

VITOR RAMIREZ COLOMBO

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DA VIBRAÇÃO DO TERRENO EM UMA
MINA DE CALCÁRIO**

São Paulo

2017

VITOR RAMIREZ COLOMBO

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DA VIBRAÇÃO DO TERRENO EM UMA
MINA DE CALCÁRIO**

Trabalho de formatura em Engenharia de Minas
do curso de graduação do Departamento de en-
genharia de Minas e Petróleo da Escola Politéc-
nica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Siguemasa Iramina

São Paulo
2017

TF-2017
C7/7e

lymo 28807/16

H20/17o

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010044

Catalogação-na-publicação

Colombo, Vitor Ramirez

ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DA VIBRAÇÃO DO TERRENO EM UMA
MINA DE CALCÁRIO / V. R. Colombo -- São Paulo, 2017.

58 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.VIBRAÇÕES DO TERRENO 2.ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÃO 3.ESTUDO DE
CASO I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e à minha namorada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória de estudos. Aos meus pais, Sergio e Débora, toda minha admiração por sua garra em concluir um curso superior mesmo com todas as responsabilidades de sustentar um lar. Vocês foram o maior exemplo e incentivo que eu poderia ter.

Ao meu avô e minhas avós, Pedro, Maria Helena e Amélia, por todas as lições de vida e exemplos de perseverança que foram fundamentais para o meu desenvolvimento pessoal. Agradeço à minha namorada Bruna por toda compreensão e por todas as injeções de ânimo nesta reta final de curso.

Agradeço ao meu orientador, o professor Wilson Siguemasa Iramina, pela paciência e direcionamento ao longo da elaboração deste trabalho. Agradeço também ao professor Eduardo César Sansone, por ter auxiliado em diversas partes do trabalho, e ao professor Michiel Schage, por toda a orientação necessária ao desenvolvimento da parte experimental do trabalho.

Agradeço aos alunos Felipe Bonucci, Flávia Vilhena, Emmanuel Barreira e Giovanna Cabral, e à equipe do LACASEMIN, que tornaram possível a realização da parte experimental do trabalho, tendo auxiliado de forma determinante para que este estudo pudesse ser feito.

Agradeço também a bibliotecária Maria Cristina Bonesio e toda a equipe responsável pela biblioteca do PMI pelas orientações e auxílio com a busca por fontes bibliográficas e formatação do trabalho.

Agradeço de forma especial aos meus amigos Diego Andriolo e Cecília Infante pela parceria ao longo do curso e por todo o apoio dado desde o primeiro ano de Poli.

Agradeço à equipe da empresa de mineração que abriu as portas para a realização deste estudo e deu todo o suporte necessário ao desenvolvimento dos trabalhos de campo.

RESUMO

O presente estudo tem por finalidade compreender como as ondas de vibração se propagam através do terreno de uma mina de calcário sendo o principal parâmetro a ser analisado a velocidade de vibração de partícula, que pode ser medida diretamente por meio de sismógrafos de engenharia ou estimada através de diferentes métodos. Neste estudo foram aplicados dois métodos diferentes: o primeiro deles é a equação empírica de atenuação, o mais comumente aplicado método de estudo da vibração; o outro método é mais recente, desenvolvido ao longo da última década, e envolve o uso de um parâmetro geomecânico, o RQD (Rock QualityDesignation), que influencia diretamente na propagação da vibração. A exatidão dos métodos foi comparada usando como referência valores medidos diretamente através de sismógrafos de engenharia, e os resultados obtidos foram coerentes, dada a complexidade da geologia observada no local estudado, e observou-se que o método mais eficiente para caracterizar a vibração para a direção adotada foi o que utiliza uma equação empírica de atenuação

Palavras-chave: previsão de vibração, equação de atenuação de vibração, velocidade de vibração de partícula, vibração do terreno, desmonte de rochas por explosivos.

ABSTRACT

This study has the objective to understand how vibration waves propagate through the ground of a quarry and the main parameter to be analyzed is the peak particle velocity that can be measured directly or evaluated through different methods. In this study, two methods were applied: the first of them is the most commonly applied vibration study method, the empirical attenuation equation; the other is more recent, developed over the last decade, and involves the use of a geomechanical parameter, the RQD (Rock Quality Designation), which impacts directly on the vibration propagation. The precision of the methods was compared using as a reference values measured directly using engineering seismographs, and it was observed that the most efficient method to describe the vibration of the chosen direction was the empirical vibration attenuation equation.

Key-words: vibration prediction, vibration attenuation equation, particle vibration velocity, ground vibration, blasting of rocks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ondas de compressão (p) e transversais (s) se propagando através de um meio	4
Figura 2 - Efeitos de distância, Geologia e presença de estruturas na propagação de vibrações.....	8
Figura 3 - Mapa com pontos de medição de vibração.....	12
Figura 4 - Mapa de iso-velocidades	13
Figura 5 - Exemplo de seção geológica usada em um método numérico	16
Figura 6 - Parte da cava onde foram feitas as medições	19
Figura 7 - Pontos de instalação dos sismógrafos.....	20
Figura 8 - Exemplo de instalação e alinhamento de um sismógrafo de engenharia .	21
Figura 9 - Perfil topográfico ao longo da Direção NO.....	22
Figura 10 - Exemplo de medição da distância entre duas fraturas de uma mesma família.....	23
Figura 11 - Exemplo de direção de medição de vibração cortada por diferentes litologias	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do erro e do coeficiente de determinação entre o método proposto por Kumar, Choundhury, e Barghava, e outros métodos	14
Tabela 2 - Informações dos pontos medidos na Direção NO	25
Tabela 3 - Informações do desmonte correspondente ao teste feito para a Direção NO	26
Tabela 4 - Resultados medidos em campo para a Direção NO	27
Tabela 5 - Comparação entre vibração medida e calculada por equações empíricas de atenuação.....	28
Tabela 6 - Dados de entrada para aplicar as equações de atenuação em função do RQD	29
Tabela 7 - Comparação entre vibração medida e calculada por equações de atenuação em função do RQD	30
Tabela 8 - Erro médio cometido em cada método.....	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre velocidade de vibração de partícula e tempo de espera entre detonações.....	7
Gráfico 2 - Curva empírica de atenuação de vibração da Direção NO.....	27
Gráfico 3 - Dispersão dos valores medidos e calculados por equações de atenuação em função do RQD.....	30
Gráfico 4 - Valores de vibração medidos e estimados pelos métodos	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES.....	3
3.1.1 Características das vibrações	3
3.1.2 Parâmetros que interferem nas características da vibração	5
3.2 MÉTODOS DE ESTUDO DA VIBRAÇÃO	9
3.2.1 Medição direta de vibração	9
3.2.2 Equações empíricas de atenuação	11
3.2.3 Mapa de iso-velocidades	12
3.2.4 Equações de atenuação em função do RQD	13
3.2.4 Elementos finitos	15
4 METODOLOGIA DE TRABALHO	17
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	18
4.2 MEDAÇÃO DE VIBRAÇÃO	18
4.3 MEDAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE FRATURAS DA ROCHA.....	22
5 RESULTADOS.....	25
5.1 APRESENTAÇÃO DE DADOS	25
5.2 TRATAMENTO DE DADOS	26
5.2.1 Equações empíricas de atenuação	26
5.2.2 Equações de atenuação em função do RQD	28
6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS	31
7 CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ANEXO A	39

1 INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores produtores minerais do mundo, tendo produzido 40 bilhões de dólares em recursos minerais e 673 milhões de toneladas de agregados para a construção civil, substância mineral mais produzida no mundo, no ano de 2014 (Instituto Brasileiro de Mineração, 2015).

É importante destacar que, devido ao baixo valor associado, os agregados para construção civil usualmente alimentam mercados distantes dos locais de produção de no máximo 100km (no caso da brita) ou 300km (no caso da areia), sendo que os custos de transporte e logística podem representar até 70% do preço final do produto ao consumidor (Instituto Brasileiro de Mineração, 2015). Estes dados justificam o fato de grande parte das minerações de agregados para a construção civil estarem situadas em áreas urbanas e suas imediações.

No ano de 2014, 85,1% da população total do Brasil vivia em áreas urbanas. Já nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, este índice sobe para mais de 96% dos seus habitantes (G1, 2015). Somente o Estado de São Paulo produz 22% do total nacional de areia e 26,7% de brita e cascalho (Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016).

Com a mineração cada vez mais inserida no contexto urbano, discute-se intensivamente a questão da licença social. É preciso manter boas relações com as comunidades locais e cuidar para que a imagem da mineração não se associe a degradação ambiental e exploração predatória. A comunidade local precisa se sentir integrada ao ambiente produtivo da mineração, e é fundamental que os impactos ambientais sejam tratados de forma transparente e séria.

Dentre os impactos ambientais mais críticos causados por minerações situadas em áreas urbanas estão a vibração e o ruído associados ao desmonte de rochas por explosivos. Desta forma, é interessante que seja feito um estudo das vibrações, que pode ser desenvolvido através de uma série de métodos, cada um com suas vantagens e limitações. Estes métodos permitem estimar com certa precisão a vibração resultante de desmontes, de modo que seja possível prever os níveis de vibração para uma determinada distância e carga de explosivos utilizada.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo comparativo, em uma dada direção, de dois métodos de previsão da atenuação da vibração do terreno induzida por detonação de explosivos.

Os resultados da aplicação destes métodos foram modelos distintos que podem ser utilizados para prever a vibração causada por um desmonte de rochas por explosivos com uma dada carga máxima por espera, a uma dada distância e para a direção estudada. A última etapa do trabalho foi comparar as estimativas feitas através dos modelos com valores reais medidos no campo, permitindo que fossem quantificados os erros e fosse avaliado o melhor método a ser aplicado para esta situação.

Ao final do estudo, a empresa recebeu os resultados que indicam o modelo mais adequado de previsão de vibração para a direção estudada, através do qual será possível estimar a vibração causada por um desmonte com precisão calculada, através de resultados de testes feitos em campo. Assim, será possível limitar a vibração, de modo a respeitar a legislação e evitar que se cause incômodo à comunidade local.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos a serem estudados neste trabalho vêm sendo largamente utilizados nos mais diversos tipos de mineração, porém poucas vezes tem os seus resultados comparados para uma mesma direção com os mesmos dados de entrada. A revisão bibliográfica deste trabalho se baseará na literatura disponível, norteando os trabalhos a serem feitos para que seja possível aplicar os métodos de forma adequada.

3.1 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Nesta sessão, serão discutidos aspectos teóricos de geração e propagação de vibração induzida por desmontes de rocha por explosivos. Primeiramente, serão discutidas as características das ondas sísmicas geradas por desmontes e, em seguida, serão abordados os parâmetros que afetam as vibrações.

3.1.1 Características das vibrações

Segundo as definições de tipos de ondas de vibração feitas por Jimeno C.L; Jimeno, E.L, e Carcedo (1995), as vibrações geradas nos desmontes são transmitidas através do terreno na forma de ondas sísmicas, sendo que a frente da onda é deslocada radialmente do ponto de detonação. As diferentes ondas sísmicas são classificadas em dois grupos: ondas de volume e ondas de superfície.

