ....	23
Figura 8 - Formas de onda e respectivos espectros de frequência. ....	25
Figura 9 - PPV vs. distância escalonada. ....	27
Figura 10 - Avanço da detonação produz curta pressão de detonação e longa pressão de explosão. ....	29
Figura 11 - Velocidades de detonação de explosivos vs. diâmetro da carga. ....	29
Figura 12 - Funcionamento interno de uma espoleta elétrica. ....	31
Figura 13 - Nomenclatura dos elementos do plano de fogo de bancada. ....	33
Figura 14 - Sismógrafo de engenharia. ....	37
Figura 15 - Sensores independentes em um geofone. ....	37
Figura 16 - Mapa de localização da mina. ....	39
Figura 17 - Perfil estratigráfico das camadas de carvão e estéril. ....	40
Figura 18 - Quatro métodos de instalação de geofones usados neste estudo: (a) sob saco; (b) enterrado; (c) cravado; (d) sobre o solo. ....	41
Figura 19 - Enterramento do geofone. ....	42
Figura 20 - Geofone com cravos. ....	42
Figura 21 - Diferenças relativas de PPV para as detonações com valor de PPV acima de 10 mm/s. ....	46
Figura 22 - Diferenças absolutas de PPV para as detonações com valor de PPV até 10 mm/s. ....	47
Figura 23 - Formas de onda sobrepostas dos geofones enterrado e sob saco (detonação 4). ....	49
Figura 24 - Histograma dos coeficientes de correlação entre formas de onda. ....	52
Figura 25 - Espectros de frequência dos geofones enterrado e sob saco (detonação 1). ....	56
Figura 26 - Espectros de frequência dos geofones enterrado e sob saco (detonação 5). ....	57
Figura 27 - Histograma dos coeficientes de correlação entre espectros de frequência. ....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características típicas dos explosivos comerciais.....	30
Tabela 2 - Resultados de vibração do solo para diferentes métodos de instalação..	43
Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre formas de onda.....	50
Tabela 4 - Frequências dominantes nas 3 componentes de vibração .....	53
Tabela 5 - Coeficientes de correlação entre espectros de frequência.....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1 MOTIVAÇÃO .....	10
1.2 OBJETIVOS .....	11
1.3 METODOLOGIA.....	11
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS	13
2.1.1 Poeira e gases tóxicos .....	13
2.1.2 Ultralancamento .....	14
2.1.3 Pressão acústica .....	15
2.1.4 Vibrações .....	16
2.2 ASPECTOS TEÓRICOS DA VIBRAÇÃO NO TERRENO .....	17
2.2.1 Aproximações Sinusoidais.....	19
2.2.2 Típicas formas de onda .....	22
2.2.3 Importância da frequência .....	24
2.2.4 Atenuação .....	26
2.3 DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS.....	28
2.3.1 O processo de detonação e produtos explosivos.....	28
2.3.2 Sistemas de iniciação .....	30
2.3.3 Plano de fogo.....	32
2.4 MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO .....	36
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	39
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	43
4.1 COMPARAÇÃO DE PPV .....	46
4.2 COMPARAÇÃO DE FORMAS DE ONDA .....	48
4.3 ANÁLISE DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIA .....	53
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	61
5.1 CONCLUSÕES .....	61
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

Na mineração ou em obras civis, o emprego de explosivos geralmente é necessário para fragmentar as rochas, especialmente as de média a alta resistência. A tarefa do desmonte de rochas com uso de explosivos é converter o maciço rochoso *in situ* em uma pilha de fragmentos com uma distribuição de tamanho apropriada para se adequar ao equipamento de escavação disponível e posterior transporte.

O meio mais econômico de fragmentação das rochas é o uso de explosivos, que fornecem grande quantidade de energia, liberada em uma escala de tempo extremamente pequena. Esta liberação de energia gera ondas de choque que percorrem o terreno. Próximo à detonação, essas ondas de choque causam dano permanente ao material circundante, que é expresso pelo fraturamento da rocha. A maiores distâncias da detonação, a onda de choque faz com que o terreno vibre e, na superfície livre, o nível alcançado pela vibração pode ser percebido por comunidades vizinhas a minerações, pedreiras e obras de construção civil.

Para o atendimento de normas regulamentadoras e para o controle da operação de detonação, o nível de vibração deve ser medido no local apropriado. O equipamento de monitoramento deve registrar a onda de vibração à medida que ela passa e é imperativo que apenas a vibração decorrente da detonação seja medida. Se o procedimento de monitoramento sismográfico adotado não estiver corretamente projetado, o registro sismográfico obtido pode não representar fielmente o movimento do solo, devido ao fraco acoplamento do sensor de vibração ao solo.

Há normas em diversos países, como a americana USBM RI 8507 (1980), a alemã DIN 4150 (1986) e a portuguesa NP 2074 (2015), que regulamentam o monitoramento sismográfico, no que diz respeito às especificações de desempenho e calibração dos sismógrafos, métodos de instalação dos sensores e limites impostos. Em âmbito nacional, a NBR 9653 (ABNT, 2005) fixa a metodologia aplicada ao monitoramento sismográfico. Associações internacionais (ISEE - *International Society of Explosives Engineers*, 2015a; ISRM - *International Society for Rock Mechanics*, 1992) e diferentes autores (Dowding, 1996; Robertson, 1993;

Stagg e Engler, 1980; Wheeler, 2004) também propõem métodos para o monitoramento sísmográfico, entretanto, não há consenso em relação à instalação dos sensores de vibração (geofones). Além de problemas relativos aos equipamentos de monitoramento, o vínculo entre o geofone e o solo fará a diferença entre medir o nível real de vibração oriunda da detonação, ou algum nível fictício causado pelo procedimento de montagem.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A elaboração do presente trabalho foi motivada pelo fato dos métodos sugeridos de fixação do geofone diferirem, e serem por vezes contraditórios. Embora o enterramento do geofone 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.

Se, por exemplo, devido ao acoplamento inadequado do geofone, o equipamento registrar níveis de vibração que não sejam os níveis verdadeiros, consequências indesejáveis podem resultar. Se o monitoramento sísmográfico registrar resultados superiores aos valores reais, limites impostos por normas podem ser erroneamente ultrapassados e a redução desses níveis de vibração pode demandar alterações no plano de fogo que afetem a economicidade da mina ou pedreira. Se os níveis registrados forem inferiores aos valores reais, altos níveis de vibração podem, eventualmente, provocar danos em estruturas próximas ou incômodo excessivo em comunidades vizinhas.

A principal necessidade dessa pesquisa é uma compreensão da técnica de monitoramento para que haja certeza de que o que está sendo registrado é a vibração induzida pela detonação.

Tendo em vista que a norma brasileira NBR 9653 (ABNT, 2005) encontra-se em revisão, os resultados dessa pesquisa também podem contribuir para o aprimoramento da norma no que diz respeito ao procedimento de instalação de geofones em campo.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é avaliar os métodos de acoplamento de geofone mais comuns e sua influência nos parâmetros de vibração, uma vez que sugestões comuns de fixação de geofone não são sustentadas por nenhuma evidência experimental, não quantificando, assim, a aplicação e a comparação dos procedimentos comuns de montagem.

O objetivo específico deste trabalho consiste em determinar a aceitabilidade de diferentes métodos de fixação de geofone ao solo, de acordo com a aceleração de partícula esperada. Para se alcançar este objetivo, se fazem necessárias a comparação das velocidades de vibração de partícula de pico obtidas, a comparação das formas de onda registradas e a análise dos espectros de frequência calculados.

## 1.3 METODOLOGIA

A avaliação dos métodos de acoplamento de geofone foi realizada em uma mina de carvão a céu aberto, localizada no município de Butiá, Estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 80 km da capital, Porto Alegre. Quatro sismógrafos foram montados lado a lado para registrar as vibrações do solo. Dentre as diferentes recomendações encontradas na literatura, os métodos de instalação de geofone selecionados para este estudo foram: geofone colocado livremente sobre o solo, geofone colocado sob saco de areia, geofone cravado no solo e geofone enterrado no solo. Os dados obtidos foram analisados no *software Seismograph Data Analysis* em relação à velocidade de vibração de partícula de pico, históricos temporais e energia relativa por frequência.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os próximos capítulos dessa dissertação estão organizados da seguinte

forma:

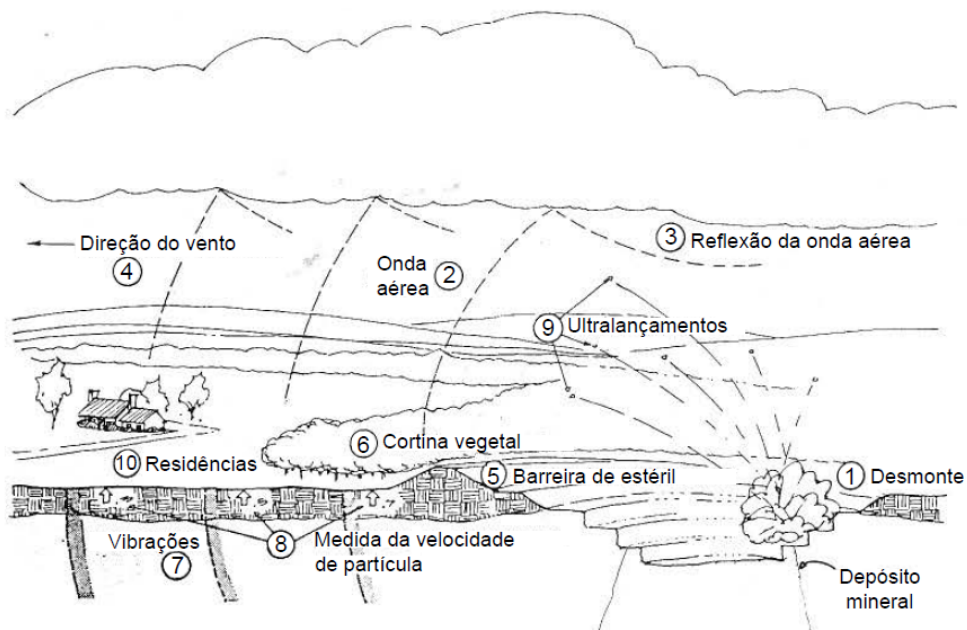
- O capítulo 2 constitui a revisão bibliográfica, onde são apresentados os impactos ambientais do desmonte de rochas com explosivos, conceitos teóricos da vibração no terreno, do desmonte de rochas e do monitoramento sismográfico.
- No capítulo 3 é desenvolvida a metodologia proposta, descrevendo o local de estudo e apresentando o programa experimental para aquisição dos dados.
- No capítulo 4 os dados obtidos no monitoramento sismográfico são analisados, comparando-se as velocidades de vibração de partícula de pico, as formas de onda e analisando-se os espectros de frequência obtidos.
- No capítulo 5 se encontram as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS

As principais perturbações criadas pelo desmonte de rochas com explosivos são: vibrações, pressão acústica e ultralanchamento (Figura 1). Todas elas podem, sob algumas circunstâncias, causar danos às estruturas próximas e, além disso, ser fonte de conflito com habitantes que vivem perto da operação. Formação de poeira, também, é frequente e difícil de controlar.

Figura 1 - Perturbações originadas pelo desmonte de rochas com explosivos.



Fonte: Adaptado de Jimeno *et al.*, 1994.

#### 2.1.1 Poeira e gases tóxicos

Não foram obtidas medidas eficazes para o controle ou minimização da poeira gerada pelo desmonte de rochas. Aspersão da superfície do volume a ser fragmentado mostrou-se inútil à medida que a maior parte da poeira é gerada durante a criação de novas superfícies, como resultado da quebra e abrasão dos fragmentos de rocha. O controle da poeira geralmente é obtido detonando-se

quando as condições de vento minimizam o impacto potencial na população (Scott, 1996).

A detonação de qualquer explosivo comercial produz vapor de água, nitrogênio e dióxido de carbono. Entre os gases inofensivos mencionados, sempre há certa percentagem de gases tóxicos como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Segundo Hustrulid (1999), os gases tóxicos produzidos pelas detonações de cargas a céu aberto normalmente não apresentam qualquer risco, uma vez que são rapidamente dispersos para o ar livre. Em dias muito calmos no fundo de cavas profundas, no entanto, os operadores devem evitar a exposição aos fumos pós-detonação. Os fumos alaranjados, por exemplo, indicam a presença de dióxido de nitrogênio.

### **2.1.2 Ultralançamento**

Ultralançamento é a propulsão incontrolada de fragmentos produzidos em desmontes de rochas e constitui uma das fontes de danos materiais e às pessoas. De acordo com Jimeno *et al.* (1995), as condições que favorecem ultralançamentos são as seguintes:

- a) Geologia: rochas intensamente fissuradas facilitam a ocorrência de ultralançamentos mais do que rochas maciças e homogêneas. No entanto, como estas últimas requerem grandes quantidades de energia para obterem uma boa fragmentação, este tipo de rocha geralmente causa mais problemas;
- b) Explosivos e sua distribuição: os explosivos que têm uma alta energia de lançamento (ANFO, por exemplo) produzem mais ultralançamento do que outros que têm uma energia de choque mais elevada, como emulsões explosivas. Quanto à distribuição, é preciso garantir que as variáveis geométricas do desmonte coincidam com as do projeto, especialmente nos seguintes casos:
  - quando a parte superior da bancada está quebrada devido à excessiva subfuração das bancadas superiores ou tampão insuficiente



para evitar crateramento;

- quando a face é muito irregular, com áreas ao longo do comprimento da coluna de explosivos que têm muito pouco afastamento;

- c) Plano de fogo: o controle de ultralançamento começa com um plano de fogo correto. Além de inspecionar o estado da face e dimensionar corretamente o tampão, é fundamental escolher a temporização entre as linhas, de modo a não ter muito confinamento nos últimos furos, o que pode produzir ultralançamento.

### 2.1.3 Pressão acústica

Em todo desmonte de rochas, uma porção da energia da detonação escapa para a atmosfera. A pressão acústica produzida é transmitida em todas as direções sob a forma de uma onda. O ruído que acompanha a detonação é a porção audível (20 Hz a 20 kHz) do espectro da onda de pressão. A porção de frequência mais baixa não é audível, mas pode excitar estruturas e por sua vez provocar um chacoalho secundário e audível dentro de uma estrutura. A pressão acústica geralmente é medida em decibéis (dB).

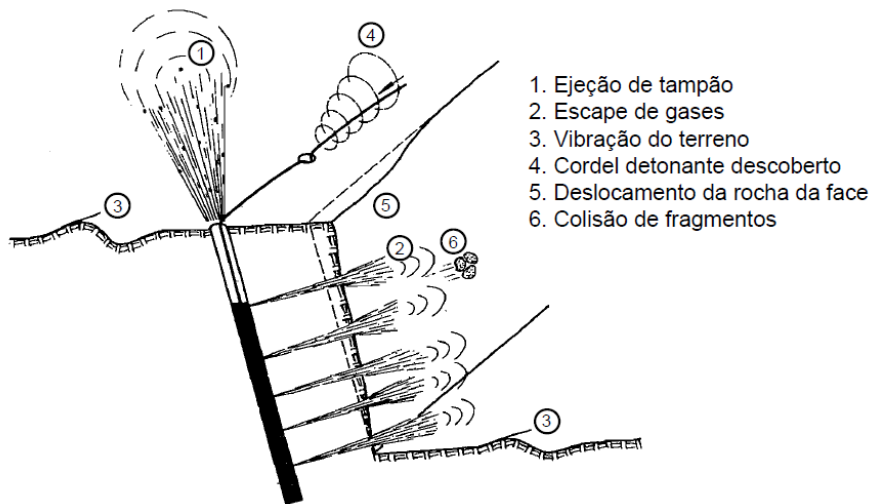
De acordo com Wiss e Linehan (1980) apud Jimeno *et al.* (1995), as causas da pressão acústica são:

- a) Vibração do solo causada por uma detonação;
- b) Escape de gases do furo quando o tampão é ejetado;
- c) Escape de gases através das fraturas criadas na face do maciço rochoso;
- d) Detonação do cordel iniciador ao ar livre;
- e) Deslocamento da rocha na face da bancada enquanto o desmonte progride;
- f) Colisão entre os fragmentos projetados (Figura 2).