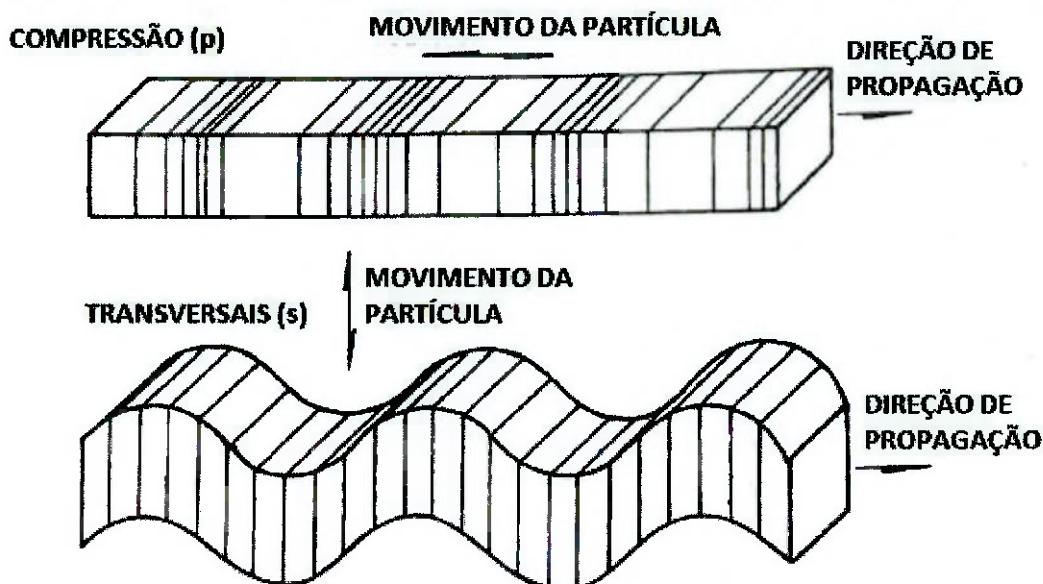
As ondas de superfície geradas em desmontes de rochas são geralmente de dois tipos: ondas Rayleigh-R e ondas Love-Q.

O primeiro tipo de ondas de volume é chamado de compressional. Essas ondas se propagam através dos materiais do terreno, produzindo alternadamente compressões e dilatações com o movimento de partícula na direção da propagação da onda. Estas são as ondas mais rápidas e elas modificam o volume, mas não a forma, dos materiais através dos quais se propagam.

O segundo tipo de ondas de volume é constituído de ondas transversais que movem as partículas em uma direção perpendicular à direção de deslocamento da onda. Essas ondas têm velocidade intermediária entre as de superfície e as compressionais e mudam a forma, mas não o volume do meio, através do qual se propagam.

A Figura 1 mostra esquematicamente a propagação de ondas primárias e secundárias através de um determinado meio.

Figura 1 – Ondas de compressão (p) e transversais (s) se propagando através de um meio.



Fonte: Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995), adaptada pelo autor.

O principal parâmetro que caracteriza a vibração corresponde à velocidade de vibração de partícula que pode ser medida diretamente através de uma série de instrumentos ou pode ser estimada através de métodos de estudo da propagação da vibração.

De acordo com C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995), a passagem de ondas sísmicas por um meio coloca todas as suas partículas em movimento, de modo que a velocidade de vibração de partícula é definida como a velocidade com a qual estas partículas se movem. As velocidades de propagação das ondas de compressão e transversais podem ser estimadas através da eq.(1) que diz respeito à velocidade de propagação de ondas de compressão, e da eq.(2) diz respeito à velocidade de propagação das ondas transversais. Ambas as equações assumem que o meio é homogêneo, isotrópico, elástico e contínuo.

$$VCp = \sqrt{\frac{E \times (1-\nu)}{\rho \times (1-2\nu) \times (1+\nu)}} \quad (1)$$

$$VCs = \sqrt{\frac{E}{2 \times \rho \times (1+\nu)}} \quad (2)$$

Onde E é o módulo de Young, ν é o Coeficiente de Poisson, ρ é a densidade da rocha, VCp é a velocidade de propagação das ondas de compressão e VCs é a velocidade de propagação das ondas transversais.

Como em situações práticas o meio não apresenta características de um meio ideal, existem diferentes métodos que permitem estimar a velocidade de partícula levando em consideração certos fatores que tornam o meio não-uniforme.

A energia de propagação das ondas, gerada pela detonação de uma carga explosiva, decresce conforme as ondas atingem um maior volume de rocha, de modo que este decréscimo de energia é proporcional à distância da fonte que produziu a onda ao ponto em que se mede a vibração.

A energia também pode se dissipar caso as ondas encontrem planos de descontinuidades na matriz rochosa, e pode haver mudanças no comportamento das ondas caso haja presença de fluxo de fluido ou presença de poros ou cavidades. Além disso, a topografia e geometria das formações geológicas podem refletir ou concentrar frentes de onda em determinados pontos.

3.1.2 Parâmetros que interferem nas características da vibração

De acordo com Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995), a vibração resultante do desmonte de rochas por explosivos podem ter suas características afetadas por diversos parâmetros, como características geológicas locais e propriedades geométricas da rocha. Em meios homogêneos, as vibrações tendem a se propagar de forma igual em todas as direções, porém, se analisadas em meios onde a geologia é complexa, com diferentes litologias e presença de fraturas, seu comportamento pode variar grandemente dependendo das distâncias e das direções a serem analisadas.

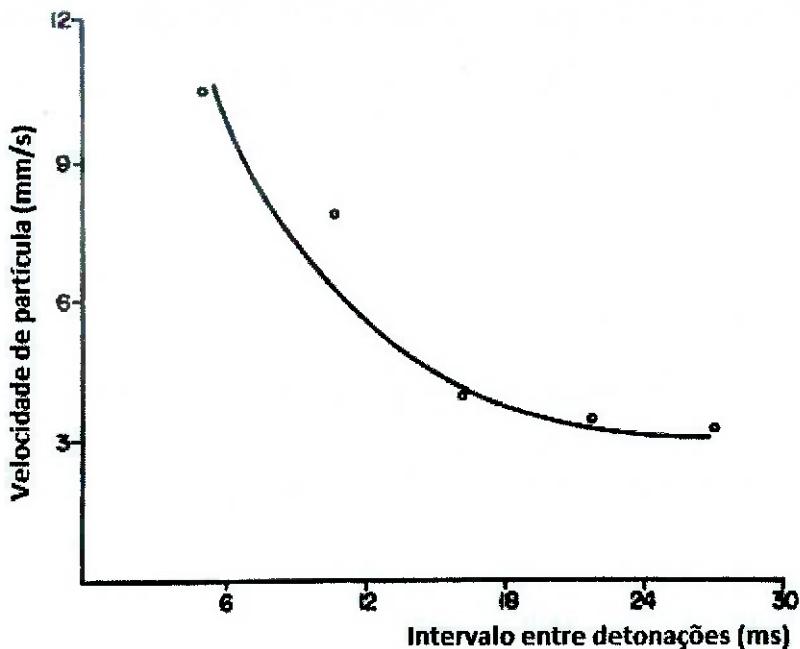
Se forem analisadas as vibrações em pontos mais próximos dos furos detonados, há uma maior influência das características do desmonte do que da geologia e características mecânicas da rocha. Quanto mais distantes do furo, maior a influência dos parâmetros geomecânicos e geológicos e menor o impacto das características do desmonte.

A presença de solo sobre o substrato rochoso também afeta a intensidade e frequência de vibração. Geralmente o solo apresenta um módulo de elasticidade menor do que o da rocha, o que faz com que a onda se propague com menor velocidade e menor frequência neste meio.

Outro fator importante a ser considerado é a carga máxima por espera, ou seja, a quantidade máxima de explosivos que é detonada de uma só vez. Este fator é mais importante do que a quantidade total de explosivos utilizados porque, geralmente, há uma diferença de tempo entre as detonações suficiente para que não haja interferência construtiva entre as ondas. Diferentes autores recomendam diferentes tempos mínimos entre detonações sucessivas: Duvall (1963) recomenda 9 milissegundos para pedreiras, enquanto Langefors (1963) sugere que os intervalos devem ser maiores do que três vezes o período de vibração, e Wiss e Linehan (1978) sugerem um atraso de 17 milissegundos (Duvall ,1963; Langefors,1963; Wiss e Linehan,1978; apud JIMENO, C.L; JIMENO, E.L; CARCEDO, 1995).

O Gráfico 1 mostra a relação entre tempo de intervalos de detonação e velocidade de partícula.

Gráfico 1 – Relação entre velocidade de vibração de partícula e tempo de espera entre detonações.



Fonte: Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995), adaptado pelo autor.

A distância do ponto de detonação tem, assim como ocorre com a carga de explosivos, grande influência na magnitude das vibrações. A distância tem uma relação inversa com a magnitude da vibração, ou seja, quanto maior a distância, menor a vibração. Outro efeito da distância é a redução da frequência de vibração.

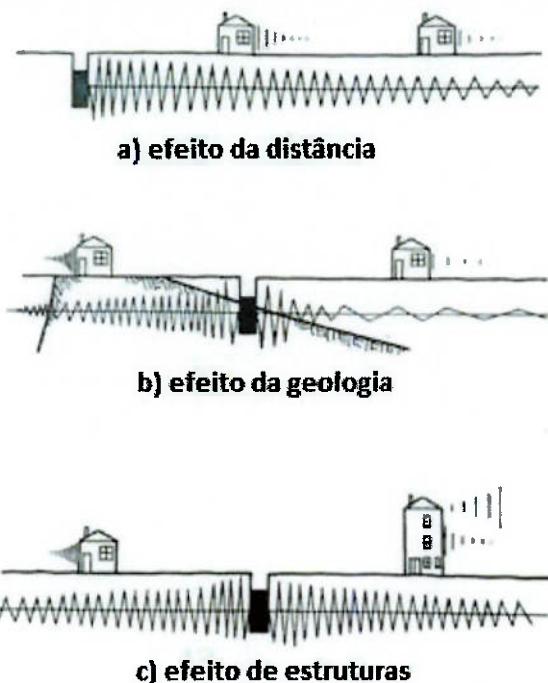
A razão de carga, isto é, a quantidade de explosivos carregada por metro cúbico de rocha, pode também ser manipulada com a finalidade de obter níveis menores de vibração. Porém, a má distribuição geométrica de explosivos dentro do furo pode causar um efeito inverso, aumentando a vibração.

A vibração é proporcional também às pressões geradas pelos explosivos, característica que varia de acordo com o tipo de explosivo utilizado. O ANFO, por exemplo, é um explosivo de baixa densidade e velocidade, e gera vibrações menores que os outros tipos de explosivos.

A vibração causada por um desmonte de rochas por explosivos é também um reflexo de sua eficiência energética. Parte da energia da detonação se dissipa na forma de ondas gerando a vibração, de modo que a medição da velocidade de partícula pode ser uma ferramenta de melhora da qualidade do desmonte.

A Figura 2 ilustra efeitos que podem modificar o comportamento das ondas de vibração através de um meio.

Figura 2 – Efeitos de distância, geologia, e presença de estruturas, na propagação de vibrações.



Fonte: Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995), adaptada pelo autor.

A Figura 2 mostra três casos em que a vibração é afetada: no primeiro caso, verifica-se o efeito da distância; no segundo, verifica-se a influência de uma falha geológica presente no maciço rochoso e, no terceiro, verifica-se a influência de construções ou estruturas na direção da propagação das ondas de vibração.

Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995) ainda descrevem a influência de parâmetros de geometria do desmonte sobre as vibrações, sendo eles:

- a) Diâmetro do furo: podem aumentar ou diminuir a razão de carga do furo, afetando a vibração.
- b) Altura da bancada: altera o confinamento das cargas explosivas.
- c) Espaçamento e afastamento: se a distância entre furos é muito grande, os gases de detonação encontram uma maior resistência para fragmentar a rocha, de modo que uma maior parte da energia é transformada em energia sísmica, o que aumenta a vibração.

- d) Subfuração: uma subfuração excessiva tende a ocasionar a conversão de uma maior porcentagem de energia explosiva em vibrações do terreno.
- e) Inclinação do furo: furos inclinados tendem a promover um maior aproveitamento energético e podem reduzir a vibração.
- f) Tamponamento: se o tamponamento for excessivo, o confinamento aumenta, e os níveis de vibração são maiores.

3.2 MÉTODOS DE ESTUDO DA VIBRAÇÃO

De acordo com Langefors e Kihlstrom (1978), as vibrações, por vezes, se tornam fatores críticos de um projeto, definindo os outros parâmetros de desmonte a serem adotados. Isto ocorre principalmente em áreas urbanizadas ou com estruturas próximas, de modo a garantir a segurança necessária para que não haja danos.