Os gradientes do vento e as inversões de temperatura podem afetar os níveis da pressão acústica. Coberturas de nuvens, também, podem causar a reflexão da

onda de pressão de volta para a superfície a certa distância do local do desmonte (Silva, 2011).

Figura 2 - Fontes de pressão acústica nos desmontes de rochas.



Fonte: Adaptado de Jimeno *et al.*, 1995.

#### 2.1.4 Vibrações

Duas formas de energia são liberadas quando uma carga explosiva é detonada: (1) uma onda de choque e (2) altas pressões de gás. Quando dentro de um furo, a liberação inicial de energia (onda de choque) tritura a rocha a uma distância de cerca de duas vezes o raio do furo. Além da zona de trituração, fissuras radiais e fendas iniciadas pela interação da onda de choque com descontinuidades existentes se formam, conforme a cavidade se expande. Estas fissuras podem se estender para 20 ou mais vezes o diâmetro do furo. Os gases, em seguida, preenchem as fissuras/fraturas e movem a massa de rocha fraturada (ISSE, 2014).

No desmonte de rochas, fragmentação de rocha e movimento consomem a maior parte da energia do explosivo. No entanto, uma pequena porção restante passa para além da zona de trabalho pretendido. Além desta zona de trabalho, não há deslocamento permanente da rocha. A energia restante, chamada de vibração, viaja de forma elástica, ou seja, as partículas de rocha são deslocadas temporariamente e voltam à posição original. A energia liberada para a atmosfera

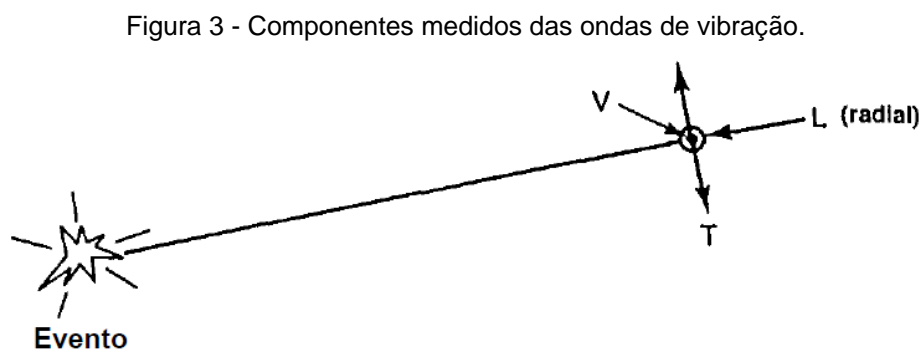
gera pressão acústica.

As ondas de vibração do solo viajam para longe da detonação em velocidades de até ou mais do que 6.000 m/s através da rocha ou solo (ISSE, 2014). Como a energia se propaga (ou dispersa) geometricamente no maciço, diferentes velocidades e caminhos de propagação fazem a duração do evento de vibração aumentar com o aumento da distância.

A vibração irá geralmente dissipar (atenuar) previsivelmente em qualquer direção. A intensidade depende principalmente da massa da carga explosiva e da distância da detonação. Se um desmonte com explosivos é feito em uma área plana de geologia consistente, as vibrações tendem a irradiar igualmente em todas as direções. Entretanto, mudanças na topografia, geologia do subsolo, presença de água e dimensões da cava, podem afetar as vibrações, assim como outros aspectos como sequência de iniciação e orientação do padrão de detonação (ISSE, 2014).

## 2.2 ASPECTOS TEÓRICOS DA VIBRAÇÃO NO TERRENO

As ondas geradas por detonação podem ser divididas em três categorias principais: de compressão, de cisalhamento e de superfície (Dowding, 1985). Para descrever os movimentos completamente, três componentes perpendiculares devem ser medidos, como mostrado na Figura 3. A componente longitudinal, L, é geralmente orientada ao longo de um raio horizontal até a detonação. Segue-se, então, que as outras duas componentes perpendiculares serão verticais, V, e transversais, T, à direção radial.



Fonte: Adaptado de Dowding, 1985.

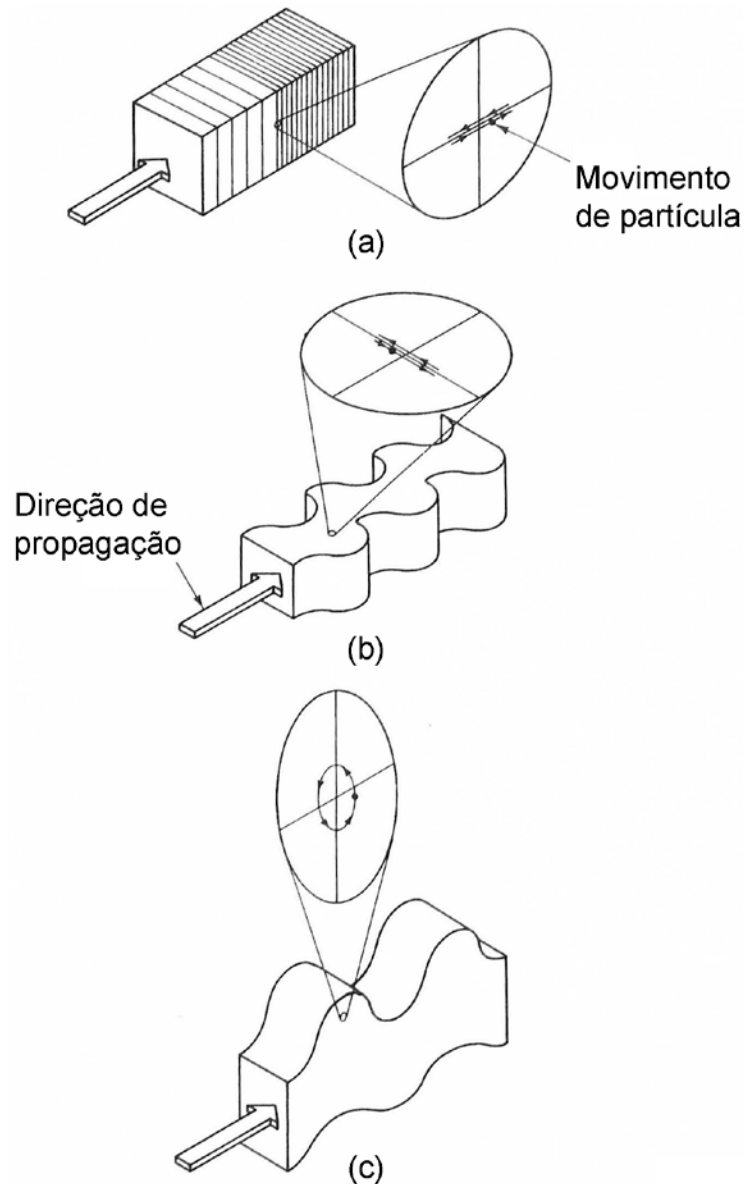
Os três principais tipos de ondas podem ser divididos em duas variedades: ondas de corpo, que se propagam através do corpo da rocha e do solo, e ondas de superfície, que são transmitidas ao longo de uma superfície (geralmente a superfície superior do solo). A onda de superfície mais importante é a *Rayleigh*, denotada R. As ondas de corpo podem ser subdivididas em compressivas (compressão/tração), denotadas como P, e ondas de cisalhamento, denotadas como S. As detonações produzem predominantemente ondas de corpo em pequenas distâncias. Estas ondas de corpo se propagam de maneira esférica até que cruzem uma fronteira como outra camada de rocha, solo ou a superfície do solo. Nesta interseção, são produzidas ondas de cisalhamento e de superfície. As ondas de superfície *Rayleigh* tornam-se importantes a distâncias maiores.

Em pequenas distâncias, todos os três tipos de onda chegam juntos e complicam bastante a identificação do tipo de onda, enquanto que em grandes distâncias, as ondas de cisalhamento e de superfície, mais lentas, começam a se separar da onda compressiva e permitem a identificação. Entretanto, a maioria das detonações é realizada como uma série de detonações menores que são retardadas em milissegundos, e as diferenças nos percursos de viagem e tempos de retardo resultam na chegada sobreposta de ambas as frentes de onda e tipos de onda (Dowding, 1985).

Os três tipos de onda produzem padrões de movimento radicalmente diferentes nas partículas de solo e rocha à medida que passam. Os movimentos variáveis de partículas e a deformação do terreno para cada tipo de onda são comparados na Figura 4.

Em cada caso, na Figura 4, a onda se propaga ou se move para a direita. A onda longitudinal (de compressão) produz movimentos de partícula na mesma direção em que se propaga. Por outro lado, a onda de cisalhamento produz movimentos perpendiculares à sua direção de propagação: ou horizontal, como mostrado, ou vertical. A onda *Rayleigh* (a mais complicada) produz movimentos tanto na direção vertical como paralela à sua direção de propagação.

Figura 4 - Variação do movimento de partícula com o tipo de onda: (a) compressiva; (b) cisalhamento; (c) Rayleigh.

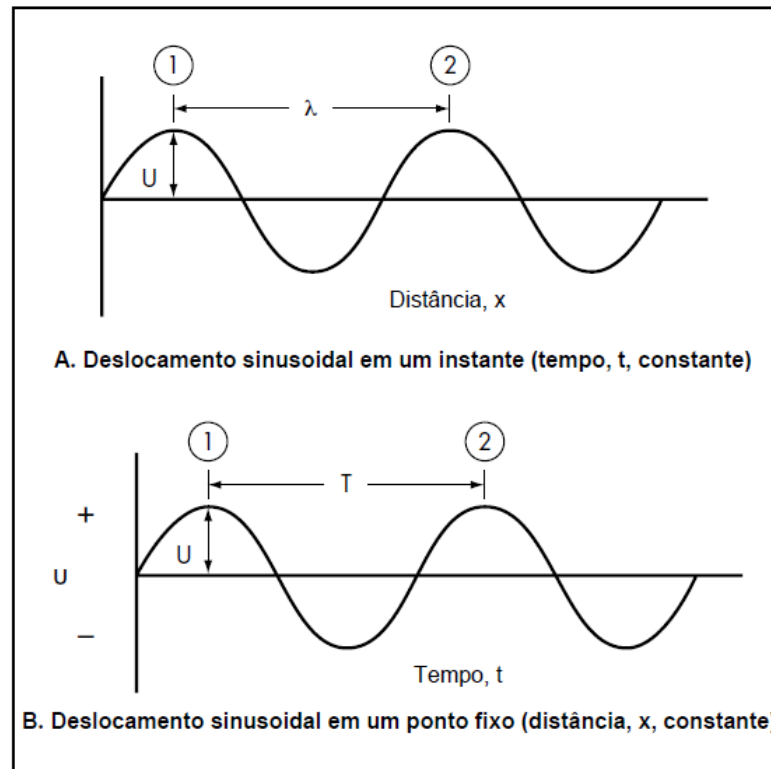


Fonte: Adaptado de Dowding, 1985.

### 2.2.1 Aproximações Sinusoidais

As vibrações típicas, independentemente do tipo de onda, podem ser aproximadas como variando sinusoidalmente no tempo ou na distância ao longo da linha radial ou longitudinal, como mostrado na Figura 5. Esta aproximação é útil porque torna os cálculos para o deslocamento e para a aceleração a partir da velocidade de partícula muito mais simples do que para os pulsos irregulares.

Figura 5 - Aproximações sinusoidais das vibrações decorrentes das detonações.



Fonte: Adaptado de Dowding, 2011.

Segundo ISEE (2014), movimento das partículas na superfície do solo é grosseiramente semelhante ao de uma rolha de cortiça sobre a superfície da água quando uma onda passa por baixo. A velocidade de partícula da rolha expressa a rapidez com que ela balança para cima e para baixo, enquanto a onda que passa por baixo dela viaja a uma velocidade de propagação muito maior. O movimento da rolha (partícula vibratória) pode ser descrito por quatro fatores:

- a) Deslocamento: para ilustrar o deslocamento, considere o movimento de partícula em um plano vertical. Quando uma onda passa por um determinado local, uma partícula no solo ou no ar é deslocada para cima ou para baixo da sua posição de repouso em qualquer instante. A distância que uma partícula move em relação à sua posição de repouso, é chamada de deslocamento ( $u$ ) e é medida em milímetros. A maioria das detonações geram deslocamentos no solo inferiores a 0,01 milímetros acima ou abaixo do ponto de repouso de uma partícula;
- b) Frequência: uma partícula começará a vibrar a partir de seu ponto de repouso, passará para um pico positivo, retornará a zero, então

passará para um pico negativo e, finalmente, retornará a zero para completar um ciclo. O intervalo de tempo de um ciclo completo é chamado de período (T) e é medido em segundos. O número de ciclos/segundo define a frequência (f) e é relatado em hertz. Para ondas simples, o número de ciclos em uma janela de um segundo pode ser contado manualmente, ou a frequência pode ser calculada com a equação 2.1:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Onde: f é a frequência (hertz); T é o período (segundos);

- c) Velocidade: uma partícula vibratória movendo-se em torno de seu ponto de repouso muda constantemente de velocidade. A partícula tem a sua velocidade máxima à medida que passa pelo seu ponto de repouso. A velocidade pode ser calculada a partir do deslocamento e da frequência usando a equação 2.2:

$$v = 2 \times \pi \times f \times u \quad (2.2)$$

Onde: v é a velocidade de partícula (mm/s); f é a frequência (hertz); u é o deslocamento (mm);  $\pi$  (Pi) é constante;

- d) Aceleração: a taxa na qual uma partícula muda sua velocidade ao longo do tempo é chamada de aceleração. A aceleração máxima é alcançada quando a partícula atinge seu deslocamento máximo. A aceleração é medida em milímetros/segundo<sup>2</sup> e é frequentemente relatada em gravidades (g's). Quando o movimento é sinusoidal, como ilustrado na Figura 5, a aceleração pode ser calculada a partir da velocidade e da frequência usando a equação 2.3:

$$a = 2 \times \pi \times f \times v \quad (2.3)$$

Onde: a é a aceleração da partícula (mm/s<sup>2</sup>); f é a frequência (hertz); v

é a velocidade de partícula (mm/s).

Normalmente, a aceleração é normalizada, isto é, dividida pela aceleração gravitacional ( $9.814 \text{ mm/s}^2$ ). Portanto, uma aceleração de  $2.000 \text{ mm/s}^2$  é  $2.000/9.814 = 0,2 \text{ g}$ , ou dois décimos da gravidade.

Dowding (2011) afirma que as relações entre deslocamento de partículas, velocidade e aceleração para formas de onda complexas são exatamente relacionadas pela integração ou diferenciação de qualquer uma das formas de onda. Por exemplo, a integração de um histórico de aceleração dá um histórico de velocidade; a integração deste último, por sua vez, dá um histórico de deslocamento. Mesmo que um registro de velocidade de partícula possa ser diferenciado para encontrar aceleração, não é recomendado, pois o procedimento é sensível a pequenas mudanças na inclinação do histórico de velocidade.

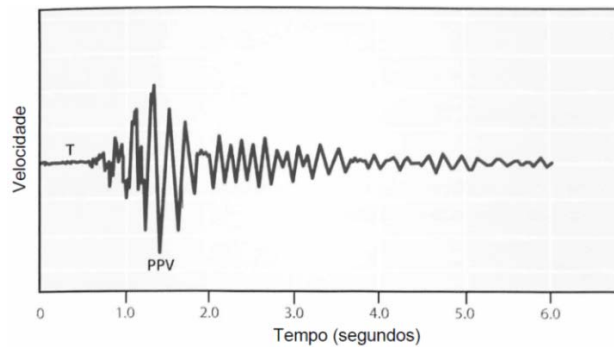
### 2.2.2 Típicas formas de onda

De acordo com ISEE (2014), as vibrações são registradas e relatadas como históricos de velocidade (*time histories*). Quando representadas como velocidades de partículas ao longo do tempo, o histórico temporal, também, pode ser referido como uma forma de onda (*waveform*). Uma forma de onda transversal é mostrada na Figura 6. O eixo x (horizontal) representa o tempo e o eixo y (vertical) representa a amplitude da velocidade da partícula (velocidade). O valor absoluto de zero a pico mais alto na forma de onda é a velocidade de vibração de partícula de pico ou *peak particle velocity* (PPV) para esse canal (transversal).