É necessário, então, que se faça um estudo da vibração, que pode ser conduzido através de diversas técnicas que serão discutidas individualmente a seguir.

3.2.1 Medição direta de vibração

A medição direta da velocidade de vibração de partícula é fundamental para o estudo da vibração, uma vez que possibilita verificar os efeitos reais que as variações nos parâmetros do desmonte causam na propagação das ondas, permite estabelecer direções críticas através das quais a energia de vibração se propaga mais intensamente e delimita valores máximos obtidos em função de um determinado plano de fogo. Além disso, diversos métodos de previsão de vibração usam dados colhidos experimentalmente para compor suas equações, e a comparação da vibração medida com os valores aproximados obtidos através de métodos de previsão permite obter os erros de estimativa.

Medir a vibração é, portanto, o primeiro passo para que se possa propor medidas para reduzir a intensidade da vibração e estabelecer padrões de comportamento das ondas para determinadas distâncias e direções. As medidas de vibração podem ser feitas através de certos aparelhos que contemplam diferentes parâmetros.

Segundo Iramina (2002), um aparelho de medição de vibração deve possuir três funções básicas: detecção através de sensores, transmissão de sinais e armazenamento de informações para análise posterior. Alguns equipamentos destacados por Iramina (2002) serão brevemente descritos a seguir:

- a) Acelerômetro - possibilita a escolha do parâmetro de medida entre aceleração, velocidade ou deslocamento.
- b) Sismógrafo Geofísico – é aplicado em monitoramentos de terremotos, sinais muito mais complexos do que das ondas oriundas de desmontes por explosivos, que são emitidos em freqüências muito menores do que as registradas em desmontes.
- c) Sismógrafo de Engenharia – os sinais são captados por geofones, sensores que emitem tensão elétrica proporcional à velocidade de vibração da partícula. Não são equipamentos adequados à medição de vibrações em baixa freqüência, e podem registrar os sinais recebidos de forma analógica ou digital, o que possibilita um melhor tratamento dos dados colhidos.

De acordo com Iramina (2002), o sensor do equipamento escolhido para a medição deve ser instalado em uma determinada estrutura ou local de interesse, ou numa reta que liga esta estrutura ao local do desmonte, e o sensor deve ser posicionado com a direção longitudinal apontada para o local da detonação. Deve-se estipular um valor mínimo para a velocidade de vibração de partícula a partir do qual o aparelho começará a registrar os sinais recebidos de modo que seja possível captar os sinais de interesse de forma autônoma sem que se esteja presente no local onde o equipamento foi instalado. Assim, evita-se também que o equipamento registre vibrações oriundas de outros eventos que não o desmonte, como, por exemplo, a vibração gerada por um caminhão que passou próximo ao local onde o sismógrafo foi instalado.

3.2.2 Equações empíricas de atenuação

Ao longo dos anos, diversos autores publicaram gráficos e fórmulas de previsão de vibração. Outros publicaram dados sem especificar curvas ou fórmulas de previsão. A maioria das curvas de previsão ou gráficos são construídos com a velocidade de vibração de partícula em função da distância escalonada (ISEE, 1998).

A equação de atenuação a ser utilizada neste trabalho será a eq.(3), descrita por Jimeno, C.L; Jimeno, E.L e Carcedo (1995).

$$\nu = K \times \left[\frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{-n} \quad (3)$$

Onde ν é a velocidade da partícula, Q é a carga máxima por espera de explosivos (maior massa de explosivos detonada de forma simultânea) e D é a distância projetada (distância calculada sem considerar componentes de altitude) entre o ponto de detonação e o ponto para o qual se deseja saber a velocidade da partícula. Os parâmetros K e n são constantes empíricas determinadas por regressão linear através de medições de vibrações feitas para cargas de explosivos e distâncias conhecidas.

A razão entre distância projetada e raiz quadrada da carga máxima por espera é chamada de distância escalonada.

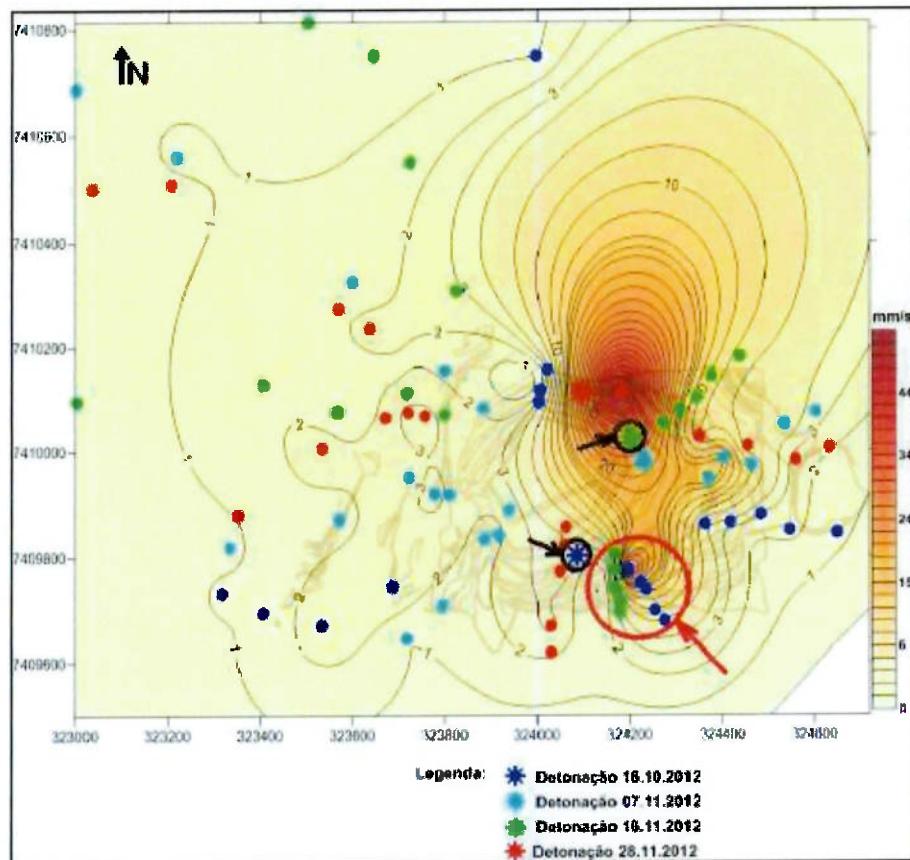
A vantagem desta equação em relação às outras equações de atenuação é justamente o fato de usar regressão linear para modelar a resposta aproximada para a velocidade de partícula, o que permite uma particularização da solução para cada caso a ser estudado. Na parte experimental deste trabalho, será obtida uma equação de atenuação deste tipo para a direção adotada, a partir de valores medidos em campo através de sismógrafos de engenharia, procedimento que será discutido posteriormente.

3.2.3 Mapa de iso-velocidades

Os mapas de iso-velocidades representam ferramentas eficazes na previsão da vibração, conforme demonstrado por Canedo (2014) e Iramina (2002). Este método se divide em duas partes principais: medição de vibração em campo utilizando sismógrafos de engenharia e aplicação de métodos de interpolação de dados.

No trabalho desenvolvido por Canedo (2014), foram feitas medições em quatro desmontes. Para cada desmonte, foram instalados sensores em quatro direções distintas, de modo que se criou uma rede de pontos, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Mapa com pontos de medição de vibração.

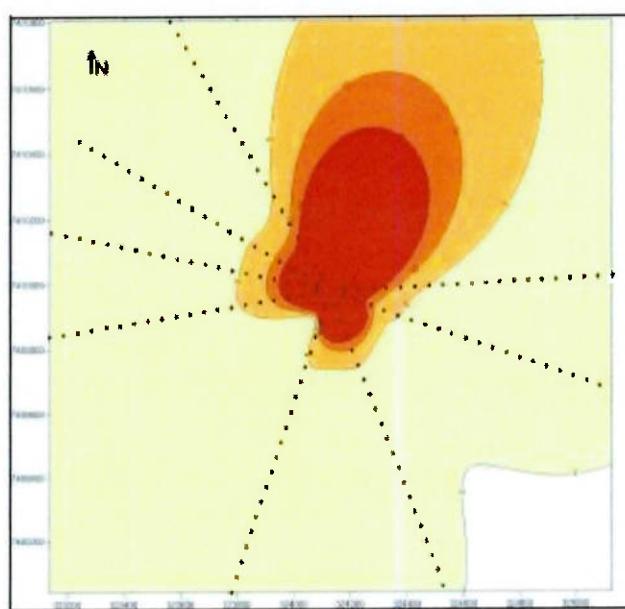


Fonte: Canedo (2014).

Com os valores medidos para cada ponto, e conhecendo-se suas respectivas direções, o próximo passo para elaborar um mapa de iso-velocidades é escolher um método de interpolação. Neste caso foi aplicado o método de interpolação por Krigagem, que corresponde a uma técnica de estimativa cuja característica principal é a precisão local das estimativas, respeitando o procedimento utilizado por Iramina (2002), que oferece uma melhor interpretação visual dos dados.

Como resultado da interpolação, são traçadas iso-linhas e é obtido um mapa de iso-velocidades que destaca regiões para as quais o comportamento da propagação da vibração é similar. Este comportamento similar é determinado quantitativamente através de um coeficiente de correlação, sendo estabelecido um valor mínimo para inferir se há alguma relação de comportamento da vibração entre duas ou mais direções. A Figura 4 ilustra o resultado final expresso através de um mapa de iso-velocidades.

Figura 4 – Mapa de iso-velocidades.



Fonte: Canedo (2014).

3.2.4 Equações de atenuação em função do RQD

De acordo com Lucian e Wangwe (1963), o RDQ, ou *Rock Quality Designation*, foi inicialmente proposto em 1963 como um índice que permitia descrever a qualidade da uma rocha de modo quantitativo. As aplicações deste parâmetro foram rapidamente estendidas para diversas áreas de mecânica de rochas e se tornou um parâmetro fundamental em engenharia geotécnica, muito devido a sua definição muito simples: o RQD é a porcentagem de porções intactas de rocha maiores do que 10 centímetros em relação à extensão total do furo de sonda.

Em um estudo conduzido por Kumar; Choundhury e Bhargava (2016) foram propostas equações que embutiam valores de RQD na rocha em equações de atenuação de vibração. Os resultados obtidos mostram uma melhoria significativa na precisão dos resultados em relação aos métodos comuns de atenuação, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação do erro e do coeficiente de determinação entre o método proposto por Kumar, Choundhury e Bhargava e outros métodos.

No.	Pesquisadores	Previsão dos dados experimentais	
		Coeficiente de determinação r_{xy}^2	Quadrado do erro s_{yx}^2
1	Duvali and Petkof (1959)	0.707	0.00025
2	Nicholls et al. (1971)	0.689	0.00026
3	Siskind et al. (1980)	0.709	0.00025
4	CMRI (1993)	0.704	0.00025
5	Kahriman (2002)	0.709	0.00025
6	Kahriman (2004)	0.674	0.00028
7	Kahriman et al. (2006)	0.704	0.00025
8	Nicholson (2005)	0.699	0.00026
9	Ozer (2008)	0.706	0.00025
10	Ozer (2008)	0.663	0.00029
11	Ozer (2008)	0.684	0.00027
12	Ak et al. (2009)	0.692	0.00026
13	Badal (2010)	0.709	0.00025
14	Mesec et al. (2010)	0.706	0.00025
15	Modelo atual	0.783	0.00018

Fonte: Kumar; Choundhury e Bhargava (2016), traduzida pelo autor.