Uma vibração de detonação típica tenderá a ter energia de frequência mais alta na parte inicial da forma de onda e energia de frequência baixa na última parte da forma de onda. Estas frequências são atribuíveis aos tempos de chegada das ondas de corpo e de superfície como discutido anteriormente. A duração da forma de onda será maior que a duração da detonação. Portanto, em geral, quanto maior a distância de uma detonação ao ponto de monitoramento, maior a duração devido à dispersão das ondas.



Figura 6 - Histórico de vibração ou forma de onda (canal transversal).

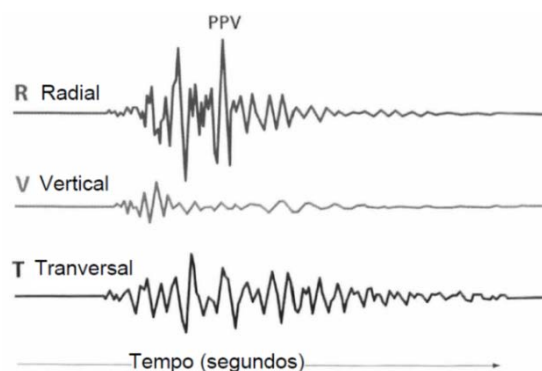


Fonte: Adaptado de ISEE, 2014.

As amplitudes da onda (PPV) e a frequência em um local estão fortemente relacionadas ao tamanho de uma detonação (carga única) e à distância do local. À medida que a energia se espalha em uma área, afastando-se do ponto de detonação, as amplitudes de vibração diminuem (atenuam) e as frequências tendem a diminuir. A vibração do solo geralmente terá frequência mais alta perto de uma detonação e terá frequência mais baixa mais distante de uma detonação à medida que as vibrações atenuam e assumem as características do meio de propagação.

A vibração do solo é tridimensional e as medições são realizadas em três componentes de direção (x, y e z) designadas respectivamente como (1) radial (longitudinal), (2) transversal e (3) vertical. A Figura 7 mostra um exemplo dos três componentes de movimento. Cada componente tem uma velocidade de vibração de partícula de pico e a mais alta das três componentes é a velocidade de vibração de partícula de pico máxima, mas é ainda frequentemente referida como PPV para todo o evento.

Figura 7 - Três componentes de vibração do solo.



Fonte: Adaptado de ISEE, 2014.

Ocasionalmente, a velocidade de vibração de partícula resultante de pico (VR) é usada como referência para predição de vibração ou conformidade regulatória. VR é o valor da soma vetorial mais alta para as formas de onda componentes e deve ser calculada a partir de cada intervalo de tempo ao longo de toda a forma de onda (vide equação 2.4).

$$VR = \sqrt{R_t^2 + T_t^2 + V_t^2} \quad (2.4)$$

Onde: VR é a velocidade de vibração de partícula resultante de pico (mm/s);  $R_t$  é a velocidade de partícula radial (mm/s);  $T_t$  é a velocidade de partícula transversal (mm/s);  $V_t$  é a velocidade de partícula vertical (mm/s); t é qualquer ponto no tempo na forma de onda.

### 2.2.3 Importância da frequência

As características de amplitude e frequência das vibrações do solo mudam à medida que viajam do local de detonação para os locais de medição. Uma influência muito importante é a dissipação, ou "espalhamento geométrico", onde a quantidade finita de energia de vibração preenche um volume cada vez maior do terreno irradiando em todas as direções para longe da detonação. A consequência é geralmente uma diminuição exponencial da amplitude de vibração com o aumento da distância da fonte.

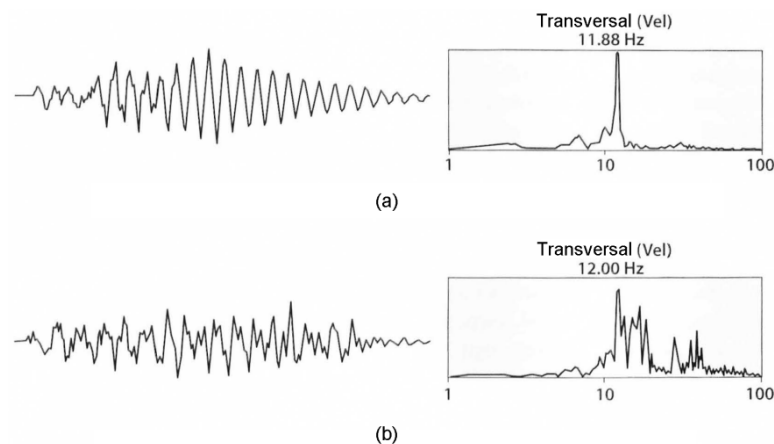
A frequência é particularmente sensível à distância absoluta (e não à escalonada) e à natureza dos meios de propagação. As vibrações que viajam através da rocha retêm as frequências mais altas do que quando o solo é o meio de propagação. Camadas de solo sobre a rocha produzem vibrações de baixa frequência decorrentes da atenuação seletiva e da geração de ondas de superfície. As frequências de vibração que são geradas podem, também, estar relacionadas com a temporização do desmonte de rochas. No entanto, com os sistemas pirotécnicos, esse efeito é geralmente mascarado pela dispersão de tempo dos acessórios (Siskind, 2000).

Um desmonte de rochas com utilização de explosivos contém uma série de

cargas que detonam retardadas em milissegundos. Quando estas cargas detonam em tempos de atraso diferentes, as vibrações de furos individuais interagem. Esta interação resulta em formas de onda complexas, como pôde ser visto na Figura 7. Ondas complexas contêm muitas frequências diferentes, ao passo que uma onda harmônica simples contêm apenas uma frequência.

Os componentes de frequência de uma onda complexa são difíceis de interpretar. Segundo ISEE (2014), frequentemente são necessários cálculos matemáticos avançados com programas de computador para avaliar as frequências dos componentes. A análise mais comum é uma Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT). Esta análise simplesmente quebra uma onda complexa em suas ondas componentes de frequência única e dá pesos à energia relativa em cada frequência de forma gráfica. As FFTs para as formas de onda na Figura 8 avaliam as energias relativas para frequências entre 1 hertz e 100 hertz. A Figura 8a contém energia quase pura de 11,88 hertz, enquanto a Figura 8b tem mais energia a 12 hertz, mas grande parte da energia é distribuída em outras frequências.

Figura 8 - Formas de onda e respectivos espectros de frequência.



Fonte: Adaptado de ISEE, 2014.

De acordo com Dowding (2011), deve-se tomar cuidado para não confundir os efeitos de movimentos de frequência única com os de movimentos transientes de detonação. A maioria dos estudos de vibração realizados por pessoal treinado em engenharia mecânica e elétrica e em geofísica assume implicitamente que os movimentos são contínuos (duram muitos ciclos) e de estado estacionário (têm frequência e amplitude constantes). Contudo, como pôde ser observado na Figura 7,

os movimentos induzidos por detonação duram apenas um ou dois ciclos a uma amplitude e frequência relativamente constantes. Tais condições não são suficientemente semelhantes ao movimento de estado estacionário para permitir a aplicação específica de aproximações de estado estacionário, como a ressonância.

#### 2.2.4 Atenuação

Os dois fatores mais influentes na amplitude de vibração são a massa de uma carga explosiva (Q) e a distância da carga (D). Em geral, as duas relações seguintes são verdadeiras: (1) a amplitude de vibração aumenta à medida que o peso de carga aumenta, e (2) a amplitude de vibração diminui à medida que a distância aumenta. O peso da carga e a distância têm uma influência significativa na amplitude das vibrações medidas em um ponto. No entanto, alguma variação na amplitude de vibração pode ocorrer com a alteração das condições geológicas, hidrológicas e topográficas ao redor de um local de detonação.

A divisão das distâncias por um fator de escala do peso de carga permite comparações entre detonações de tamanhos diferentes. O melhor valor para um fator de escala depende de como a vibração aumenta com a carga e é dependente da forma da carga e, até certo ponto, características do local, tais como confinamento e composição material. A maioria das análises de vibração usa o parâmetro distância escalonada, abrangendo a razão entre a distância do ponto de detonação ao local considerado pela raiz quadrada da carga ( $D/Q^{1/2}$ ) ou a distância escalonada expressa pela raiz cúbica da carga ( $D/Q^{1/3}$ ) (Siskind, 2000).

No Brasil, a NBR 9653 (ABNT, 2005) adota a distância escalonada (DE) utilizando o inverso da raiz quadrada da carga a ser detonada, conforme a equação 2.5.

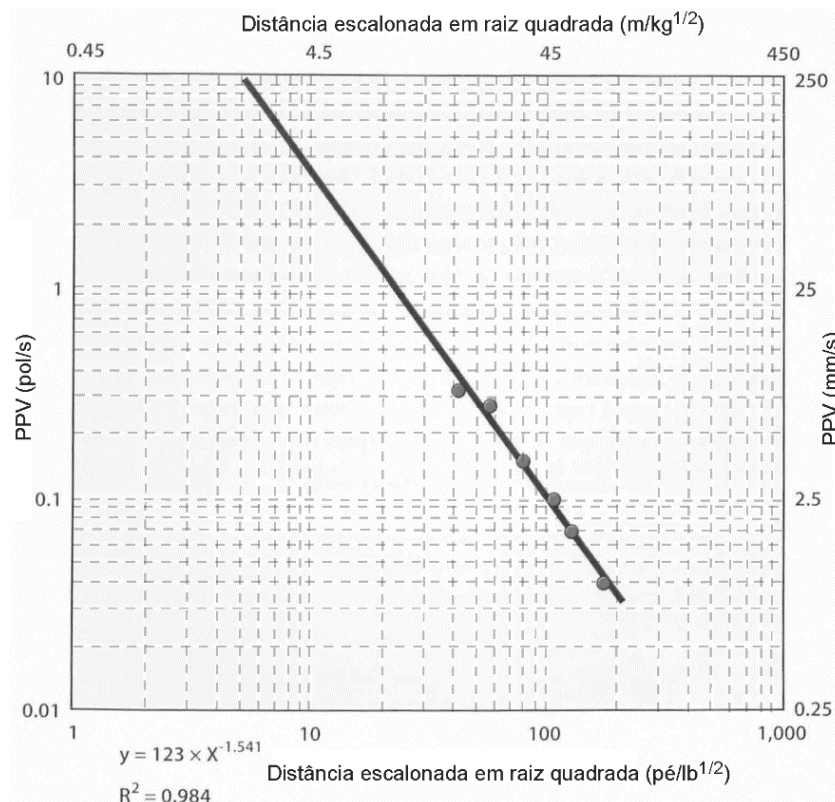
$$DE = \frac{D}{Q^{1/2}} \quad (2.5)$$

Onde: D é a distância horizontal entre o ponto de medição e o ponto mais próximo da detonação (m); Q é a carga máxima de explosivos a ser detonada por

espera (kg).

Quando combinadas com amplitudes de vibração medidas, as características sísmicas de uma área podem ser definidas. As medições de PPV máximas são tipicamente traçadas em um gráfico log-log contra a distância escalonada, como mostrado na Figura 9. Neste tipo de gráfico, a relação entre os dois parâmetros mostra uma tendência linear (usando eixos log) que pode ser ajustada com uma equação que descreve a tendência. No exemplo, seis pontos de dados de uma detonação ilustram como as amplitudes de vibração atenuam com a distância. Se a tendência é uma representação acurada da atenuação com o aumento da distância escalonada, a equação pode ser usada para a previsão de amplitude de vibração. A melhor tendência de ajuste é mostrada com uma linha, muitas vezes chamada de "linha média". Neste caso, uma linha de melhor ajuste pode ser facilmente desenhada ao longo dos pontos de dados. Quando os dados são dispersos, uma análise de regressão por mínimos quadrados pode fornecer intervalos de confiança no conjunto de dados (ISEE, 2014).

Figura 9 - PPV vs. distância escalonada.



Fonte: Adaptado de ISEE, 2014.

A melhor linha de ajuste para calcular a velocidade de vibração de partícula de pico (PPV) a partir da distância escalonada é definida pela equação 2.6.

$$PPV = A \times (DE)^{-B} \quad (2.6)$$

Onde: DE é a distância escalonada em raiz quadrada ( $m/kg^{1/2}$ ); A é o intercepto da reta a um valor de DE igual a 1; B é a inclinação da reta (note que a inclinação é negativa).

"A" está mais estreitamente relacionado com o tipo de indústria da detonação e "B" representa a taxa de atenuação da vibração com base nas condições do local. Valores maiores de "B" representam uma atenuação mais acentuada visto que o valor é negativo.

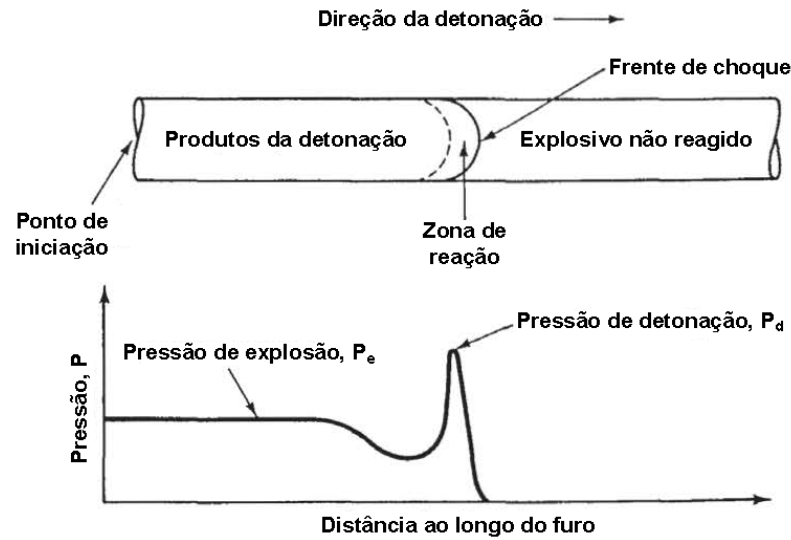
## 2.3 DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS

Sempre que o monitoramento de vibração é realizado, é importante entender os limites impostos ao plano de fogo pela física da detonação e pelos produtos comerciais disponíveis. Esta seção destina-se a introduzir estes produtos explosivos, acessórios de detonação e o planejamento do desmonte de rochas.

### 2.3.1 O processo de detonação e produtos explosivos

Explosivos são misturas químicas que se decompõem rapidamente após a queima e, por sua vez, liberam grandes quantidades de calor e gás (Dowding, 1985). À medida que a frente de detonação avança em um furo, como mostrado na Figura 10, a pressão de detonação (energia de choque),  $P_d$ , é seguida por uma pressão de explosão (energia de gás) menor, mas sustentada,  $P_e$ . As pressões explosivas se dissipam mais lentamente do que a detonação ou pressões de choque e fornecem grande parte da energia necessária para mover a rocha.

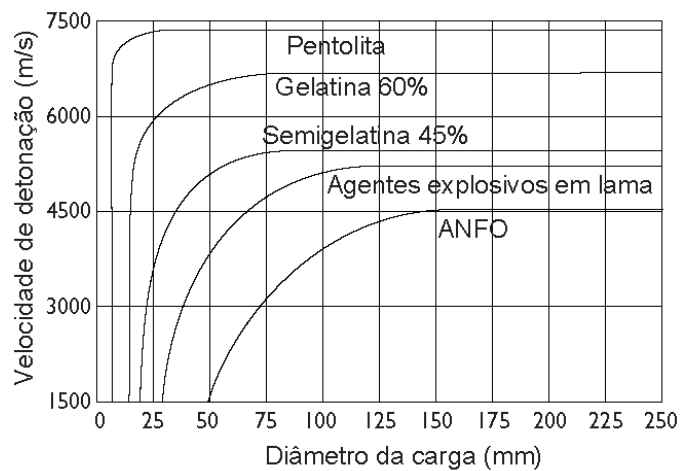
Figura 10 - Avanço da detonação produz curta pressão de detonação e longa pressão de explosão.



Fonte: Adaptado de Dowding, 1985.

A pressão de detonação inicialmente fratura a rocha imediatamente adjacente à parede do furo e a pressão de explosão prolongada estende a zona fraturada para até 40 vezes o diâmetro do furo em rochas sedimentares mais brandas. O pico ou pressão de detonação produzida varia entre 10 e 140 kbar e propaga-se como uma onda de choque ao longo da coluna explosiva a uma velocidade que varia entre 2.700 e 8.400 m/s (Dowding, 1985). A variação dessa velocidade de detonação para tipos comuns de explosivos é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Velocidades de detonação de explosivos vs. diâmetro da carga.



Fonte: Adaptado de Gokhale, 2011.

A Tabela 1 lista alguns explosivos comerciais e suas principais propriedades.

Tabela 1 - Características típicas dos explosivos comerciais

Tipo de explosivo	Categoria	Gravidade específica	Velocidade de detonação (m/s)	Energia relativa por volume (ANFO = 100)	Resistência à água
Gelatina	80%	1,35 – 1,43	5.700 – 6.706	201	Excelente
Hidrogel	Encartuchado 2 pol. – 9 pol.	1,18 – 1,52	4.032 – 5.791	128 – 183	Muito boa
Emulsão	Bombeada	0,95 – 1,28	3.293 – 5.791	103 – 156	Excelente
	Encartuchada	1,10 – 1,20	4.115 – 5.182	102 – 167	Excelente
ANFO	Despejado	0,77 – 0,85	2.774 – 4.602	100	Nenhuma
	Carregamento Pneumático	0,85 – 1,10	2.743 – 3.353	100 – 122	Nenhuma
Emulsão/ANFO	20:80	1,05	5.000	138	Ruim
	30:70	1,2	5.303	166	Razoável
	40:60	1,3	5.517	185	Boa
	50:50	1,3	5.456	179	Excelente
	60:40	1,3	5.334	175	Excelente
	70:30	1,3	5.212	169	Excelente
	80:20	1,3	5.090	165	Excelente

Fonte: Schneider, 2002.

A energia relativa por volume é a energia disponível por volume de um determinado explosivo, comparada com a energia disponível por igual volume de um explosivo tomado como padrão, neste caso o nitrato de amônio e óleo combustível (*ammonium nitrate and fuel oil*, ANFO).

### 2.3.2 Sistemas de iniciação

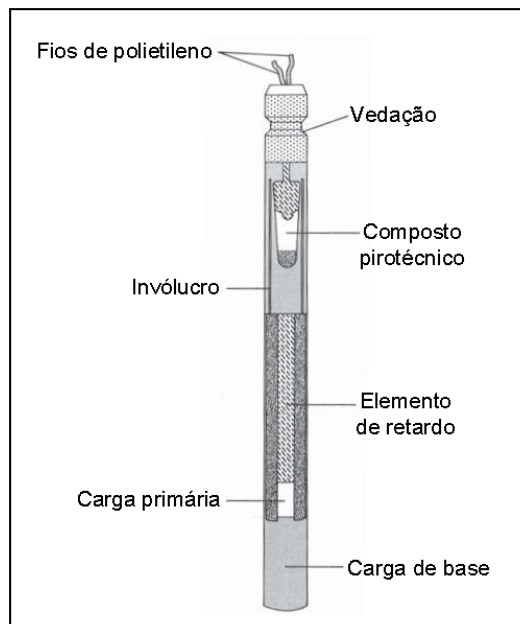
Três tipos básicos de sistemas de iniciação estão disponíveis para uso em desmontes comerciais: elétrico, não elétrico e eletrônico. Durante muitos anos, detonadores elétricos dominaram a indústria, e iniciadores de estopim e espoleta por muitos anos antes disso. Os detonadores elétricos foram usados por causa de sua disponibilidade e confiabilidade. Ao longo das décadas de 1990 e 2000, os sistemas de iniciação de tubo de choque ganharam progressivamente mais quota de mercado



devido principalmente à sua imunidade a iniciação acidental causada por transmissões de rádio e fontes de corrente parasita. Os três tipos principais de sistemas de iniciação são discutidos a seguir (Lusk e Worsey, 2011):

- a) Elétrico: os produtos elétricos eram versáteis e permitiram avanços significativos no plano de fogo através do uso de retardos de furo. Estes detonadores são iniciados quando uma pequena quantidade de corrente é introduzida a um fio dentro do invólucro do detonador. Este fio aquece e acende um composto pirotécnico, que acende o elemento de retardo, que é fabricado para queimar durante um período de tempo específico antes de atingir a carga primária que consiste em um explosivo tal como azida de chumbo e uma carga de base, normalmente feita de tetranitrato de pentaeritritol (*pentaerythritol tetranitrate*, PETN). A Figura 12 mostra o funcionamento interno de uma espoleta elétrica.

Figura 12 - Funcionamento interno de uma espoleta elétrica.



Fonte: Adaptado de Lusk e Worsey, 2011.

- b) Não elétrico: existem muitos tipos de sistemas de iniciação que podem ser considerados não elétricos: cordel detonante, estopim e espoleta e detonadores não elétricos de tubos de choque. O detonador tipo tubo

de choque é agora a forma mais comum de sistema de iniciação não elétrica. Os detonadores de tubo de choque são responsáveis pelo declínio dos detonadores elétricos como o sistema de iniciação preferido. Embora sejam às vezes usados em conjunto com cordel detonante, a maioria das operações de mineração que usam detonadores não elétricos utilizam uma combinação de retardos no furo e na superfície.

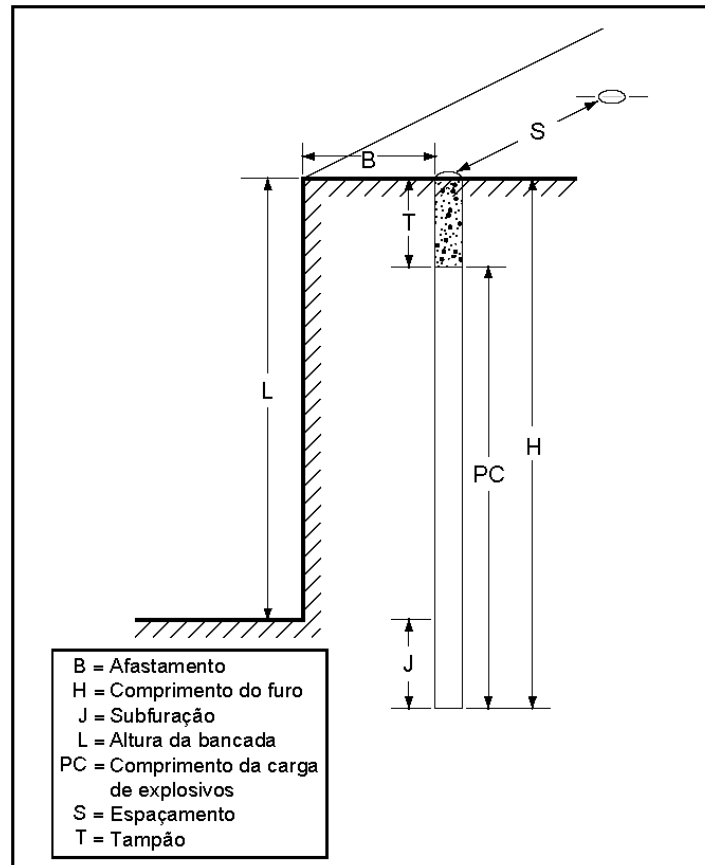
- c) Eletrônico: detonadores eletrônicos utilizam tecnologia de microchip para fornecer retardos para planos de fogo. A maioria dos detonadores eletrônicos consiste em fios, um envoltório que se parece com detonadores elétricos e não elétricos, um microchip, um capacitor ou capacitores, e uma carga primária/carga de base semelhante a detonadores elétricos e não elétricos. Na maioria dos casos, os detonadores se comunicam com um registrador/máquina, e os detonadores individuais podem ser verificados antes da detonação. No momento do disparo, a máquina de detonação envia um código para iniciar os dispositivos de temporização eletrônicos dentro dos detonadores. Quando os detonadores alcançam seu tempo programado, a eletrônica dentro deles transfere a corrente restante, após a qual o processo é semelhante a um detonador elétrico. A diferença entre detonadores eletrônicos e elétricos é a substituição do elemento de retardo pirotécnico por um microchip. Isso permite uma acurácia muito maior nos tempos de detonação.

### **2.3.3 Plano de fogo**

O plano de fogo é o projeto executivo para o desmonte de rocha com uso sistemático de explosivos, onde serão definidos preliminarmente o plano de perfuração, a qualificação e quantificação dos explosivos e os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados. Como todo projeto executivo, um plano de fogo pode sofrer ajustes, adaptações e correções, conforme as observações de campo logo nas primeiras detonações realizadas na frente de

escavação. A Figura 13 mostra os principais parâmetros de um plano de fogo de desmonte em bancada.

Figura 13 - Nomenclatura dos elementos do plano de fogo de bancada.



Fonte: Adaptado de Lusk e Worsey, 2011.

Dentre os diferentes métodos empíricos encontrados na literatura para dimensionamento do plano de fogo, esta seção apresenta a metodologia proposta por Ash (1990) para elaboração do plano de fogo em bancadas.

O diâmetro da carga explosiva ( $D$ ) é a dimensão mais crítica dos parâmetros de dimensionamento porque controla a quantidade de explosivos em qualquer local dentro do furo para qualquer tipo de explosivo (Figura 13). Pode, também, afetar a velocidade de reação do explosivo (Figura 11). A seleção de um diâmetro específico pode ser restringida, no entanto, porque os diâmetros de furo disponíveis dependerão do equipamento de perfuração disponível. Mas, sempre que possível, recomenda-se que o  $D$  não seja superior a 0,015 vezes a altura da bancada ( $L$ ), o ponto limite em que a dimensão do afastamento não irá impor rigidez excessiva

sobre a rocha do mesmo.

A dimensão do afastamento (B) é definida como a distância de um furo à face da bancada ou entre duas linhas de furos. Das muitas fórmulas, uma relação desenvolvida a partir da análise de numerosas detonações de campo que é relativamente simples e aplicável para a maioria das condições para estimar o afastamento é a seguinte:

$$B = 0,036 \times D \times (SG_e/SG_r)^{1/3} \quad (2.7)$$

Onde: B é o afastamento (m); D é o diâmetro da carga explosiva (mm);  $SG_e$  é o peso específico do explosivo;  $SG_r$  é o peso específico da rocha.

Para confinar os gases explosivos até que eles tenham tido tempo para fraturar adequadamente e começar o movimento da rocha, o material de tampão é colocado na região superior de um furo. As rochas fragmentadas de tamanho médio a grosseiro são consideradas melhores como tampão; elas tendem a travar no furo quando este é pressurizado. A experiência demonstrou que o tampão para a maioria das condições de desmonte de bancada deve preencher a parte superior do furo a uma distância, T, de 0,5 a 0,7 vezes a dimensão do afastamento. Uma relação de aproximação usada frequentemente é a seguinte:

$$T \sim \frac{2B}{3} \quad (2.8)$$

Um valor de T muito grande resulta na formação de matacões ou blocos na zona superior do furo com um potencial de quebra para trás (*backbreak*) quando as condições estruturais da rocha são desfavoráveis. Por outro lado, se T é muito pequeno, a violência sob a forma de pressão acústica e ultralancamento com algum *backbreak* pode ser esperada.

Para evitar a formação de repés (saliências rochosas no pé da bancada), os furos devem ser perfurados abaixo do nível do terreno. A quantidade de subfuração necessária depende do afastamento, orientação do furo em relação às faces livres e as condições estruturais geológicas na base da bancada. Se houver um plano de descontinuidade nessa localização, pouca ou nenhuma subfuração pode ser

necessária. Como primeira aproximação, a regra é que a subfuração,  $J$ , deve ser aproximadamente um terço do afastamento:

$$J \sim \frac{B}{3} \quad (2.9)$$

O espaçamento,  $S$ , é definido como a distância entre dois furos adjacentes, medido perpendicularmente ao afastamento. O espaçamento em conjunto com os tempos de detonação de cargas adjacentes e as discontinuidades estruturais da rocha fornecem os meios primários para controlar se os furos irão ou não interagir durante uma detonação. Para a maioria das situações, o valor da razão  $S/B$  será de 1 a 2; embora em certos casos em que as condições são favoráveis, maiores razões foram usadas com resultados satisfatórios. Em geral, os furos detonados independentemente uns dos outros requerem uma razão de espaçamento entre 1 e 1,5, sendo um valor de 1,41 o equilíbrio geométrico ideal para a fragmentação de material maciço:

$$S = 1,41B \quad (2.10)$$

Igualmente importante quanto o uso de cargas adequadas, espaçamentos e profundidades de furos é a seleção de um padrão de temporização compatível para as várias cargas explosivas. O uso de tempos de retardo adequados promove não apenas bons resultados de fragmentação e deslocamento, mas também pode minimizar efeitos secundários da detonação, tais como pressão acústica, ultralançamento e vibração do terreno. Várias diretrizes foram desenvolvidas para auxiliar na seleção de tempos de retardo que fornecerão fragmentação adequada, mantendo a vibração de ar e do terreno em níveis controláveis:

- a) O intervalo de retardo mínimo entre os furos na mesma linha deve exceder 3,28 ms/m de afastamento com um limite superior de 16,4 ms/m para conseguir uma boa fragmentação na rocha;
- b) O intervalo de tempo entre as filas de furos deve ser de duas a três vezes o retardo usado entre os furos em uma linha;
- c) A taxa de propagação da detonação ao longo de uma face livre deve

ser menor que a velocidade sônica para o ar, isto é, 335,3 m/s e preferivelmente metade desse valor sempre que possível, mas pelo menos 7 ms/m de espaçamento para evitar que a pressão acústica se sobreponha.

## 2.4 MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

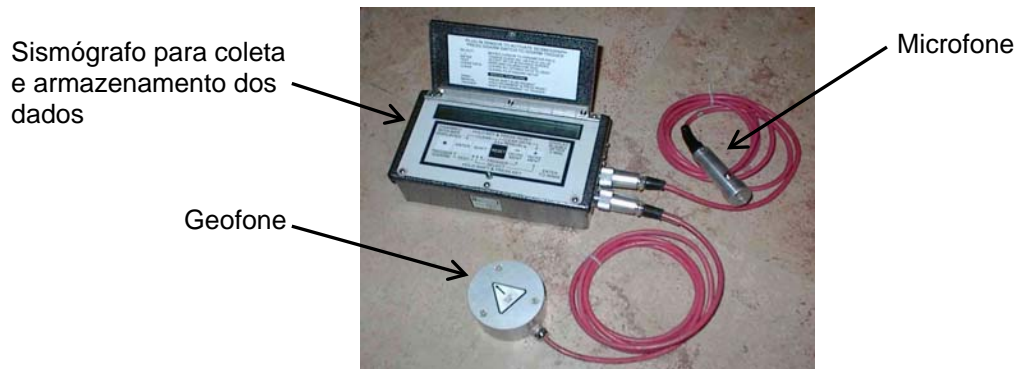
Os sismógrafos são equipados para monitorar a vibração do solo e a pressão acústica. As vibrações do solo são medidas em três direções componentes e a pressão acústica é medida como uma onda de pressão. Cada "evento" de vibração que ativa automaticamente (dispara) o sismógrafo é armazenado digitalmente ou impresso no campo.

A maioria dos sismógrafos pode ser programada para funcionar como um gravador de forma de onda ou "histograma" de pico. Os registradores de forma de onda devem sempre ser usados para monitorar eventos de vibração induzidos por detonação. Os registradores de forma de onda medem vibrações como históricos de velocidade ao longo de um período de registro finito (por exemplo, 5, 10 ou 20 segundos). Os gravadores de pico medem as vibrações continuamente e relatam o valor mais elevado que ocorre dentro de um intervalo de tempo predeterminado (por exemplo, 5, 10 ou 15 minutos) (ISEE, 2014).

Todos os sismógrafos fabricados atualmente registram e armazenam os dados digitalmente. Algumas unidades têm impressoras para que os resultados possam ser impressos imediatamente no campo para revisão. Unidades sem impressoras devem ter os dados transferidos para um computador, mas também têm a vantagem de uma melhor análise das formas de onda.

Os sismógrafos contêm um geofone para medir as vibrações do solo, um microfone para medir a pressão acústica e uma base de coleta/programação de dados (Figura 14).

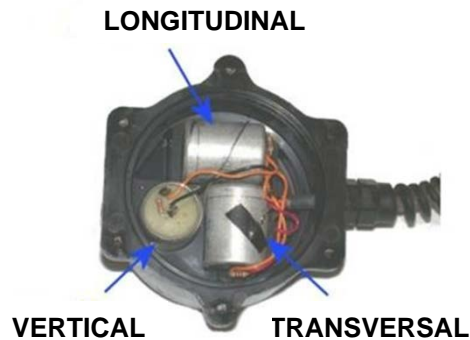
Figura 14 - Sismógrafo de engenharia.