As equações aplicadas por Kumar; Choundhury e Bhargava (2016) utilizam o RQD da rocha como forma de embutir suas características geomecânicas na previsão da vibração. A eq.(4) é válida para RQD menor que 75 e a eq.(5) é válida para RQD maior que 75.

$$v = \frac{(0,59476RQD + 0,00893RQD^2)^{0,642} DS^{-1,463}}{\gamma} \quad (4)$$

$$v = \frac{(-7,91562RQD + 0,12152RQD^2)^{0,642} DS^{-1,463}}{\gamma} \quad (5)$$

Onde v é a velocidade de vibração de partícula, RQD é o valor numérico estimado para o RQD do ponto para o qual se deseja calcular a velocidade de partícula, DS é a distância escalonada, ou seja, a distância do ponto ao local do desmonte dividida pela raiz quadrada da carga máxima por espera, e γ é o peso específico em kN/m³.

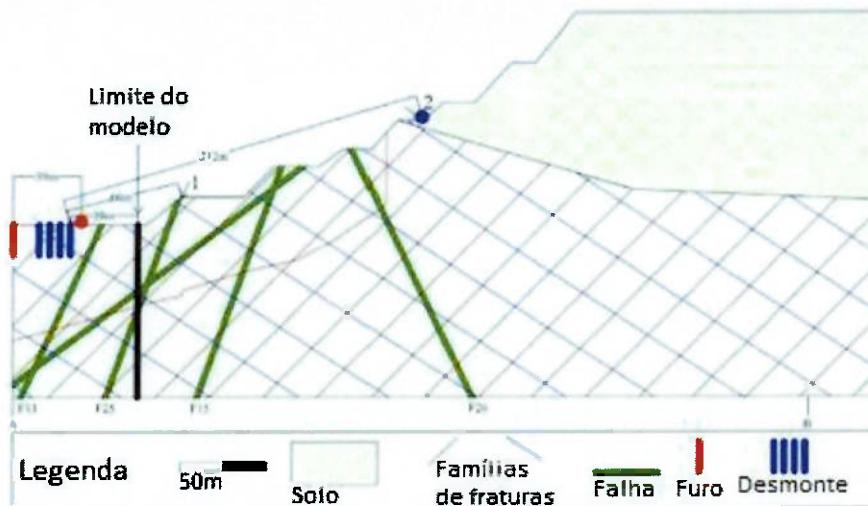
3.2.4 Elementos finitos

Métodos numéricos podem calcular ondas sísmicas induzidas por detonações a qualquer distância e direção do ponto de detonação através do emprego das propriedades mecânicas do meio. Estes métodos utilizam o histórico de velocidades medidas da detonação como parâmetro de entrada e simulam a propagação das ondas através de um maciço rochoso. Em regiões muito próximas ao desmonte onde a vibração é muito alta, não é possível medir vibração através de instrumentos convencionais. Assim, a modelagem da vibração oriunda de detonações é difícil de ser realizada nas vizinhanças do desmonte (AZIZABADI; MANSOURI, FOUCHÉ, 2014).

No estudo realizado por Azizabadi; Mansouri e Fouché (2014), vários métodos numéricos diferentes como FEM (Finite Element Method), BEM (Boundary Element Method) e FDM (Finite Difference Method) foram usados para caracterizar juntas e fraturas pequenas. Para elementos considerados como singularidades, como grandes conjuntos de fraturas e descontinuidades, foi aplicado o DEM (Distinct Element Method). A aplicação destes métodos produz resultados mais precisos do que os outros métodos de previsão de vibração, uma vez que consideram uma série de particularidades da rocha que são usualmente desprezadas nos outros métodos, mas que possuem grande influência na propagação de ondas, como a posição do contato entre diferentes litologias e a posição de fraturas e descontinuidades da rocha.

Para a aplicação dos modelos numéricos é definida uma seção geológica e uma malha, que afetará diretamente o processamento da informação. O tamanho dos elementos da malha é definido em função das proporções das unidades geológicas e das fraturas. A seção geológica utilizada por Azizabadi, Mansouri e Fouché é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de seção geológica utilizada em um método numérico.



Fonte: Azizabadi; Mansouri e Fouché(2014), adaptada pelo autor.

Por abranger informações espaciais a respeito do maciço rochoso, como litologia, fraturamento e presença de falhas geológicas, que não são contempladas nos outros métodos, os métodos numéricos vêm sendo aplicados de forma individual, como feito por Sainoki e Mitri (2014), e de forma combinada com outros métodos, agregando a maior quantidade de informações possível para produzir resultados mais refinados, como demonstrado por Babanouri et al. (2013).

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Para que o estudo proposto pudesse ser realizado, foi solicitada a colaboração de uma empresa de mineração do interior do Estado de São Paulo, que já contribuiu com outros trabalhos de formatura e de iniciação científica desenvolvidos por alunos do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Universidade de São Paulo. Ao longo do primeiro semestre do ano de 2017, foram iniciadas as tratativas com a empresa para que a realização da parte experimental do estudo pudesse ter início no mês de agosto.

Foi desenvolvida a revisão bibliográfica do trabalho com base em livros consagrados a respeito do tema abordado e também artigos científicos, de modo a incluir abordagens mais recentes à base teórica do trabalho.

Durante os meses de setembro e outubro de 2017, foram desenvolvidos trabalhos de campo. Foi feito um reconhecimento da região da cava, permitindo que fosse definida a direção na qual foram instalados os sismógrafos, em função da topografia, da largura da berma das bancadas onde seriam instalados os sismógrafos de engenharia, da circulação de máquinas, e das demandas da empresa, que desejava compreender como a vibração se comportava em função do contato entre calcário e gnaisse. Foram feitas medidas diretas de vibração, levantando-se a velocidade de vibração de partícula em dez pontos da cava. Por último, foi feita uma estimativa do RQD dos locais onde foram instalados os sismógrafos de engenharia.

Foram gerados relatórios com as velocidades de vibração de partícula registradas por cada sismógrafo após os trabalhos de campo e os dados obtidos puderam ser interpretados.

Por fim, foi feito o tratamento dos dados, onde foram inseridos os parâmetros de entrada dos métodos, e foi obtida uma resposta para cada um deles. Com a resposta de cada método, foram calculados valores de vibração para uma determinada carga de explosivos e determinada distância, e os valores obtidos através das aproximações foram comparados com valores medidos diretamente por sismógrafos. Desta forma foi possível calcular os erros de estimativa e avaliar a exatidão de cada método frente ao problema.

Os resultados foram discutidos e apresentados à empresa, que poderá adotar o método mais adequado para controlar suas operações de desmonte e monitorar os seus impactos ambientais.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para realizar as medições necessárias de vibração, foram instalados dez sismógrafos da marca GeoSonics modelo SSU 3000EZ+, disponibilizados pelo LACASEMIN. Estes equipamentos foram calibrados antes dos testes para garantir que os resultados obtidos fossem mais confiáveis.

Para estimar o RQD, foi utilizada uma trena para medir a distância entre fraturas do maciço.

Um GPS foi utilizado para marcar a posição em que cada sismógrafo foi instalado.

4.2 MEDAÇÃO DE VIBRAÇÃO

Primeiramente, foi escolhida uma direção para a qual a vibração foi medida. Foi necessário alinhar os pontos nesta direção escolhida, pois se sabe que o meio não é isotrópico, isto é, a vibração se propaga de formas diferentes para direções diferentes. A Figura 6 mostra uma região da cava que ilustra a baixa uniformidade da geologia do local onde foram feitas as medições.

Figura 6 – Parte da cava onde foram feitas as medições.

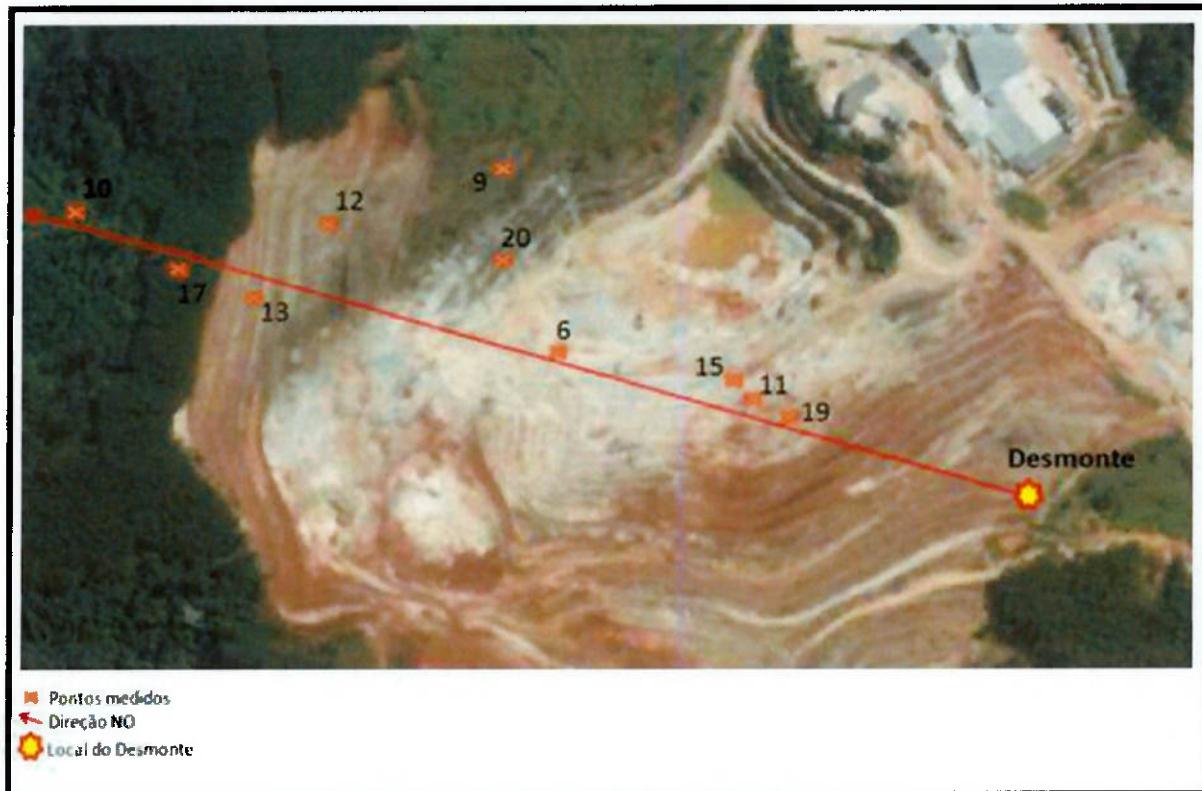


Fonte: arquivo pessoal do autor.

A direção definida será tratada a partir de agora como Direção NO (Noroeste). A escolha desta direção foi feita em função do local do desmonte e com base na topografia da cava, de modo que fosse possível distribuir espacialmente os sismógrafos o mais uniformemente possível. A Figura 7 mostra a localização dos pontos onde foram instalados os sismógrafos, em relação à topografia da cava e ao local do desmonte, elaborada à partir de uma imagem de satélite obtida pelo Google Earth e pela marcação das coordenadas dos pontos feita por meio do software Micromine.

É necessário destacar que a Figura 7 não representa a configuração atual da mina: como parte do maciço rochoso exposto é constituído de rocha calcária branca, a incidência de luz solar distorce as imagens de satélite tiradas da cava, e por isso foi necessário utilizar uma imagem de satélite mais antiga, obtida provavelmente em um dia de pouca iluminação solar. Assim, destaca-se que o ponto 20 se situava sobre o fundo da cava, e os pontos 10 e 17 sobre bancadas, e não em meio a vegetação.

Figura 7 – Pontos de instalação dos sismógrafos.



Fonte: Google Earth, adaptada pelo autor.

Para garantir que a série de pontos medidos coincidisse com a direção escolhida, foram escolhidos pontos de referência na mina, como a direção de uma fratura ou a posição de um equipamento, para alinhar e posicionar os sismógrafos. A Figura 8 mostra como foi feito o alinhamento de um dos sismógrafos de engenharia instalados: o equipamento circulado e a rocha apontada pela seta definiram uma reta sobre a qual o equipamento foi instalado. Neste caso, era possível observar esta rocha e o equipamento a partir de outros pontos da mina, de modo que outros sismógrafos puderam ser instalados com base no mesmo referencial de alinhamento.

Figura 8 – Exemplo de instalação e alinhamento de um sismógrafo de engenharia.

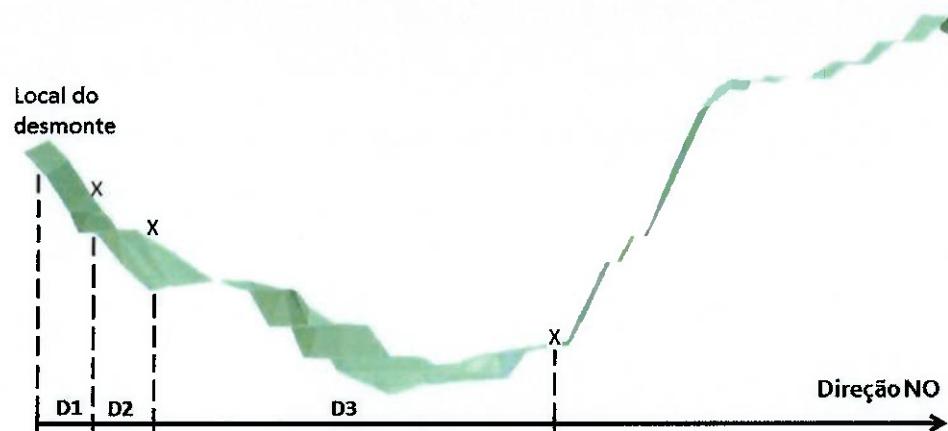


Fonte: arquivo pessoal do autor.

Os sismógrafos foram colocados sobre os pontos escolhidos usando gesso para fixar os sensores quando instalados sobre a rocha, de forma que o mesmo permanecesse firme sobre o ponto e sem se deslocar em relação a rocha. Quando instalado sobre o solo, foram usados pinos encaixados na base do geofone, que entram no solo e promovem a fixação deste componente do sismógrafo. Também foi escolhido um valor de sensibilidade mínima para o geofone, isto é, o sensor só captaria vibrações acima de um valor mínimo estipulado. Este valor foi de 1,0mm/s para sismógrafos instalados próximos ao local com outras fontes de vibração, como equipamentos de britagem, caminhões ou carregadeiras, e de 0,5mm/s para sismógrafos instalados em regiões sem outras fontes de vibração.

A Figura 9 mostra o perfil topográfico encontrado ao longo da Direção NO a partir de um modelo topográfico da cava gerado através do software Micromine. Na Figura 9, é possível observar o local onde foi feito o desmonte e os pontos de instalação de três sismógrafos indicados por "x" (não correspondem às posições reais dos pontos onde foram instalados os sismógrafos). As distâncias indicadas por D1, D2, e D3 correspondem à distância projetada (distância horizontal, sem considerar as componentes de altitude) entre os sismógrafos de engenharia e o local do desmonte. A distância projetada é um dos parâmetros de entrada dos métodos aplicados.

Figura 9 – Perfil topográfico ao longo da Direção NO.



Fonte: elaborada pelo autor.

Tendo instalado os equipamentos, o desmonte foi acompanhado e filmado de um local seguro. Após o desmonte, os equipamentos retornaram ao laboratório para que os dados colhidos fossem interpretados. O Anexo A contém os relatórios dos sismógrafos com as medidas de vibração feitas em campo para a Direção NO.

4.3 MEDAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE FRATURAS DA ROCHA

Para completar os trabalhos de campo, foi estimado o RQD da rocha. Este procedimento foi feito de forma simplificada, conforme descrito por Miraya (2015). Como se deseja conhecer apenas o valor numérico pontual do RQD, foi definida uma área onde seriam medidas as distâncias relativas entre as fraturas. Foi medido então o espaçamento entre fraturas, valor utilizado para calcular um parâmetro J_v , ou *Volume metric Join Count*. O valor do J_v possui relação direta com o RQD, através de eq.(6) e eq.(7) a seguir, conforme descrito por Palmstrom (1974).

$$RQD = 115 - 3,3J_v(6)$$

$$RQD = 110 - 2,5J_v(7)$$

A eq.(6) caracteriza blocos longos e achatados, ao passo que a eq.(7) caracteriza blocos cúbicos. Por sua vez, o J_v pode ser calculado através da eq.(8), onde S_i é a distância média, em metros, entre as fraturas de uma das famílias de fraturas presentes na rocha.

$$Jv = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots + \frac{1}{s_i} \quad (8)$$

A eq.(6) e a eq.(7), embora válidas para uma aproximação do RQD, podem proporcionar erros já que não levam em conta fatores geológicos locais. Miraya (2015) propôs uma adaptação às fórmulas de Palmstrom, em estudo realizado em uma caixa vizinha ao local onde este estudo de vibração foi realizado. O método aplicado por Miraya (2015) consistiu em comparar valores estimados a partir das equações de Palmstrom com valores de RQD obtidos diretamente através de furos de sonda, o que permitiu a obtenção de duas novas equações, agora levando em conta fatores geológicos locais, expressas pela eq.(9) e eq.(10).

$$RQD = 114 - 4,5Jv \quad (9)$$

$$RQD = 100 - 4,98Jv \quad (10)$$

A eq.(9) é aplicada quando o valor de Jv é superior a 5 e a eq.(10) é aplicada quando o valor de Jv é inferior a 5.

Aplicando a eq.(8) para os valores medidos, e depois as eq.(9) ou eq.(10), dependendo do valor de Jv calculado, foi obtido o valor do RQD para que o tratamento dos dados pudesse ser feito. A Figura 10 mostra a medição da distância entre fraturas de uma determinada família de fraturas para uma porção do maciço rochoso sobre a qual um sismógrafo foi instalado.

Figura 10 – Exemplo de medição da distância entre duas fraturas de uma mesma família.



Fonte: arquivo pessoal do autor.

Em posse dos valores das distâncias entre as fraturas, foi possível calcular a média destas distâncias e aplicar as equações pertinentes, conforme descrito anteriormente, obtendo-se um valor de RQD associado à rocha sobre a qual cada um dos sismógrafos foi posicionado.

É necessário observar que os pontos instalados sobre solo não puderam ter seu RQD estimado por este método, uma vez que não foi possível identificar fraturas. Neste caso, foi utilizado um valor médio entre o RQD do solo, que seria zero, e o gnaisse, rocha sobre a qual o solo se situa. Isto foi feito porque a rocha abaixo da camada de solo também influí na propagação da vibração.

5 RESULTADOS

Os resultados das medições de campo para velocidade de partícula foram obtidos através do software GeoSonics Inc. Analysis, que permitiu conhecer a resultante da velocidade de vibração de partícula obtida para o ponto sobre o qual o geofone foi posicionado em campo, e gerou um relatório com a velocidade de vibração de partícula para cada componente espacial da onda (dados apresentados no Anexo A).

5.1 APRESENTAÇÃO DE DADOS

Os resultados obtidos para a Direção NO serão mostrados na Tabela 2, que contém os dados colhidos em campo para o primeiro desmonte realizado, onde foi medida a vibração através de dez sismógrafos instalados ao longo da direção escolhida. Os valores de J_v foram calculados utilizando a eq.(8).

Tabela 2 – Informações dos pontos medidos na Direção NO.

Número	Sismógrafo Código	Coordenadas UTM			Distância (m)	Resultante	Vibração (mm/s)			J_v	Rocha
		L	N	Z			L	T	V		
19	8956	460626	7439719	768	140,4	7,56	5,14	4,45	6,10	6,7	Gnaisse
11	8947	460608	7439725	760	159,2	7,94	5,91	2,6	5,59	11,4	Calcário
15	8952	460601	7439733	755	169,0	9,14	8,32	7,24	3,87	7,5	Calcário
6	8893	460507	7439749	714	261,7	2,16	1,65	1,14	1,02	4,2	Calcário
20	8957	460477	7439798	693	309,0	0,95	0,57	0,89	0,7	5,5	Calcário
9	8896	460476	7439848	753	335,6	0	0	0	0	9,9	Gnaisse
12	8949	460384	7439818	813	401,7	0,70	0,7	0,38	0,32	-	Solo
13	8950	460343	7439783	826	428,0	0,64	0,32	0,51	0,38	-	Solo
17	8954	460304	7439797	834	469,4	1,02	0,76	0,76	0,76	-	Solo
10	8897	460270	7439814	855	506,9	0,95	0,64	0,64	0,64	-	Solo

Fonte: elaborada pelo autor.

Nota-se que para os quatro últimos pontos não consta um valor de J_v . Isso se deve ao fato de não ter sido possível identificar as fraturas no talude por se tratar de solo e não de rocha.

Para as medições feitas para a Direção NO, foi feito um desmonte com posição e carga máxima por espera descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Informações do desmonte correspondente ao teste feito para a Direção NO.

Desmonte			
L	N	Z	Q (kg)
460752	7439657	795	22,4

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2 TRATAMENTO DE DADOS

O tratamento dos dados foi feito a partir dos dados apresentados na seção anterior, de modo que cada método a ser aplicado será tratado em tópicos separados a seguir.

5.2.1 Equações empíricas de atenuação

Para a Direção NO foi construído um gráfico no Excel da velocidade de partícula em função da distância ao local do desmonte, levando em consideração a carga máxima por espera do desmonte. Este gráfico de dispersão foi aproximado por uma equação, da forma da eq.(3), que caracteriza um comportamento aproximado da vibração para a Direção NO.

Com a velocidade de partícula medida por sismógrafos de engenharia e estimada através da equação obtida para cada ponto, foi feita a comparação entre estes valores. Assim, foi possível calcular o erro envolvido na aplicação deste método como forma de prever a vibração.

Elaborou-se a Tabela 4 a seguir, com finalidade de levantar uma curva correspondente à equação de atenuação. Observa-se que o sismógrafo número 19 não foi incluído na análise, uma vez que este não registrou a vibração induzida pelo desmonte.

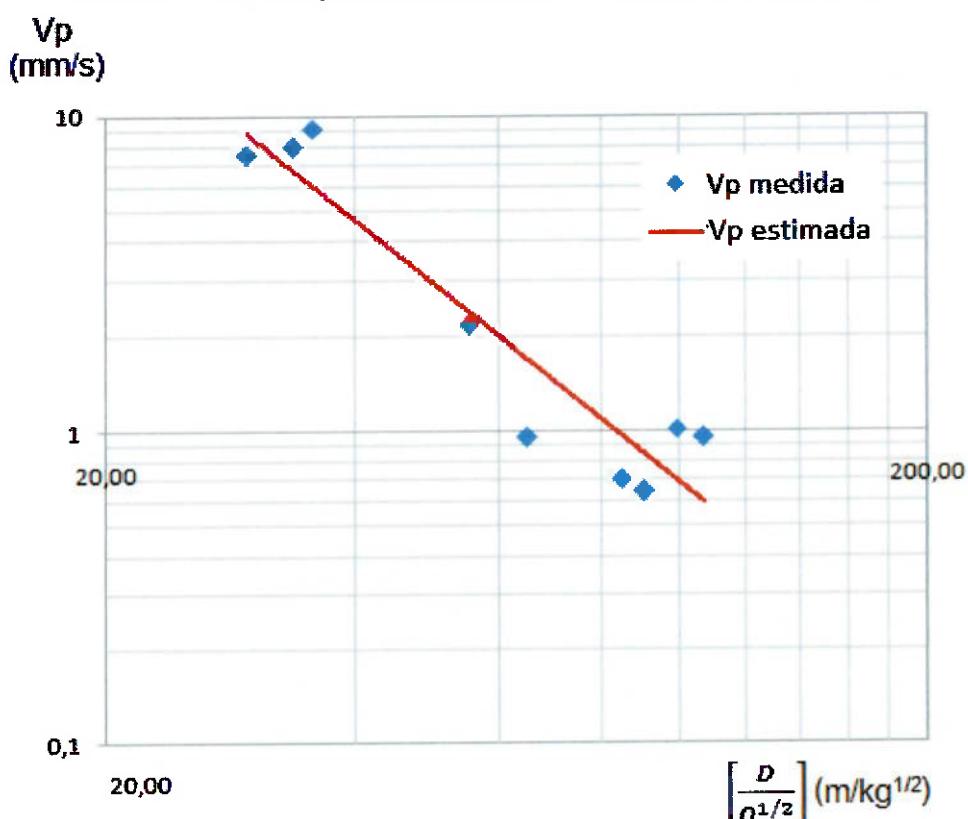
Tabela 4 – Resultados medidos em campo para a Direção NO.