Fonte: Adaptado de Aimone-Martin Associates LLC, 2017.

O geofone é, de fato, constituído por três sensores independentes colocados em ângulo reto entre si. Um sensor é colocado no plano vertical, enquanto os restantes estão no plano horizontal em ângulo reto entre si. Cada sensor irá responder ao movimento ao longo de seu eixo. Três são necessários para determinar completamente o movimento do solo. As três unidades são incluídas em um invólucro como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Sensores independentes em um geofone.



Fonte: Adaptado de ISEE, 2015b.

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, 2015a; 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 são necessários (ISEE, 2015a; 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, 2015a; 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.



### 3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos definidos nessa dissertação foi proposta uma metodologia contemplando as seguintes etapas: (1) seleção de uma área de testes, (2) seleção dos métodos de acoplamento de geofones a serem utilizados, (3) monitoramento e coleta de dados e (4) análise dos dados.

Os testes de campo foram conduzidos em uma mina de carvão, localizada no município de Butiá, a aproximadamente 80 km de Porto Alegre (Figura 16). Esta mina utiliza o método de lavra em tiras ou *strip mining*, que tem como característica o fato de que o material de cobertura que é removido para dar acesso ao carvão é imediatamente reposicionado na área previamente minerada. De acordo com Rosenhaim *et al.* (2013), as razões de carga utilizadas são baixas, da ordem de  $150 \text{ g/m}^3$  no siltito da cobertura e  $240 \text{ g/m}^3$  nas camadas de carvão, o que previne a diluição do carvão, pois as baixas razões de carga resultam em fraturamento do material com pouca movimentação.

Figura 16 - Mapa de localização da mina.



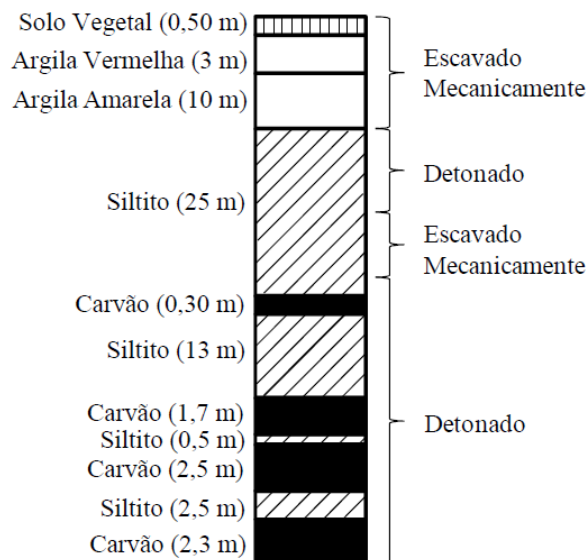
Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Para a lavra seletiva do carvão é necessário que as camadas sejam detonadas e escavadas separadamente para que não haja diluição do carvão com o estéril, optando-se por realizar o desmonte de rochas individualizado por camada.

Para evitar a geração de “matacos” no carvão (*oversize*), Rosenhaim *et al.* (2011) explicam que parte do estéril acima da camada de carvão é perfurada e desmontada junto com a mesma, desta forma uma maior coluna de explosivo é posicionada na camada de carvão, sendo o tampão localizado no material estéril imediatamente acima, resultando em uma maior energia localizada na fragmentação do carvão.

Quanto ao estéril, somente uma fração deste necessita ser desmontado com auxílio de explosivos, facilitando sua escavação, carregamento e transporte. As camadas de carvão, com espessuras variando entre 30 cm e 2,5 metros, são detonadas mesmo com a possibilidade de serem mecanicamente escavadas, pois com o uso de explosivos é possível obter uma fragmentação mais adequada e de baixo custo (Rosenhaim *et al.*, 2011). A Figura 17 apresenta o perfil estratigráfico das camadas de carvão e estéril que compõe a mina.

Figura 17 - Perfil estratigráfico das camadas de carvão e estéril.

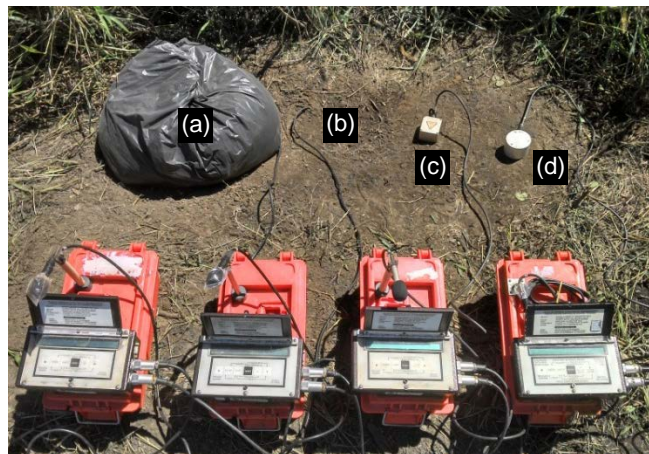


Fonte: Rosenhaim *et al.*, 2011.

Para avaliar a influência dos métodos de fixação de geofone nos parâmetros de vibração, 30 detonações em carvão e estéril foram monitoradas no período de Março a Junho de 2017. Furos de 76,2 mm de diâmetro, carregados com emulsão bombeada, foram iniciados com sistema de tubo de choque com retardos e reforçadores como carga de fundo. A carga máxima por espera variou de 11,8 a 262,9 kg. A distância dos geofones às detonações variou de 65 a 310 metros.

Quatro sismógrafos modelo *Mini-Seis*, fabricados pela empresa *White Industrial Seismology, Inc.*, foram montados lado a lado usando quatro métodos diferentes para registrar simultaneamente as vibrações do solo (Figura 18). Esses instrumentos atendem ou excedem as especificações de desempenho definidas por ISEE (2014) e pela NBR 9653 (ABNT, 2005). Os sismógrafos foram configurados para registrar os eventos por um período de 4 segundos a uma taxa de amostragem de 1024 amostras por segundo por canal. O nível mínimo de vibração para acionar o equipamento (gatilho) foi configurado em 1,0 mm/s. Uma área foi limpa para permitir a instalação dos geofones no solo sem intervenção da grama. Os geofones foram nivelados e a seta marcada no topo dos mesmos foi orientada em direção à detonação.

Figura 18 - Quatro métodos de instalação de geofones usados neste estudo: (a) sob saco; (b) enterrado; (c) cravado; (d) sobre o solo.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

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 (Figura 18a). O segundo foi enterrado no solo a uma profundidade de aproximadamente 15 cm, sendo o solo firmemente compactado ao redor e sobre o geofone (Figuras 18b e 19). 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 (Figuras 18c e 20). O quarto foi colocado sobre uma superfície horizontal sem qualquer dispositivo para fornecer uma força de retenção (Figura 18d). Todos os geofones foram conectados às suas respectivas unidades de gravação.

Figura 19 - Enterramento do geofone.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Figura 20 - Geofone com cravos.



Fonte: Foto tirada pelo autor.

Os dados coletados foram armazenados na memória interna dos equipamentos, sendo posteriormente transferidos para um computador e analisados no *software Seismograph Data Analysis*.

#### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Um total de 120 eventos, quatro por detonação, foi registrado durante o programa de monitoramento. Os resultados são mostrados na Tabela 2, que apresenta o número de série do sismógrafo (NS), carga máxima por espera (CME), distância dos geofones ao local de detonação (D), métodos de instalação dos geofones, velocidades de vibração de partícula de pico (PPV), frequência associada à velocidade de vibração de partícula de pico (frequência de pico) e aceleração. A aceleração das partículas foi calculada pela diferenciação dos históricos de velocidade à taxa de 1024 amostras por segundo por canal, exceto nos eventos em que apenas os dados resumidos (velocidade e frequência de pico) estavam disponíveis na memória do sismógrafo, nos quais a aceleração foi calculada através da equação 2.3. A disponibilidade apenas dos dados resumidos e a falta do registro da forma de onda na memória do aparelho significa que os registros desses eventos foram sobrescritos. Isso pode ocorrer, de acordo com o *software Seismograph Data Analysis*, quando a memória é excedida, o instrumento é desligado durante o processamento de um gatilho ou se vários gatilhos são recebidos em sequência.

Tabela 2 - Resultados de vibração do solo para diferentes métodos de instalação

Detonação	CME (Kg)	D (m)	NS	Método de instalação	PPV (mm/s)	Frequência de pico (Hz)	Aceleração (g)
1	110,5	150	1498	Sobre o solo	6,22	6,0	0,05
			5426	Sob saco	6,60	6,4	0,09
			5425	Cravado	6,35	6,2	0,05
			5948	Enterrado	5,33	6,4	0,05
2	28,7	180	1498	Sobre o solo	3,56	8,5	0,11
			5426	Sob saco	3,81	8,9	0,08
			5425	Cravado	3,56	8,6	0,12
			5948	Enterrado	2,54	8,5	0,05
3	72,9	240	1498	Sobre o solo	2,29	20,4	0,07
			5426	Sob saco	3,05	42,6	0,07
			5425	Cravado	2,79	23,2	0,05
			5948	Enterrado	2,29	23,2	0,05
4	147,8	160	1498	Sobre o solo	5,97	4,4	0,05
			5426	Sob saco	6,35	15,0	0,05
			5425	Cravado	6,10	13,8	0,07
			5948	Enterrado	5,59	4,4	0,05
5	153,0	65	5426	Sobre o solo	15,20	17,6	0,42
			1498	Sob saco	15,20	10,2	0,28
			5425	Cravado	14,50	8,0	0,38
			5948	Enterrado	14,50	8,1	0,29

Tabela 2 - Resultados de vibração do solo para diferentes métodos de instalação (continuação)

Detonação	CME (Kg)	D (m)	NS	Método de instalação	PPV (mm/s)	Frequência de pico (Hz)	Aceleração (g)
6	30,0	230	5426	Sobre o solo	1,27	7,7	0,01
			1498	Sob saco	1,27	5,6	0,01
			5425	Cravado	1,27	7,8	0,01
			5948	Enterrado	1,27	5,8	0,01
7	63,8	130	5426	Sobre o solo	4,57	25,6	0,08
			1498	Sob saco	4,57	25,6	0,07
			5425	Cravado	4,06	24,3	0,07
			5948	Enterrado	3,81	25,6	0,05
8	63,0	220	5426	Sobre o solo	4,32	3,7	0,05
			1498	Sob saco	4,06	3,6	0,05
			5425	Cravado	4,32	3,7	0,04
			5948	Enterrado	4,06	3,7	0,04
9	116,9	260	5426	Sobre o solo	1,02	6,2	0,01
			1498	Sob saco	1,02	5,2	0,01
			5425	Cravado	1,02	6,5	0,01
			5948	Enterrado	1,02	6,3	0,01
10	81,0	150	5426	Sobre o solo	4,06	3,7	0,03
			1498	Sob saco	4,06	2,9	0,01*
			5425	Cravado	4,06	3,6	0,03
			5948	Enterrado	4,06	3,0	0,03
11	108,4	165	5426	Sobre o solo	6,60	4,6	0,03
			1498	Sob saco	6,60	4,6	0,02*
			5425	Cravado	6,85	4,6	0,03
			5948	Enterrado	6,60	4,8	0,03
12	115,1	115	5426	Sobre o solo	6,35	42,6	0,15
			1498	Sob saco	7,36	39,3	0,19*
			5425	Cravado	6,35	39,3	0,19
			5948	Enterrado	5,84	39,3	0,13
13	73,5	160	5426	Sobre o solo	9,14	102,4	0,52
			1498	Sob saco	7,11	6,8	0,03*
			5425	Cravado	9,65	85,3	0,53
			5948	Enterrado	9,65	73,1	0,57
14	87,3	130	5426	Sobre o solo	18,30	7,8	0,13
			1498	Sob saco	18,20	7,7	0,09*
			5425	Cravado	18,00	7,8	0,13
			5948	Enterrado	18,00	7,7	0,13
15	160,3	185	5426	Sobre o solo	4,82	6,1	0,03
			1498	Sob saco	4,44	6,1	0,02*
			5425	Cravado	4,57	6,2	0,04
			5948	Enterrado	4,57	6,0	0,04
16	262,9	130	5426	Sobre o solo	3,04	24,3	0,08
			1498	Sob saco	4,69	22,2	0,07*
			5425	Cravado	3,30	24,3	0,07
			5948	Enterrado	3,04	24,3	0,05
17	44,6	160	1498	Sobre o solo	3,04	4,2	0,01*
			5426	Sob saco	3,30	5,8	0,03
			5425	Cravado	3,04	10,2	0,03
			5948	Enterrado	2,79	11,1	0,03
18	39,9	110	5426	Sobre o solo	14,73	56,8	0,68
			1498	Sob saco	9,14	46,5	0,27*
			5425	Cravado	10,92	56,8	0,41
			5948	Enterrado	12,19	56,8	0,45

\*Aceleração calculada

Tabela 2 - Resultados de vibração do solo para diferentes métodos de instalação (conclusão)

Detonação	CME (Kg)	D (m)	NS	Método de instalação	PPV (mm/s)	Frequência de pico (Hz)	Aceleração (g)
19	58,2	250	5426	Sobre o solo	2,54	9,8	0,03
			1498	Sob saco	2,66	9,6	0,02
			5425	Cravado	2,54	9,8	0,03
			5948	Enterrado	2,54	9,4	0,03
20	34,0	160	5426	Sobre o solo	3,04	9,6	0,03
			1498	Sob saco	3,04	11,6	0,03
			5425	Cravado	3,04	9,3	0,03
			5948	Enterrado	2,54	12,4	0,03
21	26,5	175	5426	Sobre o solo	11,43	46,5	0,31
			1498	Sob saco	9,39	46,5	0,25
			5425	Cravado	9,65	46,5	0,25
			5948	Enterrado	9,65	46,5	0,25
22	86,8	245	5426	Sobre o solo	2,28	42,6	0,07
			1498	Sob saco	2,92	42,6	0,08
			5425	Cravado	2,03	39,3	0,05
			5948	Enterrado	2,03	36,5	0,05
23	29,4	140	5426	Sobre o solo	8,12	51,2	0,29
			1498	Sob saco	7,36	39,3	0,22
			5425	Cravado	7,36	46,5	0,24
			5948	Enterrado	7,62	46,5	0,25
24	78,3	220	5426	Sobre o solo	4,57	51,2	0,13
			1498	Sob saco	4,69	46,5	0,12
			5425	Cravado	4,31	22,2	0,11
			5948	Enterrado	4,31	22,2	0,11
25	186,1	290	5426	Sobre o solo	2,54	8,9	0,03
			1498	Sob saco	2,54	8,0	0,02
			5425	Cravado	2,54	8,6	0,03
			5948	Enterrado	2,28	8,8	0,03
26	68,1	110	5426	Sobre o solo	9,65	51,2	0,33
			1498	Sob saco	8,38	20,4	0,13
			5425	Cravado	7,62	19,6	0,21
			5948	Enterrado	7,87	19,6	0,19
27	61,3	150	5426	Sobre o solo	13,20	10,2	0,25
			1498	Sob saco	11,93	9,8	0,20
			5425	Cravado	12,70	10,2	0,23
			5948	Enterrado	12,19	10,0	0,23
28	65,9	310	5426	Sobre o solo	1,01	56,8	0,04
			1498	Sob saco	1,14	42,6	0,03
			5425	Cravado	1,01	46,5	0,03
			5948	Enterrado	1,01	51,2	0,03
29	11,8	120	5426	Sobre o solo	9,39	102,4	0,62
			1498	Sob saco	6,22	18,2	0,17
			5425	Cravado	8,89	46,5	0,48
			5948	Enterrado	6,35	39,3	0,20
30	70,3	140	5426	Sobre o solo	7,87	36,5	0,27
			1498	Sob saco	8,50	34,1	0,17
			5425	Cravado	8,38	34,1	0,25
			5948	Enterrado	9,39	34,1	0,25

Assumindo-se que o enterramento do geofone proporciona o melhor acoplamento, as leituras dos outros três geofones foram realizadas em relação à do enterrado. De acordo com as especificações de desempenho determinadas por ISEE (2014) e pela NBR 9653 (ABNT, 2005), os transdutores de velocidade devem apresentar uma acurácia de  $\pm 5\%$  ou uma diferença máxima de 0,5 mm/s, o que for maior. Portanto, estas especificações permitiriam uma diferença entre dois sismógrafos de até 10% ou 1,0 mm/s, o que for maior.