Número	Sismógrafo Código	$\left[\frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{-n}$	Vp (mm/s)
19	8956	29,65	7,56
11	8947	33,62	7,94
15	8952	35,69	9,14
6	8893	55,25	2,16
20	8957	65,24	0,95
9	8896	-	-
12	8949	84,80	0,70
13	8950	90,35	0,64
17	8954	99,09	1,02
10	8897	107,02	0,95

Fonte: elaborada pelo autor.

A partir da Tabela 4, construiu-se o Gráfico 2 e foi adicionada uma linha de tendência para que pudesse ser obtida a equação de atenuação correspondente à velocidade de partícula para a Direção NO. O coeficiente de determinação verificado foi de 0,888.

Gráfico 2 - Curva empírica de atenuação de vibração da Direção NO.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da linha de tendência obtida no Gráfico 2, foi possível obter a equação de atenuação para a Direção NO, expressa pela eq.(11) abaixo.

$$v = 11175 \times \left[\frac{D}{Q^{1/2}} \right]^{-2,1} \quad (11)$$

Utilizando a equação para calcular a velocidade de vibração de partícula em cada ponto medido, foi possível comparar os valores medidos com os valores calculados e calcular os erros de aproximação cometidos ao utilizar a eq.(11) como forma de prever a vibração, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre vibração medida e calculada por equações empíricas de atenuação.

Número	Sismógrafo Número	Código	Vp medido (mm/s)	Vp calculado (mm/s)	Erro (mm/s)
19	8956	8956	7,56	9,06	1,50
11	8947	8947	7,94	6,96	0,98
15	8952	8952	9,14	6,14	3,00
6	8893	8893	2,16	2,45	0,29
20	8957	8957	0,95	1,73	0,78
9	8896	8896	-	-	-
12	8949	8949	0,70	1,00	0,30
13	8950	8950	0,64	0,87	0,23
17	8954	8954	1,02	0,72	0,30
10	8897	8897	0,95	0,61	0,34

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.2 Equações de atenuação em função do RQD

Nesta análise foi aplicada a eq.(4) ou a eq.(5), dependendo do RQD de cada ponto. Estas equações permitiram o cálculo da velocidade de vibração de partícula, de modo que cada um dos pontos medidos foi comparado ao seu respectivo valor estimado (à exceção do ponto medido através do sismógrafo 9).

A partir do valor de Jv calculado por medições de campo, calculou-se o RQD para cada ponto através das equações eq.(9) e eq.(10). A Tabela 6 mostra os dados de entrada utilizados na análise.

Tabela 6 – Dados de entrada para aplicar as equações de atenuação em função do RQD.

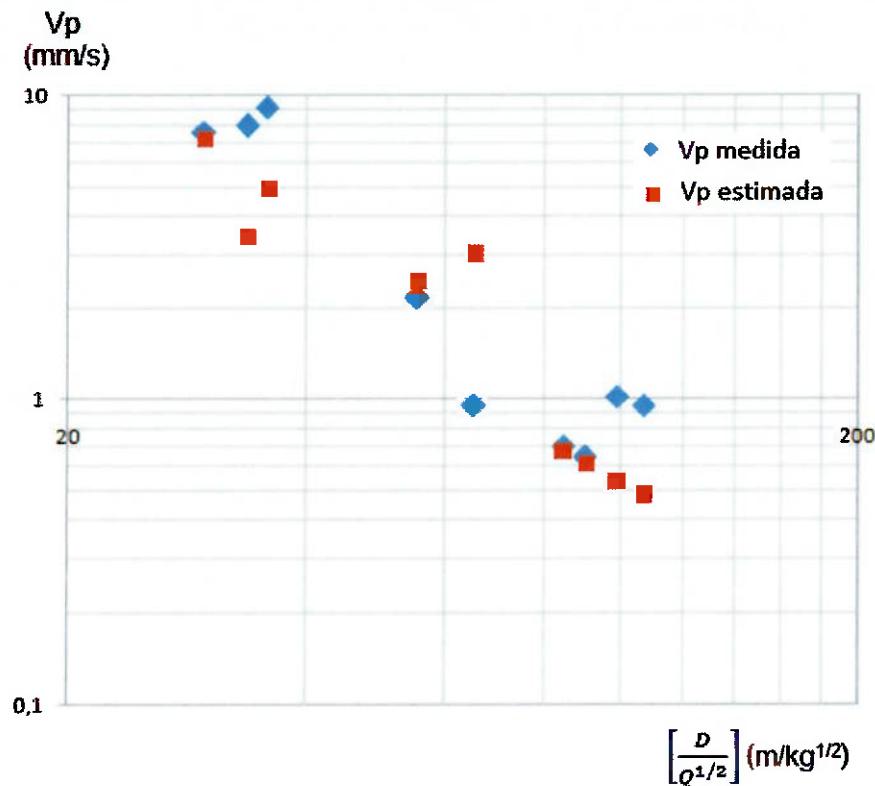
Sismógrafo		Coordenadas UTM			Distância (m)	RQD	Rocha	γ (kN/m ³)
Número	Código	L	N	Z				
19	8956	460626	7439719	768	140,4	83,6	Gnaisse	27,5
11	8947	460608	7439725	760	159,2	62,8	Calcário	26
15	8952	460601	7439733	755	169,0	80,1	Calcário	26
6	8893	460507	7439749	714	261,7	79	Calcário	26
20	8957	460477	7439798	693	309,0	89,4	Calcário	26
9	8896	460476	7439848	753	335,6	69,6	Gnaisse	20
12	8949	460384	7439818	813	401,7	34,8	Solo	20
13	8950	460343	7439783	826	428,0	34,8	Solo	20
17	8954	460304	7439797	834	469,4	34,8	Solo	20
10	8897	460270	7439814	855	506,9	34,8	Solo	20

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 6 também contém o tipo da rocha sobre a qual o sismógrafo foi instalado e um valor de peso específico, conforme recomendado por Kumar; Choundhury e Bhargava (2016) em função do tipo de rocha. Para o solo, foi adotado um peso específico de 20kN/m³ e um RQD médio entre zero (que seria o RQD do solo) e 69,6 (valor do RQD da rocha sobre a qual o solo está disposto).

A partir dos dados de entrada apresentados na Tabela 6, e das características do desmonte contidas na Tabela 3, foi possível aplicar o método proposto por Kumar; Choundhury e Bhargava (2016), através da eq.(4) e da eq.(5). Os resultados desta análise são indicados no Gráfico 3, que mostra os pontos medidos e os pontos estimados de velocidade de vibração de partícula.

Gráfico 3 – Dispersão dos valores medidos e calculados por equações de atenuação em função do RQD.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 7, são comparadas as velocidades de partícula obtidas para cada ponto através de medição direta e os valores de velocidade de partícula estimados para cada ponto.

Tabela 7 – Comparaçāo entre vibração medida e calculada por equações de atenuação em função do RQD.

Sismógrafo	Vp medido (mm/s)	Vp calculado (mm/s)	Erro (mm/s)
Número	Código		
19	8956	7,56	7,23
11	8947	7,94	3,46
15	8952	9,14	4,95
6	8893	2,16	2,46
20	8957	0,95	2,99
9	8896	-	-
12	8949	0,70	0,68
13	8950	0,64	0,62
17	8954	1,02	0,54
10	8897	0,95	0,48

Fonte: elaborada pelo autor.

6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A partir dos valores calculados através de cada método para a velocidade de partícula e dos valores medidos em campo, foi elaborada a Tabela 8, comparando o erro médio cometido em cada método no caso estudado.

Tabela 8 – Erro médio cometido em cada método.

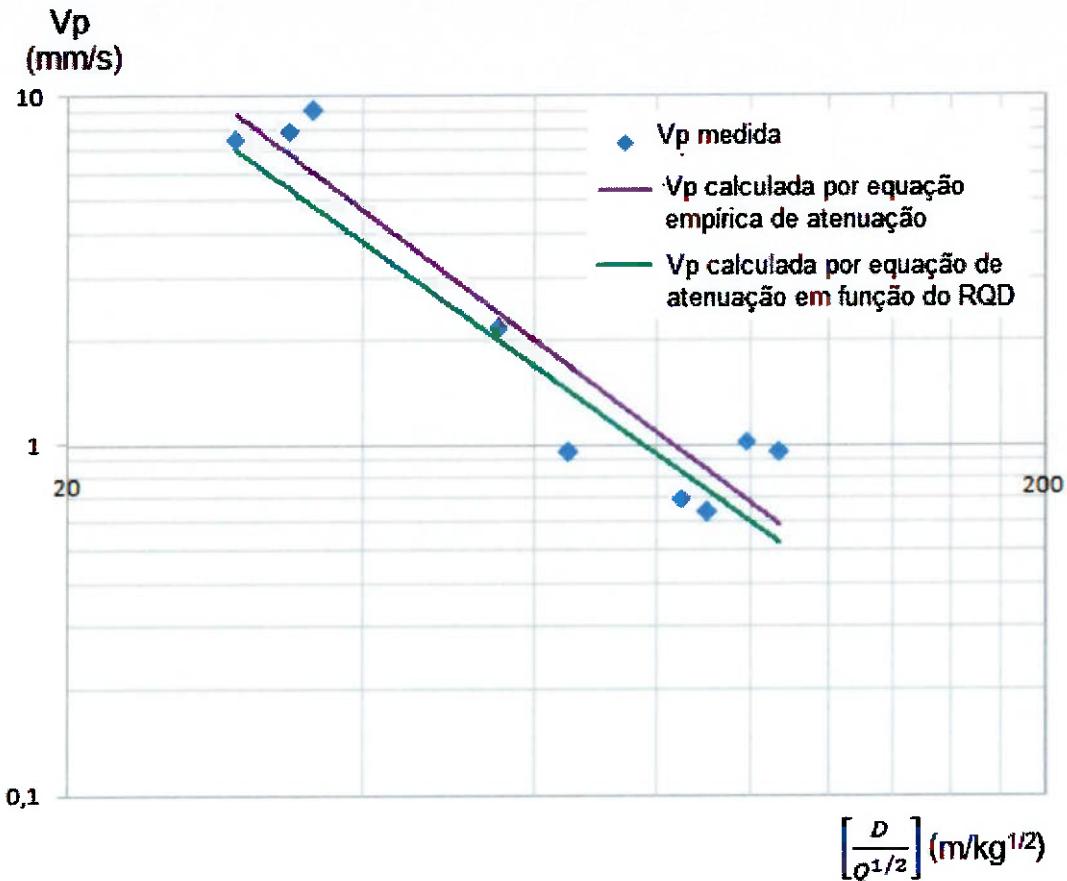
Método	Eq. Atenuação	Parâmetros geomecânicos
Erro médio (mm/s)	0,86	1,37

Fonte: elaborada pelo autor.

Além da tabela, foi construído um gráfico da velocidade de vibração de partícula em função da distância escalonada, mostrando os valores medidos em campo e as curvas que representam os valores da velocidade de partícula estimados por cada método.

Como mostrado no Gráfico 3, os valores estimados pela equação de atenuação utilizando RQD configuraram uma dispersão, e não uma curva. No Gráfico 4, estes valores de dispersão foram interpolados por uma curva de potências, gerando uma curva representativa deste método, de modo a situar as estimativas feitas por cada método em relação aos valores medidos para a velocidade de vibração de partícula.

Gráfico 4 – Valores de vibração medidos e estimados pelos métodos.



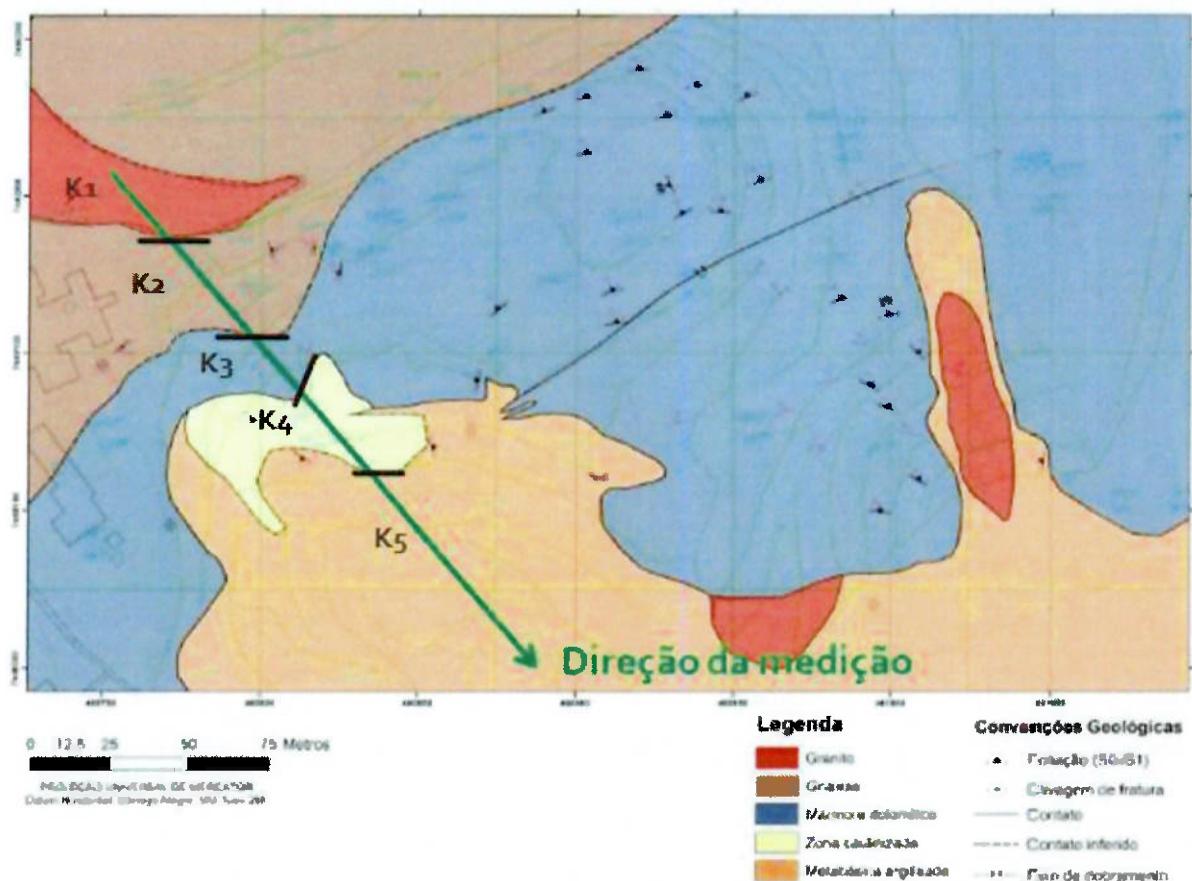
Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 8 permite concluir que a equação empírica de atenuação foi, de maneira geral, mais precisa do que a equação de atenuação em função do RQD. Por mais que o RQD e o peso específico sejam considerados diretamente na eq.(4) e na eq.(5), este último método não usa valores de velocidade de vibração de partícula medidos em campo como parâmetro de ajuste em suas equações, o que impacta em sua precisão. Uma vez que o RQD da rocha não é a única característica geométrica que varia ao longo do maciço, mas também há presença de falhas e de contatos entre diferentes litologias, espera-se que uma maior precisão do método esteja associada à uma menor complexidade da geologia do meio.

Por outro lado, apesar da equação de atenuação não ter explicitamente os parâmetros geomecânicos quantificados, como mostra a eq.(3), estas características da rocha estão embutidas na equação por meio da constante k . Os erros cometidos por este método se devem ao fato de as propriedades do maciço rochoso não se mantenrem constantes ao longo de toda distância medida. Pode-se supor que se cada trecho de geologia diferente do maciço rochoso tivesse uma equação de atenuação diferente associado a si, a precisão do método poderia ser maior.

A Figura 11 mostra uma direção hipotética de medição que corta diferentes tipos de rochas que possuem diferentes propriedades geomecânicas, representadas por k_i . Também percebe-se que a direção de medição é cortada por contatos entre diferentes litologias, de modo que as ondas de vibração que se propagam ao longo da direção estudada encontram mudanças de meio.

Figura 11 – Exemplo de direção de medição da vibração cortada por diferentes litologias.



Fonte: Miraya (2015), adaptada pelo autor.

Outra possível fonte de erro, no que diz respeito equações de atenuação em função do RQD, é a forma de obtenção do RQD de cada ponto. Neste estudo, os valores de RQD foram estimados e não medidos diretamente.

Observa-se também que para pontos mais distantes, os dois métodos aplicados retornam valores próximos de velocidade de vibração de partícula.

Quanto ao sismógrafo de número 9, que não registrou valor de velocidade de partícula, pode-se supor que a porção de rocha sobre a qual o equipamento foi instalado corresponde a um bloco solto, o que justificaria ter vibrado com velocidade de partícula inferior ao valor de sensibilidade de 0,51mm/s atribuído ao geofone.

7 CONCLUSÃO

Para a Direção NO, concluiu-se que o método com maior aproximação aos valores reais corresponde às equações empíricas de atenuação.

Devido à alta complexidade da geologia do meio na direção para a qual foi feita a medição, ambos os métodos apresentaram desvios em relação ao valor medido diretamente em campo, tendo sido possível verificar a dificuldade envolvida em aplicar métodos de previsão de vibração para meios com esta característica.

Recomenda-se que o método envolvendo o RQD seja aplicado considerando pontos com RQD medido e não estimado, o que poderia representar ganhos em sua exatidão. Poderia também ser feita uma divisão em trechos com geologias distintas e para cada trecho ser obtida uma equação de atenuação própria.

Poderia ser feito, junto ao estudo de vibração, um estudo geológico detalhando a localização de falhas geológicas, contatos entre litologias e as propriedades geométricas associadas a cada litologia presente. Este estudo permitiria uma melhor caracterização do meio e uma maior compreensão da propagação da vibração, o que poderia ser embutido nos métodos como forma de correção, podendo aumentar a exatidão das estimativas da velocidade de vibração de partícula.

Como continuação deste estudo, seria importante caracterizar o comportamento da vibração para outras direções, uma vez que os resultados obtidos valem somente para a Direção NO. Se esta análise fosse feita, poderia se verificar qual o método com maior exatidão para cada direção analisada e poderia ser quantificada a diferença de comportamento da vibração em função de sua direção de propagação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZIZABADI, H.R.M.; MANSOURI, H.; FOUCHÉ, O. Coupling of two methods, wave-form superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in jointed rock masses. **Computers and Geotechnics**, v.61, p.42-49, 2014. Disponível em: <<http://www-sciencedirect-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0266352X14000792>>. Acesso em 8 Jun.2017.

BABANOURI, N. et al. A couple method to study blast wave propagation in fractured rock masses and estimate unknown properties. **Computers and Geotechnics**, v.49, p.134-1492, 2013. Disponível em: <<http://www-sciencedirect-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0266352X12002212>>. Acesso em 8 Jun.2017.

CANEDO, G.R. **Mapa de Iso-velocidades**: uma ferramenta para o controle de vibrações nas pedreiras. 2013. 161 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-08072014-121202/pt-br.php>>. Acesso em 30 Abr.2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2015**. Brasília: Mar.2016. Disponível em:
<<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>> Acesso em 30 Abr.2017.

G1. Maranhão tem a menor taxa de urbanização do Brasil, segundo IBGE. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2015/12/maranhao-tem-menor-taxa-de-urbanizacao-do-brasil-segundo-ibge.html>> Acesso em 30 Abr.2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Informações sobre a economia mineral brasileira 2015. Brasília: Set.2015. Disponível em:
<<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>> Acesso em 30 Abr.2017.

IRAMINA, W.S. O mapa de iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental. 2002. 223 p.Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS. Blasters' handbook. Cleveland, 1998. 743 p.

JIMENO, C.L.; JIMENO, E.L.; CARCEDO, F.J. A. Drilling and blasting of rocks. Translated by Y.V. de Ramiro. Rotterdam: A.A.Balkema, 1995. 391 p.

KHANDELWAL, M.; SINGH, T.N. Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v.46, p.1214-1222, 2009. Disponível em: <<http://www-sciencedirect-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1365160909000574>>. Acesso em 8 Jun.2017.

KUMAR, R.; CHOUDHURY, D.; BHARGAVA, K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v.8, p.341-349, 2016. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167477551600024X>. Acesso em 30 Abr.2017.

LANGEFORS, U.; KIHLSTROM, B. **The modern technique of rock blasting.** 3rd. ed. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1978. 438 p.

LUCIAN, C.; WANGWE, E.M. The Usefulness of Rock Quality Designation (RQD) in Determining Strength of the Rock. **International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES)**, v.2, p.36-40, 2013. Disponível em:
<<http://www.irjes.com/Papers/vol2-issue9/F02093640.pdf>>. Acesso em: 12 Dez.2017.

MIRAYA, B.B. **Geologia da mina de mármore Dolomia, Taubaté-SP, e sua aplicação ao planejamento de lavra**. 2015. 38 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PALMSTROM, A. measurement and characterization of rock mass jointing. In: SHARMA, V.M.; SAXENA, K.R. (Ed.). **In-situ characterization of rocks**. Lise: A. A. Balkema Publishers, 2001. Chapter 2. Disponível em: <http://www.rockmass.net/ap/69_Palmstrom_on_Jointing_measurements.pdf>. Acesso em: 18.Set.2017

PERSSON, P-A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering**. Bocca Raton: Crc Press, 1994. 540 p.