#### 4.1 COMPARAÇÃO DE PPV

Os gráficos das Figuras 21 e 22 mostram as diferenças de PPV dos diferentes métodos de instalação em relação ao geofone enterrado, para todas as detonações. Nos gráficos, também, são apresentadas as acelerações de partícula de cada detonação, levando-se em consideração a leitura do geofone enterrado. Na Figura 21 são apresentadas as diferenças relativas de PPV para as detonações com valor de PPV acima de 10 mm/s e na Figura 22, as diferenças absolutas de PPV para as detonações com valor de PPV até 10 mm/s. Tendo em vista as especificações citadas (ABNT, 2005; ISEE 2014), os dados com uma diferença de PPV maior que 10% (Figura 21) ou 1,0 mm/s (Figura 22) foram considerados anômalos.

Figura 21 - Diferenças relativas de PPV para as detonações com valor de PPV acima de 10 mm/s.

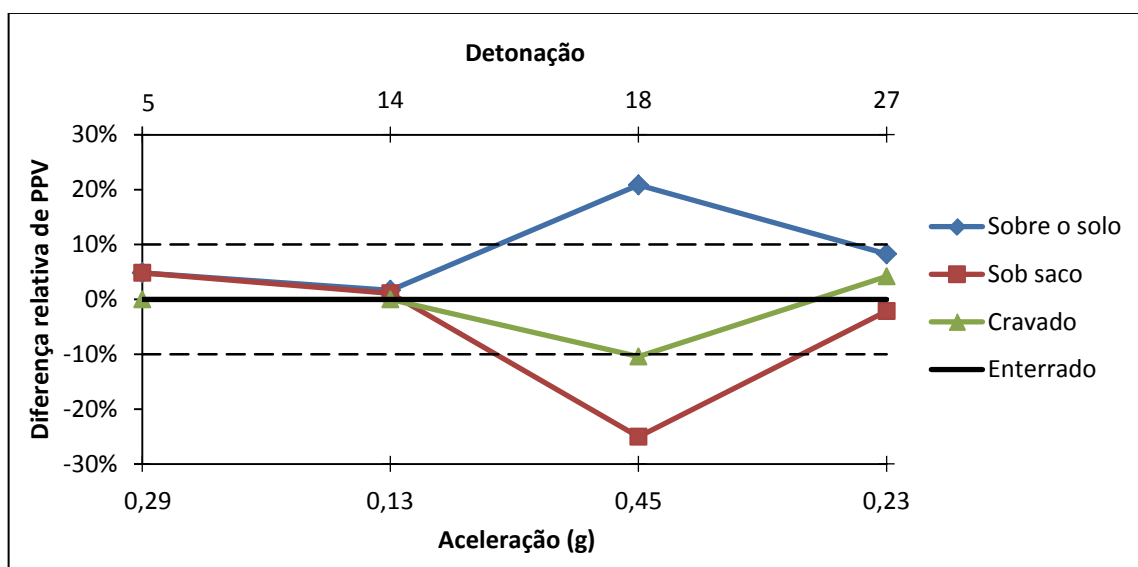
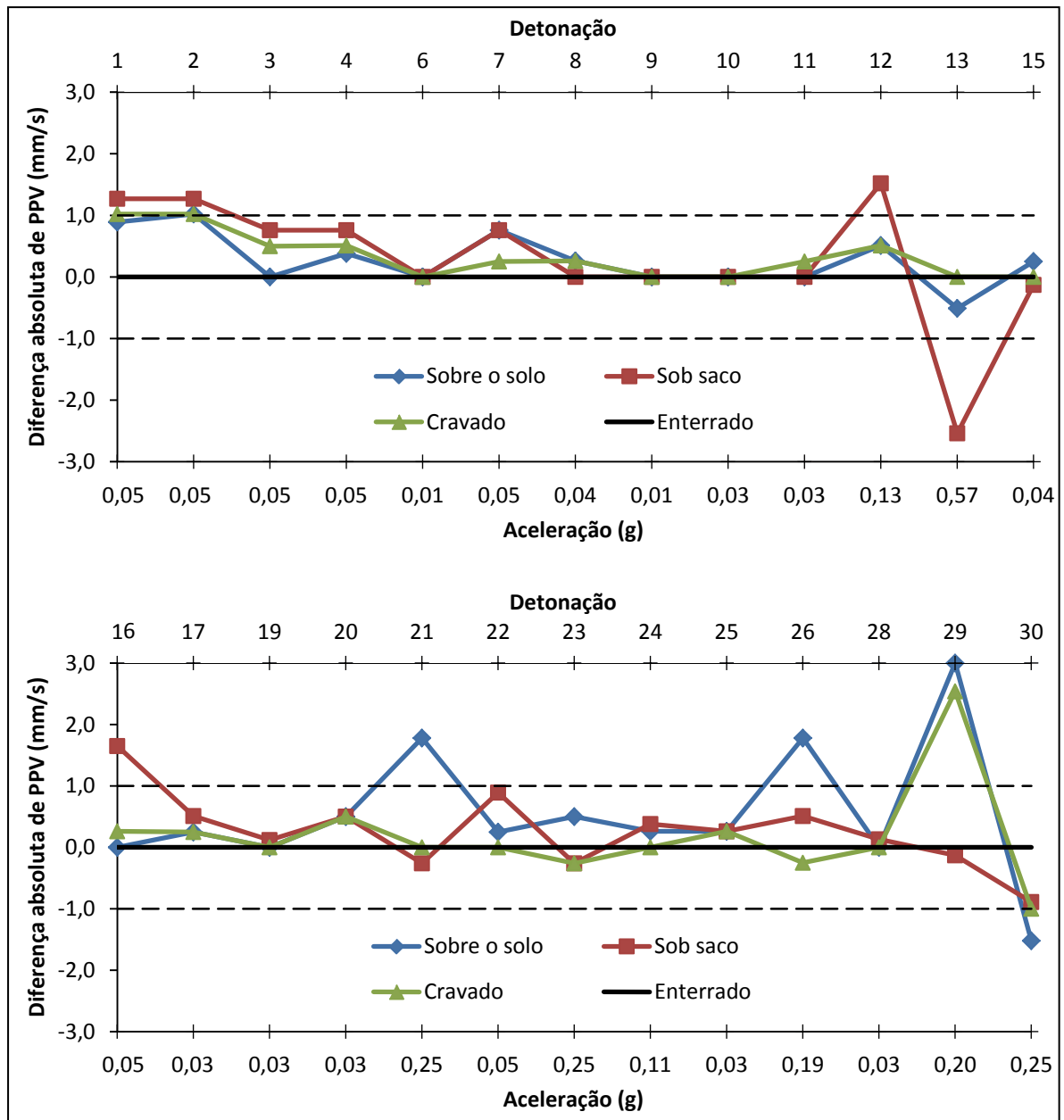




Figura 22 - Diferenças absolutas de PPV para as detonações com valor de PPV até 10 mm/s.



Conforme os gráficos, os valores de PPV para o geofone sobre o solo são anômalos para 5 detonações (18, 21, 26, 29 e 30). A suspeita de desacoplamento com a menor aceleração (0,19 g), ocorrida na detonação 26, apresenta valor muito próximo ao limite de 0,2 g, para o qual nenhum enterramento ou fixação são necessários, de acordo com as recomendações de ISEE (2015a), ISRM (1992) e Stagg e Engler (1980). As detonações 21, 26, 29 e 30, com respectivas acelerações de 0,25 g, 0,19 g, 0,20 g e 0,25 g, contradizem a recomendação de Dowding (1996), de que 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.

O geofone instalado sob saco de areia apresentou valores de PPV anômalos para as detonações 1 (0,05 g), 2 (0,05 g), 12 (0,13 g), 13 (0,57 g) 16 (0,05 g) e 18 (0,45 g). O desacoplamento é mais provável em maiores magnitudes de vibração do solo, de modo que os problemas de desacoplamento nas detonações 1, 2 e 16 não fossem esperados, pela baixa aceleração de partícula (0,05 g). Isto contradiz Stagg e Engler (1980), que mencionam que os sacos de areia podem ser usados quando a aceleração de partícula esperada está abaixo de 1,0 g e Instanetel (2013), cujo manual de operação afirma que um saco de areia pode ser usado onde os níveis de velocidade são muito baixos. Robertson (1993), por sua vez, também, demonstrou que um saco de areia não fornece um bom acoplamento.

No que diz respeito à utilização de cravos, apenas a detonação 29, com aceleração de partícula de 0,20 g, apresentou diferença de PPV maior que o limite considerado. Se esta leitura anômala for atribuída a uma instalação não apropriada, isto corrobora a determinação da NBR 9653, que admite o uso de cravos, desde que o sistema não fique em balanço.

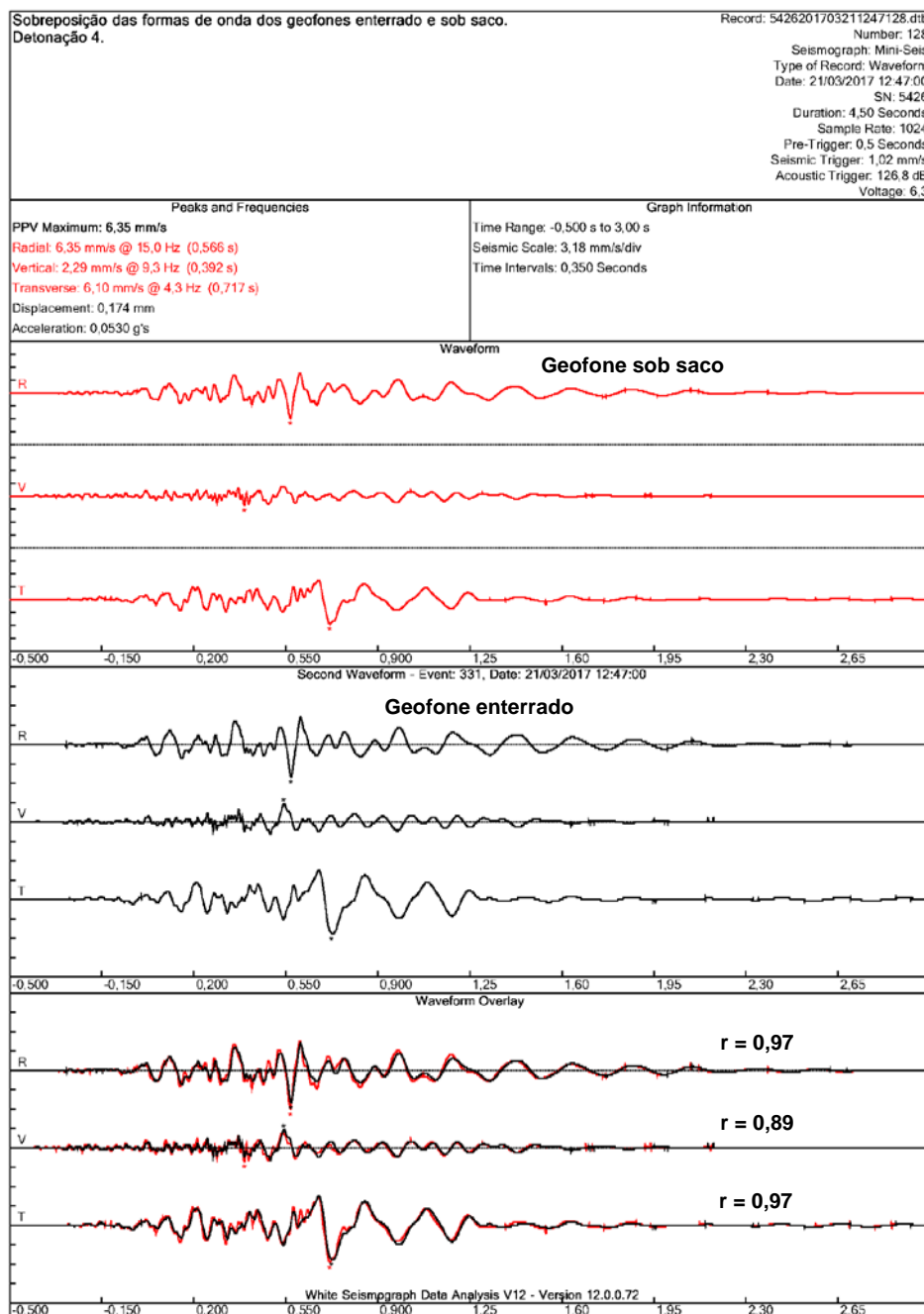
Vale ressaltar que dos 90 registros de PPV comparados com os do geofone enterrado, apenas 11 leituras, ou 12%, apresentaram valores menores que os do geofone enterrado. Percebe-se que os geofones sobre o solo, sob saco de areia e cravado, têm maior liberdade para se mover durante a vibração e, conseqüentemente, registram amplitudes de vibração maiores do que a vibração real do solo. O geofone enterrado mantém melhor contato com o solo e representa mais estreitamente o movimento do mesmo, conforme indicado pela maioria das recomendações citadas. Os valores frequentemente mais altos registrados pelos outros métodos de montagem, em relação ao geofone enterrado, podem fazer a diferença entre o atendimento e a ultrapassagem dos limites de vibração impostos pela NBR 9653 (ABNT, 2005).

#### 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 (Gomes; Koppe; Munaretti, 2017). A Figura 23 mostra os históricos de velocidade do geofone enterrado sobrepostos aos históricos de velocidade do geofone sob saco para a detonação 4.

Figura 23 - Formas de onda sobrepostas dos geofones enterrado e sob saco (detonação 4).



Fonte: Seismograph Data Analysis.

O coeficiente de correlação ( $r$ ) entre duas formas de onda indica o grau de similaridade das mesmas. Previamente ao cálculo dos coeficientes de correlação, os registros temporais de velocidade (formas de onda) foram alinhados por meio do *software* MATLAB, pois como o gatilho (*trigger*) era acionado com pequena diferença de tempo entre os sismógrafos, os registros temporais apresentavam defasagem. Os coeficientes de correlação entre as formas de onda alinhadas do geofone enterrado e as dos outros geofones são apresentadas na Tabela 3, exceto para os eventos em que as formas de onda não estavam disponíveis na memória do sismógrafo, porém, apresentam-se apenas os dados resumidos (velocidade e frequência de pico). 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.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre formas de onda

Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação ( $r$ )		
		Radial	Vertical	Transversal
1	Sobre o solo	0,99	0,95	0,99
	Sob sacco	0,95	0,80	0,96
	Cravado	0,98	0,96	0,99
2	Sobre o solo	0,90	0,83	0,82
	Sob sacco	0,88	0,84	0,83
	Cravado	0,90	0,91	0,85
3	Sobre o solo	0,92	0,93	0,94
	Sob sacco	0,90	0,86	0,94
	Cravado	0,91	0,94	0,92
4	Sobre o solo	0,98	0,96	0,98
	Sob sacco	0,97	0,89	0,97
	Cravado	0,93	0,94	0,93
5	Sobre o solo	0,97	0,96	0,96
	Sob sacco	0,98	0,96	0,97
	Cravado	0,97	0,99	0,96
6	Sobre o solo	0,90	0,91	0,94
	Sob sacco	0,93	0,86	0,94
	Cravado	0,86	0,87	0,94
7	Sobre o solo	0,98	0,96	0,97
	Sob sacco	0,96	0,95	0,95
	Cravado	0,97	0,95	0,95
8	Sobre o solo	0,97	0,94	0,99
	Sob sacco	0,98	0,95	0,99
	Cravado	0,97	0,97	0,99
9	Sobre o solo	0,95	0,94	0,95
	Sob sacco	0,97	0,95	0,96
	Cravado	0,94	0,96	0,95

Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre formas de onda (continuação)

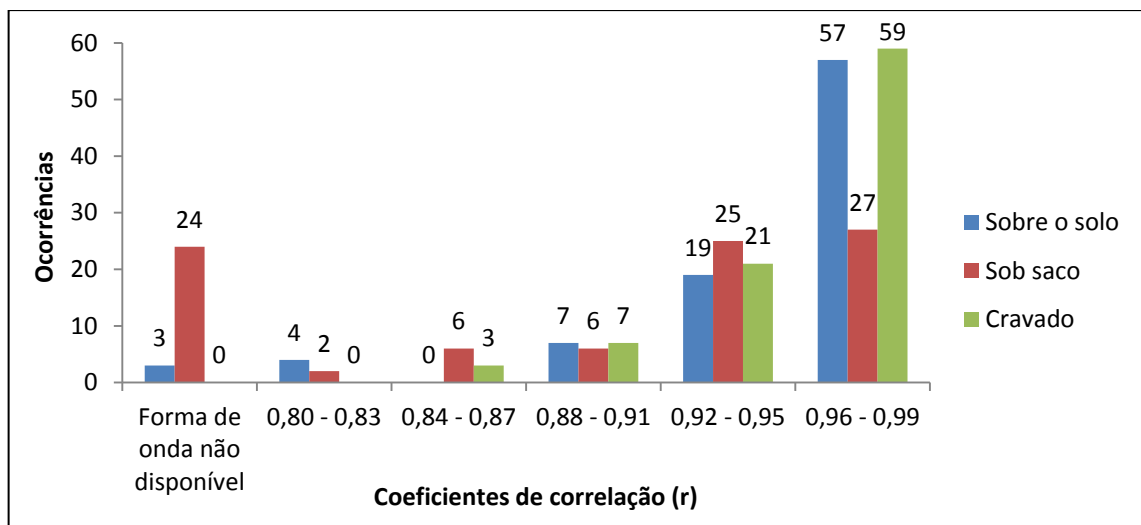
Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação (r)		
		Radial	Vertical	Transversal
10	Sobre o solo	0,97	0,96	0,96
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,99	0,96	0,98
11	Sobre o solo	0,99	0,99	0,98
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,99	0,99	0,98
12	Sobre o solo	0,97	0,99	0,96
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,96	0,98	0,96
13	Sobre o solo	0,98	0,91	0,98
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,98	0,93	0,98
14	Sobre o solo	0,99	0,99	0,99
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,99	0,95	0,99
15	Sobre o solo	0,99	0,97	0,98
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,99	0,94	0,98
16	Sobre o solo	0,97	0,96	0,97
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,96	0,97	0,96
17	Sobre o solo	Forma de onda não disponível		
	Sob sacco	0,96	0,94	0,97
	Cravado	0,97	0,94	0,97
18	Sobre o solo	0,96	0,89	0,92
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,97	0,97	0,94
19	Sobre o solo	0,97	0,96	0,97
	Sob sacco	0,98	0,95	0,96
	Cravado	0,97	0,96	0,96
20	Sobre o solo	0,97	0,95	0,99
	Sob sacco	0,95	0,95	0,98
	Cravado	0,96	0,95	0,98
21	Sobre o solo	0,98	0,98	0,96
	Sob sacco	0,96	0,90	0,94
	Cravado	0,99	0,98	0,98
22	Sobre o solo	0,94	0,98	0,95
	Sob sacco	0,87	0,92	0,87
	Cravado	0,92	0,98	0,96
23	Sobre o solo	0,98	0,98	0,97
	Sob sacco	0,95	0,95	0,96
	Cravado	0,99	0,98	0,99
24	Sobre o solo	0,99	0,99	0,98
	Sob sacco	0,93	0,95	0,94
	Cravado	0,99	0,99	0,99
25	Sobre o solo	0,98	0,93	0,98
	Sob sacco	0,98	0,87	0,95
	Cravado	0,97	0,92	0,97
26	Sobre o solo	0,95	0,90	0,95
	Sob sacco	0,98	0,93	0,93
	Cravado	0,97	0,96	0,95
27	Sobre o solo	0,99	0,98	0,99
	Sob sacco	0,98	0,97	0,97
	Cravado	0,99	0,98	0,99

Tabela 3 - Coeficientes de correlação entre formas de onda (conclusão)

Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação (r)		
		Radial	Vertical	Transversal
28	Sobre o solo	0,91	0,93	0,92
	Sob saco	0,90	0,93	0,89
	Cravado	0,90	0,90	0,91
29	Sobre o solo	0,95	0,82	0,82
	Sob saco	0,98	0,93	0,96
	Cravado	0,92	0,89	0,95
30	Sobre o solo	0,98	0,97	0,98
	Sob saco	0,97	0,94	0,96
	Cravado	0,99	0,99	0,99

Foram obtidos altos coeficientes de correlação, haja vista que o menor consiste em 0,80, o qual foi obtido pela sobreposição das formas de onda do canal vertical dos geofones enterrado e sob saco, para a detonação 1. Os coeficientes de correlação obtidos são representados graficamente no histograma da Figura 24.

Figura 24 - Histograma dos coeficientes de correlação entre formas de onda.



Um geofone mal acoplado pode causar distorção de formas de onda em apenas uma ou duas componentes de vibração do solo. Se a componente distorcida for diferente da relacionada à velocidade de vibração de partícula de pico, o mau acoplamento pode não ser verificado pela análise de PPV. Como na comparação das formas de onda, das três componentes de vibração do solo, foram obtidos altos coeficientes de correlação, esta análise não indicou problemas adicionais de desacoplamento, em relação à análise de velocidade, anteriormente realizada.

### 4.3 ANÁLISE DOS ESPECTROS DE FREQUÊNCIA

A ocorrência de desacoplamento, também, foi avaliada por meio dos espectros de frequência, obtidos pela análise de Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*). A análise de FFT foi aplicada para calcular as frequências dominantes do movimento do solo. A frequência na maior amplitude espectral foi considerada como frequência dominante. As frequências dominantes, que são responsáveis por carregar a maior porcentagem da energia das ondas sísmicas, são apresentadas na Tabela 4, exceto para os eventos em que as formas de onda não estavam disponíveis na memória do sismógrafo.

Tabela 4 - Frequências dominantes nas 3 componentes de vibração

Detonação	Método de instalação	Frequência dominante - FFT (Hz)		
		Radial	Vertical	Transversal
1	Sobre o solo	4,3	4,3	6,9
	Sob saco	4,1	39,3	6,8
	Cravado	4,3	4,3	6,8
	Enterrado	4,3	4,3	6,8
2	Sobre o solo	4,8	4,9	4,5
	Sob saco	12,3	4,9	5,5
	Cravado	12,3	4,9	5,5
	Enterrado	4,3	4,9	5,5
3	Sobre o solo	12,8	25,1	10,8
	Sob saco	12,8	25,1	10,8
	Cravado	12,8	25,0	10,8
	Enterrado	12,6	25,0	10,8
4	Sobre o solo	4,6	10,6	5,0
	Sob saco	4,6	10,6	5,0
	Cravado	4,6	10,6	5,0
	Enterrado	4,6	10,6	5,0
5	Sobre o solo	4,3	6,4	4,6
	Sob saco	10,4	6,3	4,6
	Cravado	4,4	6,3	4,6
	Enterrado	4,3	6,3	4,6
6	Sobre o solo	4,4	6,4	5,1
	Sob saco	4,4	6,3	5,1
	Cravado	4,4	6,4	5,1
	Enterrado	4,3	6,4	5,1
7	Sobre o solo	34,0	34,5	5,1
	Sob saco	34,0	34,4	33,5
	Cravado	9,4	34,3	33,6
	Enterrado	34,1	34,6	5,1
8	Sobre o solo	4,4	5,0	4,3
	Sob saco	4,4	5,0	3,1
	Cravado	4,4	5,0	4,3
	Enterrado	4,3	5,0	3,1

Tabela 4 - Frequências dominantes nas 3 componentes de vibração (continuação)

Detonação	Método de instalação	Frequência dominante - FFT (Hz)		
		Radial	Vertical	Transversal
9	Sobre o solo	4,4	4,9	4,1
	Sob saco	4,4	4,8	4,1
	Cravado	4,4	4,9	4,1
	Enterrado	4,4	4,9	4,3
10	Sobre o solo	3,5	4,9	4,5
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	3,5	4,9	4,5
	Enterrado	3,6	4,9	4,5
11	Sobre o solo	3,4	6,1	4,0
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	3,4	6,3	4,0
	Enterrado	3,4	6,1	4,0
12	Sobre o solo	6,9	30,5	7,4
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	6,9	30,5	7,4
	Enterrado	6,9	30,5	7,3
13	Sobre o solo	7,8	5,0	3,0
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	7,8	5,0	3,0
	Enterrado	7,8	5,0	3,0
14	Sobre o solo	4,8	9,1	4,1
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	4,8	8,0	4,1
	Enterrado	4,8	9,5	4,1
15	Sobre o solo	4,0	8,1	4,0
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	4,0	8,1	4,0
	Enterrado	4,0	8,1	4,0
16	Sobre o solo	11,4	24,9	7,5
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	11,4	24,9	7,5
	Enterrado	11,5	25,0	7,5
17	Sobre o solo	Forma de onda não disponível		
	Sob saco	5,1	7,4	4,4
	Cravado	5,1	7,4	4,4
	Enterrado	5,1	7,4	4,4
18	Sobre o solo	11,0	31,8	9,4
	Sob saco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	10,6	31,8	9,4
	Enterrado	10,8	31,8	9,4
19	Sobre o solo	4,3	6,5	4,4
	Sob saco	4,1	6,6	4,4
	Cravado	4,1	6,5	4,4
	Enterrado	4,3	6,5	4,4
20	Sobre o solo	5,5	7,1	7,0
	Sob saco	5,5	7,0	6,3
	Cravado	7,8	7,1	6,3
	Enterrado	5,5	7,1	7,0
21	Sobre o solo	23,9	50,6	10,0
	Sob saco	24,0	49,1	24,5
	Cravado	24,0	50,6	10,0
	Enterrado	23,9	50,6	10,0

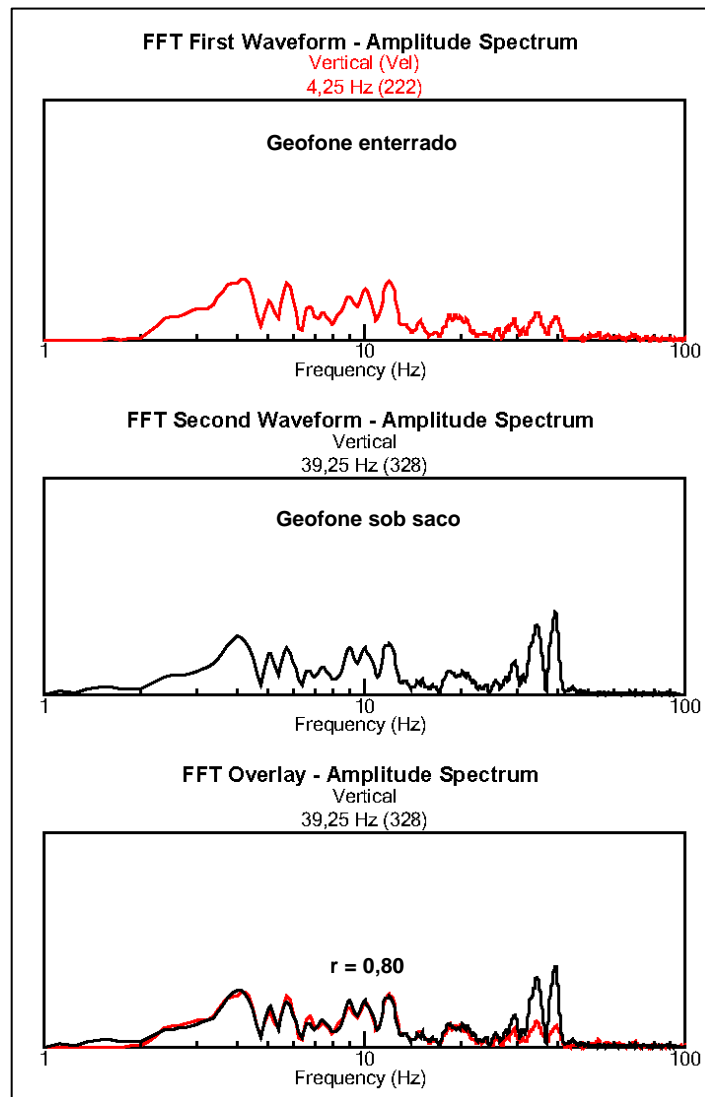


Tabela 4 - Frequências dominantes nas 3 componentes de vibração (conclusão)

Detonação	Método de instalação	Frequência dominante - FFT (Hz)		
		Radial	Vertical	Transversal
22	Sobre o solo	32,8	33,4	10,8
	Sob saco	32,6	33,6	10,8
	Cravado	32,9	33,6	10,6
	Enterrado	10,6	33,4	10,8
23	Sobre o solo	9,0	28,0	7,6
	Sob saco	9,0	27,5	7,6
	Cravado	9,0	28,1	7,5
	Enterrado	9,0	28,0	7,5
24	Sobre o solo	25,8	44,4	8,0
	Sob saco	25,6	44,4	27,0
	Cravado	25,8	44,4	8,0
	Enterrado	25,8	44,4	8,0
25	Sobre o solo	6,0	9,6	5,6
	Sob saco	5,9	9,8	5,8
	Cravado	5,9	9,6	5,6
	Enterrado	6,0	9,6	5,6
26	Sobre o solo	21,1	35,9	6,3
	Sob saco	21,1	35,9	7,1
	Cravado	21,1	35,9	6,3
	Enterrado	21,1	35,9	7,1
27	Sobre o solo	7,5	36,1	7,6
	Sob saco	7,5	36,1	7,6
	Cravado	7,6	36,1	7,6
	Enterrado	7,6	36,1	7,6
28	Sobre o solo	7,6	7,4	5,6
	Sob saco	7,6	39,8	5,6
	Cravado	7,6	39,9	5,6
	Enterrado	7,8	39,8	5,5
29	Sobre o solo	9,1	32,1	7,0
	Sob saco	9,1	30,8	7,0
	Cravado	9,1	30,8	7,0
	Enterrado	9,1	30,8	7,0
30	Sobre o solo	6,3	29,4	6,4
	Sob saco	6,3	29,4	6,4
	Cravado	6,3	29,4	6,4
	Enterrado	6,3	29,4	6,4

Comparando-se as frequências dominantes dos geofones sobre o solo, sob saco de areia e cravado com as registradas pelo geofone enterrado, a maior diferença relativa ocorreu na detonação 1, no canal vertical do geofone sob saco. Os espectros de frequência do canal vertical dos eventos registrados pelos geofones enterrado e sob saco para a detonação 1 são mostrados na Figura 25. A frequência dominante para o geofone enterrado é 4,25 Hz. Para o geofone sob saco, a frequência dominante é 39,25. Os dois picos de amplitude espectral próximos a 39 Hz indicam o desacoplamento do geofone sob saco.

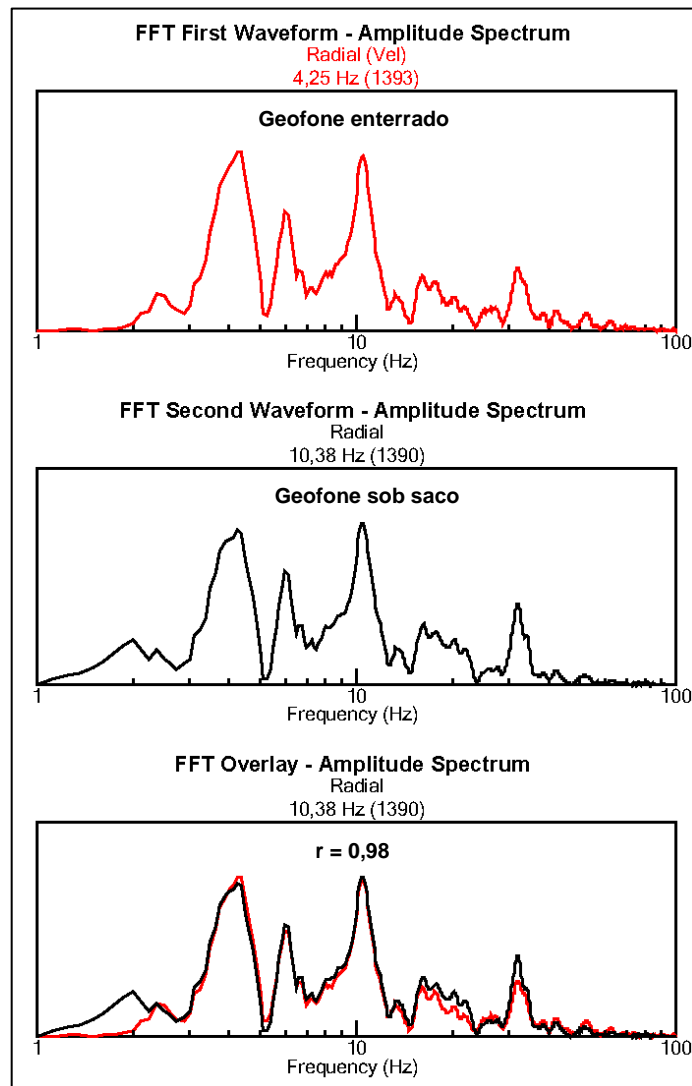
Figura 25 - Espectros de frequência dos geofones enterrado e sob saco (detonação 1).



Fonte: *Seismograph Data Analysis*.

Para a detonação 5, o canal radial do geofone enterrado registrou frequência dominante de 4,25 Hz e frequência secundária de 10,38 Hz. Para o geofone sob saco, as frequências dominantes e secundárias estão trocadas (Figura 26). Tais trocas em frequências foram observadas quando duas ou mais frequências com amplitudes espectrais quase iguais estavam presentes em um evento. Apesar da diferença entre as frequências dominantes desses eventos, há pouca diferença entre seus espectros de frequência, conforme apontado pelo coeficiente de correlação ( $r = 0,98$ ) obtido.

Figura 26 - Espectros de frequência dos geofones enterrado e sob saco (detonação 5).



Fonte: *Seismograph Data Analysis*.

Considerando que a simples comparação entre as frequências dominantes não é suficiente para avaliar similaridade dos espectros de frequência, procedeu-se ao cálculo dos coeficientes de correlação entre os espectros de frequência dos geofones sobre o solo, sob saco e cravado em comparação ao geofone enterrado. Diferentemente do cálculo dos coeficientes de correlação entre formas de onda (históricos temporais), não foi necessário o prévio alinhamento dos espectros de frequência, pois a Transformada Rápida de Fourier converte o domínio temporal em uma distribuição de frequência (espectros contínuos), não havendo defasagem temporal entre os mesmos. Os coeficientes de correlação entre espectros de frequência do geofone enterrado e os dos outros geofones são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação entre espectros de frequência

Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação (r)		
		Radial	Vertical	Transversal
1	Sobre o solo	0,99	0,97	0,99
	Sob sacco	0,98	0,80	0,99
	Cravado	0,99	0,98	1,00
2	Sobre o solo	0,93	0,83	0,89
	Sob sacco	0,90	0,87	0,86
	Cravado	0,94	0,94	0,90
3	Sobre o solo	0,93	0,96	0,97
	Sob sacco	0,92	0,90	0,97
	Cravado	0,95	0,96	0,96
4	Sobre o solo	0,99	0,98	0,99
	Sob sacco	0,99	0,94	0,98
	Cravado	0,97	0,97	0,96
5	Sobre o solo	0,98	0,97	0,97
	Sob sacco	0,98	0,97	0,98
	Cravado	0,98	0,99	0,98
6	Sobre o solo	0,97	0,97	0,98
	Sob sacco	0,98	0,95	0,98
	Cravado	0,94	0,96	0,98
7	Sobre o solo	0,99	0,98	0,98
	Sob sacco	0,97	0,97	0,96
	Cravado	0,99	0,97	0,97
8	Sobre o solo	0,99	0,98	1,00
	Sob sacco	0,99	0,98	1,00
	Cravado	0,99	0,99	1,00
9	Sobre o solo	0,99	0,98	0,99
	Sob sacco	0,99	0,98	0,99
	Cravado	0,98	0,99	0,99
10	Sobre o solo	0,99	0,99	0,98
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	1,00	0,98	0,99
11	Sobre o solo	1,00	1,00	0,99
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	1,00	1,00	1,00
12	Sobre o solo	0,98	0,99	0,97
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,96	0,99	0,98
13	Sobre o solo	0,99	0,92	0,99
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,99	0,94	0,99
14	Sobre o solo	1,00	0,99	0,99
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	1,00	0,98	1,00
15	Sobre o solo	1,00	0,99	0,99
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	1,00	0,98	1,00
16	Sobre o solo	0,99	0,97	0,98
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	0,98	0,97	0,97
17	Sobre o solo	Forma de onda não disponível		
	Sob sacco	0,98	0,97	0,99
	Cravado	0,99	0,98	0,98
18	Sobre o solo	0,99	0,99	0,97
	Sob sacco	Forma de onda não disponível		
	Cravado	1,00	1,00	0,99

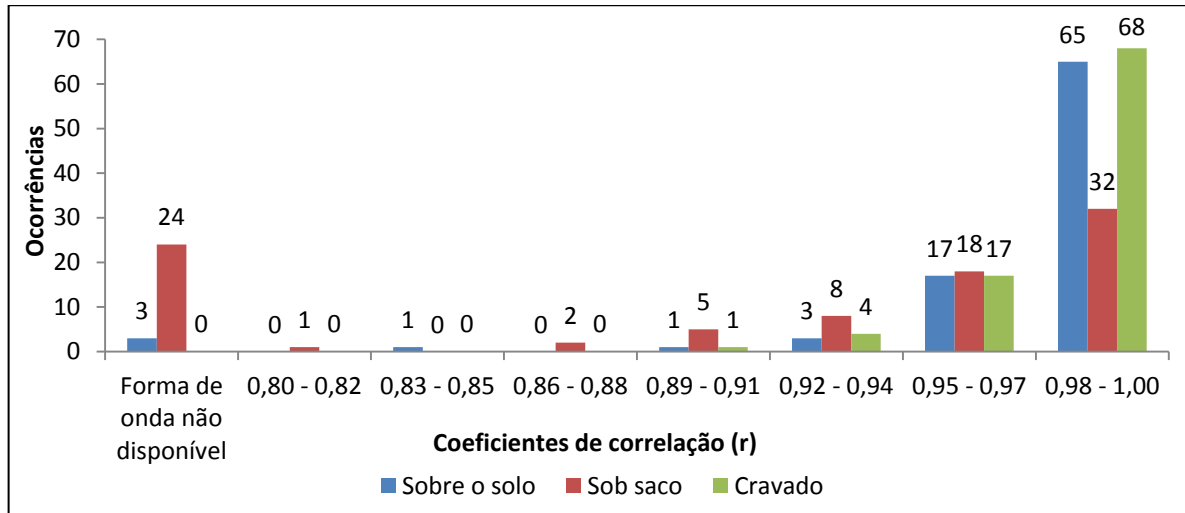
Tabela 5 - Coeficientes de correlação entre espectros de frequência (conclusão)

Detonação	Entre geofone enterrado e	Coeficiente de correlação (r)		
		Radial	Vertical	Transversal
19	Sobre o solo	0,99	0,99	0,99
	Sob sacco	0,99	0,98	0,99
	Cravado	0,99	0,99	0,99
20	Sobre o solo	0,99	0,98	1,00
	Sob sacco	0,98	0,98	0,99
	Cravado	0,99	0,98	1,00
21	Sobre o solo	0,99	0,98	0,97
	Sob sacco	0,98	0,92	0,96
	Cravado	0,99	0,99	0,99
22	Sobre o solo	0,97	0,99	0,98
	Sob sacco	0,90	0,97	0,91
	Cravado	0,96	0,99	0,99
23	Sobre o solo	0,99	0,99	0,97
	Sob sacco	0,97	0,94	0,99
	Cravado	1,00	0,99	1,00
24	Sobre o solo	0,99	0,99	0,99
	Sob sacco	0,95	0,96	0,97
	Cravado	0,99	1,00	1,00
25	Sobre o solo	0,99	0,97	0,99
	Sob sacco	0,99	0,91	0,97
	Cravado	0,99	0,97	0,99
26	Sobre o solo	0,98	0,96	0,98
	Sob sacco	0,99	0,93	0,97
	Cravado	1,00	0,99	0,99
27	Sobre o solo	1,00	0,99	0,99
	Sob sacco	0,99	0,98	0,99
	Cravado	1,00	0,99	1,00
28	Sobre o solo	0,97	0,98	0,97
	Sob sacco	0,94	0,97	0,95
	Cravado	0,96	0,96	0,97
29	Sobre o solo	0,99	0,99	0,99
	Sob sacco	0,99	0,94	0,98
	Cravado	1,00	1,00	1,00
30	Sobre o solo	0,99	0,99	1,00
	Sob sacco	0,98	0,92	0,97
	Cravado	1,00	1,00	1,00

Conforme representado graficamente pelo histograma da Figura 27, foram obtidos altos coeficientes de correlação entre os espectros de frequência, principalmente para o geofone cravado, para o qual os coeficientes de correlação ocorrem a partir de 0,90. Para os geofones sobre o solo e sob sacco, os coeficientes de correlação ocorrem a partir de 0,83 e 0,80, respectivamente. A alta correlação entre os espectros de frequência sugere que a energia relativa por frequência talvez não esteja relacionada com os métodos de montagem, uma vez que inclusive para eventos com leituras anômalas de PPV, foram obtidos espectros de frequência sem desvios de correlação. O geofone cravado, cujo desvio de PPV indicou

desacoplamento para a detonação 29, não exibiu desvios nas correlações de espectros de frequência, nas 3 componentes de vibração.

Figura 27 - Histograma dos coeficientes de correlação entre espectros de frequência.



Para se avaliar a ocorrência de desacoplamento, também se examinou em todos os eventos a presença de frequências dominantes muito baixas, o que, segundo Wheeler (2004), é uma indicação definitiva de desacoplamento. Entretanto, não foram constatadas frequências dominantes muito baixas, uma vez que os menores valores obtidos, de 3 Hz (detonação 13), ocorrem na região, conforme também verificado por Rosenhaim (2015), que obteve frequências dominantes desta magnitude na mesma operação mineira.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

O intuito desse estudo foi avaliar a influência dos métodos de acoplamento de geofone nos parâmetros de vibração, para que possa se assegurar que os níveis de vibração medidos sejam os verdadeiros. A análise dos monitoramentos realizados permitiu determinar a aceitabilidade dos métodos de acoplamento estudados, de acordo com a aceleração prevista.

O enterramento do geofone se mostrou o método de instalação preferível, uma vez que, nos diferentes níveis de aceleração, os registros de PPV mais baixos denotam que o geofone enterrado mantém melhor contato com o solo do que os métodos que apresentam maior liberdade para se mover durante a vibração do solo.

Alternativamente ao enterramento do geofone, a livre colocação sobre o solo se mostrou adequada até acelerações de partícula de 0,2 g, até a qual todas as medições se encontraram dentro da diferença admitida pelas especificações de desempenho consideradas (ABNT, 2005; ISEE 2014).

O geofone instalado sob saco de areia apresentou evidências de desacoplamento desde baixíssimas magnitudes de vibração (0,05 g), caracterizando o método como não recomendado para o monitoramento sismográfico.

O geofone cravado no solo apresentou leitura anômala de PPV em apenas um evento, de aceleração de 0,2 g. Se esta suspeita de desacoplamento for atribuída a uma instalação não apropriada, a cravação de geofones no solo se mostra como alternativa para o monitoramento sismográfico, conforme admitido pela NBR 9653 (ABNT, 2005).

Suspeitas adicionais de desacoplamento não foram indicadas pela análise das formas de onda (históricos temporais). As altas correlações obtidas entre os espectros de frequência (análise de FFT), inclusive para os eventos com leituras anômalas de PPV, sugeriram que talvez não haja relação dos mesmos com os métodos de montagem. Dessa forma, conclui-se que a comparação de PPV foi o método mais eficiente para avaliar as condições de acoplamento.

Ressalta-se que as conclusões obtidas são válidas para níveis de aceleração de 0,01 g a 0,57 g e para as condições de solo no local de teste.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas são propostos para trabalhos posteriores:

- Avaliação dos métodos de montagem de geofones em solo abrangendo-se um intervalo de aceleração maior, podendo-se analisar a admissibilidade do uso de cravos em maiores níveis de vibração.
- Avaliar a influência de parâmetros do solo, como distribuição granulométrica e umidade, nas medidas de vibração de geofone enterrado. Aspectos operacionais, como profundidade de enterramento e compactação do solo ao redor e sobre o geofone, também, podem ser analisados.
- Estudo de diferentes métodos de fixação em superfície rígida nos parâmetros de vibração.



## 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.

AIMONE-MARTIN ASSOCIATES LLC. **Mini-Recorder Seismographs**. Disponível em: <[http://www.aimonemartin.com/seismograph\\_specs.pdf](http://www.aimonemartin.com/seismograph_specs.pdf)>. Acesso em: 2 ago. 2017.

ASH, R. L. Design of Blasting Rounds. In: KENNEDY, B. A. (Ed.). **Surface Mining**. 2. ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1990. p. 565–583.

DEUTSCHE NORM (DIN 4150). **Structural vibration in buildings - effects on structures**. 1986.

DOWDING, C. H. **Blast Vibration Monitoring and Control**. [s.l.] Prentice Hall, 1985.

DOWDING, C. H. **Construction Vibrations**. [s.l.] Prentice Hall, 1996.

DOWDING, C. H. Impacts and Control of Blasting. In: DARLING, P. (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. [s.l.] Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011. p. 1689–1704.

GEOSONICS. **SSU 3000 EZ+**: Manual. Warrendale, 2013. 55 p.

GOKHALE, B. V. **Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines**. Leiden: CRC Press/Balkema, 2011.

GOMES, L. R.; KOPPE, J. C.; MUNARETTI, E. **Influência do acoplamento de geofone nas medidas de vibração em solo**. V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. **Anais...**Criciúma: 2017

HUSTRULID, W. **Blasting principles for open pit mining**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1999.

INSTANTEL. **Minimate Plus**: Operator Manual. Ottawa, 2013. 84 p.

ISEE - INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. **Blasters' Handbook**. 18. ed. Cleveland: ISEE, 2014.

ISEE - INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. **Introduction to Blasting**: A Teacher's Workshop. Cleveland, 2013. 68 p.

ISEE - INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. **Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs**. Cleveland, 2013. 10 p.

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

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; FRANCISCO, J. A. C. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. 2. ed. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 1994.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; FRANCISCO, J. A. C. **Drilling and Blasting of Rocks**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995.

LUSK, B.; WORSEY, P. Explosives and Blasting. In: DARLING, P. (Ed.). **SME Mining Engineering Handbook**. 3. ed. [s.l.] Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011. p. 443–459.

NP 2074. **Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas**. Portugal. 2015. 17 p.

ROBERTSON, D. A. **The neglected step to accurate blast monitoring: Proper coupling**. 9th Annual Symposium on Explosives and Blasting Research. **Anais...**San Diego: 1993.

ROSENHAIM, V. L. et al. **Otimização da fragmentação e minimização de vibrações por mudanças no grau de liberdade e sequenciamento do desmonte de carvão no RS**. III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. **Anais...**Gramado: 2011.

ROSENHAIM, V. L. et al. **Influencia da malha de perfuração, combinação de tempos de retardos e uso de reforçadores no controle de vibrações**. IV Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. **Anais...**Gramado: 2013.

ROSENHAIM, V. L. **Influência dos níveis de vibração e pressão acústica produzidos pelo desmonte de rochas com explosivos em construções de alvenaria**. 1175 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/153222>>. Acesso em: 2 ago. 2017.

SCHNEIDER, L. C. Blasting and Explosives. In: LOWRIE, R. L. (Ed.). **SME Mining Reference Handbook**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2002. p. 203–214.

SCOTT, A. **Open Pit Blast Design: Analysis and Optimisation**. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996.

SILVA, V. C. **Curso MIN 112 - Operações Mineiras**. 2011. 145 p. Apostila.

SISKIND, D. **Vibrations From Blasting**. Cleveland: ISEE, 2000.

STAGG, M. S.; ENGLER, A. J. **RI 8506: Measurement of Blast-Induced Ground Vibrations and Seismograph Calibration**. Pittsburgh, 1980. 62 p.

USBM - UNITED STATES BUREAU OF MINES. **RI 8507**: Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting. 1980. 59p.

WHEELER, R. **The Importance of Proper Seismometer Coupling**. 30th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. **Anais...**New Orleans: 2004.

WISS, J. F.; LINEHAN, P. **Vibration and air blast noise from surface coal mine blasting**. SME-AIME Fall Meeting, 1980.