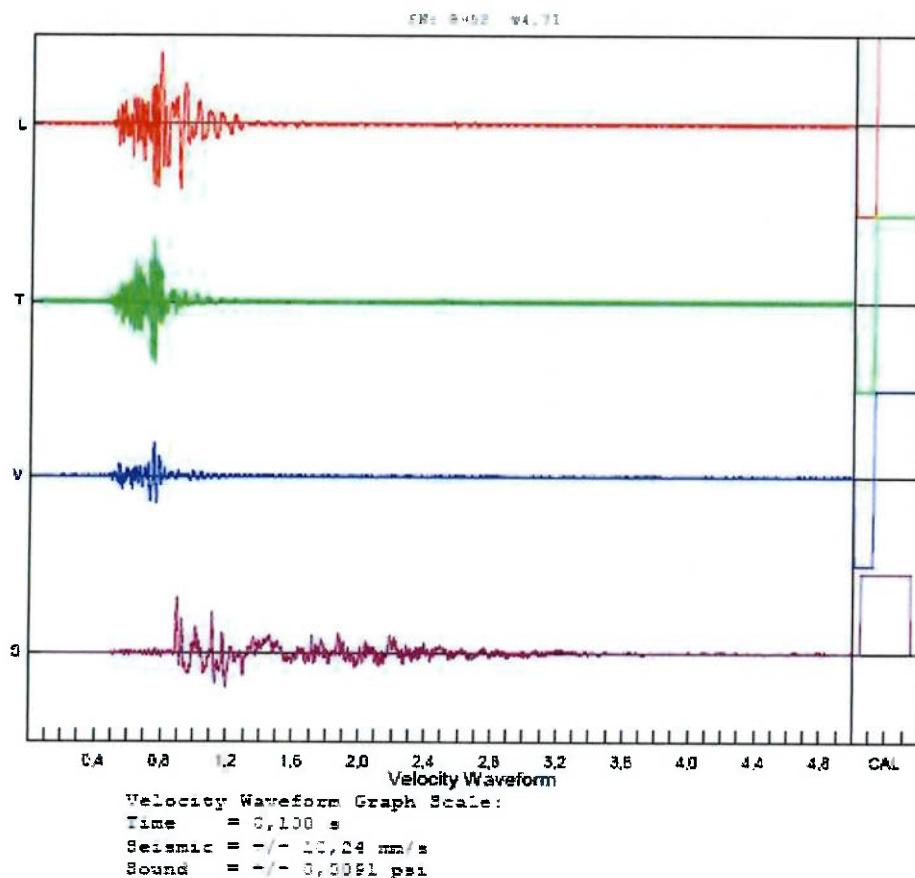
SAINOKI, A.; MITRI, H.S. Numerical simulation of rock mass vibration induced by nearby production blast. **Canadian Geotechnical Journal**, p.1253-1262, 2014. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/full/10.1139/cgj-2013-0480#.WTnPWuvyu1s>>. Acesso em: 8 Jun.2017.

SHURAN, L.; SHUJIN, L. Applying BP neural network model to forecast peak velocity of blasting ground vibration. **Procedia Engineering**, v.26, p.257-263, 2011. Apresentado ao 1st International Symposium on Mine Safety Science and Engineering. Disponível em: <<http://www-sciencedirect-com.ez67.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1877705811050090?via%3Dihub>>. Acesso em 8 Jun.2017.

ANEXO A – RELATÓRIOS DE VIBRAÇÃO GERADOS PELOS SISMÓGRAFOS DE ENGENHARIA

SN: 8952 v4.71
Date: 10/03/2017 **Time:** 11:50:19
Event: 4 **Record Time:** 5.0 s
Client: [REDACTED] **Summary Data**
Operation: DESMONTE **L** 8.32 7.24 3.87
Location: CAVA **PD (.01mm)** 6.13 2.93 2.05
Distance: 0. **FPA (g)** 0.176 0.241 0.104
Operator: LACA **FREQ (Hz)** 26.3 41.7 27.8
Comment:
Trigger Level: 0.51 mm/s **Resultant PPV:** 9.14 mm/s
Peak Air Pressure: 126 db
0.0056 psi

Additional Info: Shaketable Calibrated: 09/18/2017
By: GeoSonic Inc.
359 Northgate Drive
Warrendale, PA 15086 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

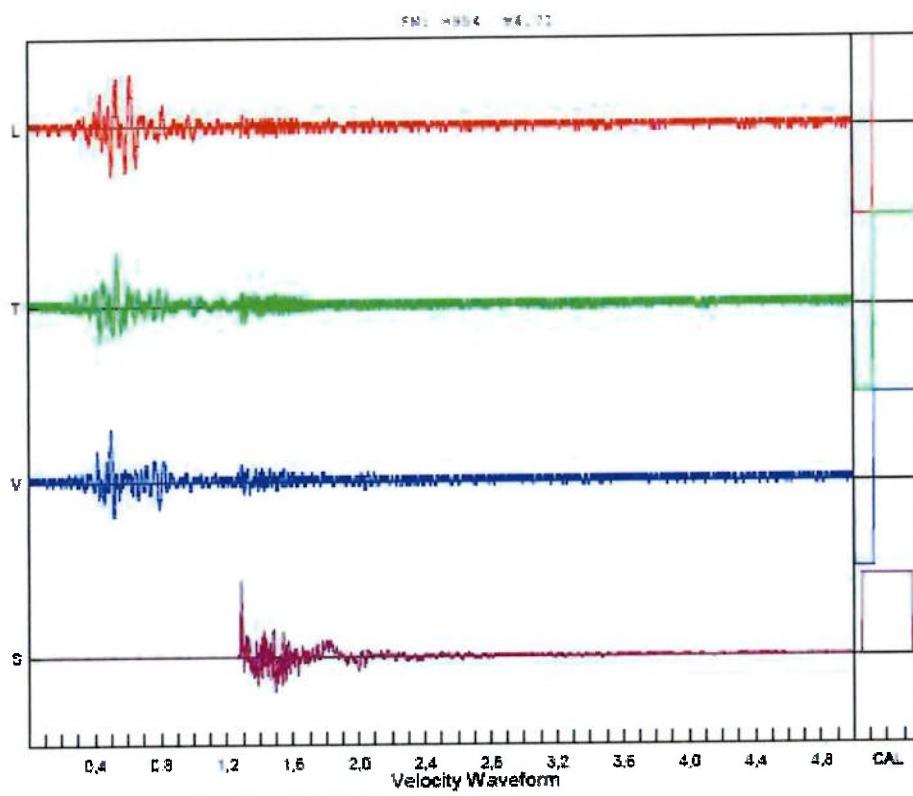


SN: 8954 v4.71
 Date: 10-03-2017 Time: 11:50:18
 Event: 5 Record Time: 5.0 s
 Client: ██████████
 Operation: DESMONTE
 Location: CAVA
 Distance: 0.
 Operator: LACA
 Comment:
 Trigger Level: 0.51 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	0.76	0.76	0.76
PD (.01mm)	0.76	0.55	0.49
PPA (g)	0.020	0.020	0.013
FREQ (Hz)	13.2	16.7	22.7
Resultant PPV:		1.02 mm/s	
Peak Air Pressure:		129 db	
		0.0078 psi	

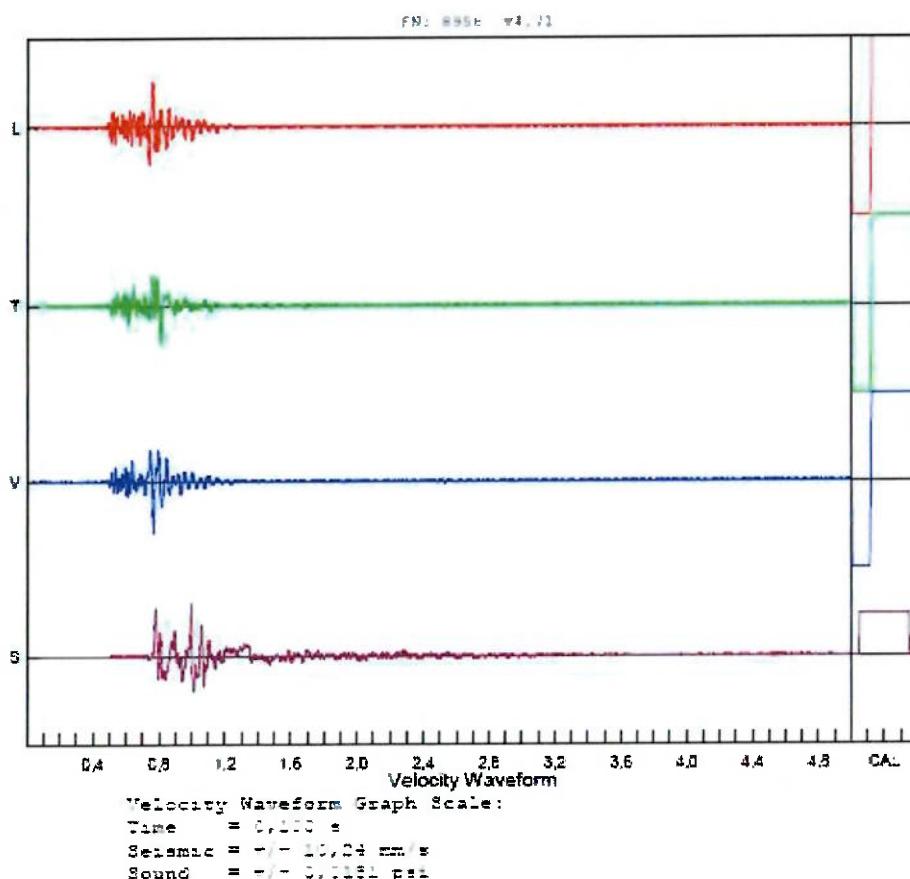
Shaketable Calibrated: 21-08-2017

Additional Info:
 By: GeoSonic Inc
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



SN: 8956 v4.71
 Date: 10/03/2017 Time: 11:50:18
 Event: 8 Record Time: 5.0 s **Summary Data**
 Client: [REDACTED] L T V
 Operation: FOGO PPV (mm/s) 5.14 4.45 6.10
 Location: BANCADA PD (.01mm) 3.51 3.19 3.59
 Distance: 0 PPA (g) 0.085 0.059 0.091
 Operator: LACA FREQ (Hz) 22.7 19.2 35.0
 Comment:
 Trigger Level: 0.51 mm/s Resultant PPV: 7.56 mm/s
 Peak Air Pressure: 131 db
 0.0107 psi

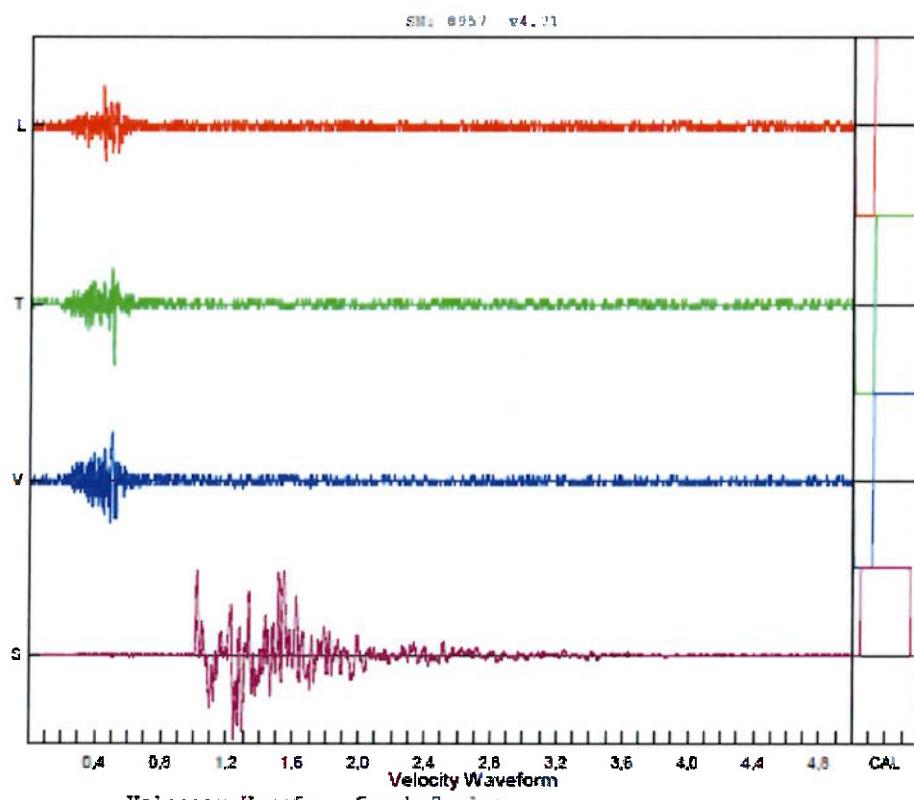
Shaketable Calibrated: 09/22/2017
Additional Info:
 By: GeoSonic Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



SN: 8957 v4.71 Date: 10/03/2017 Time: 11:50:19
 Event: 3 Record Time: 5.0 s **Summary Data**
 Client: [REDACTED] L T V
 Operation:
 Location:
 Distance: 0,
 Operator:
 Comment:
 Trigger Level: 0.51 mm/s

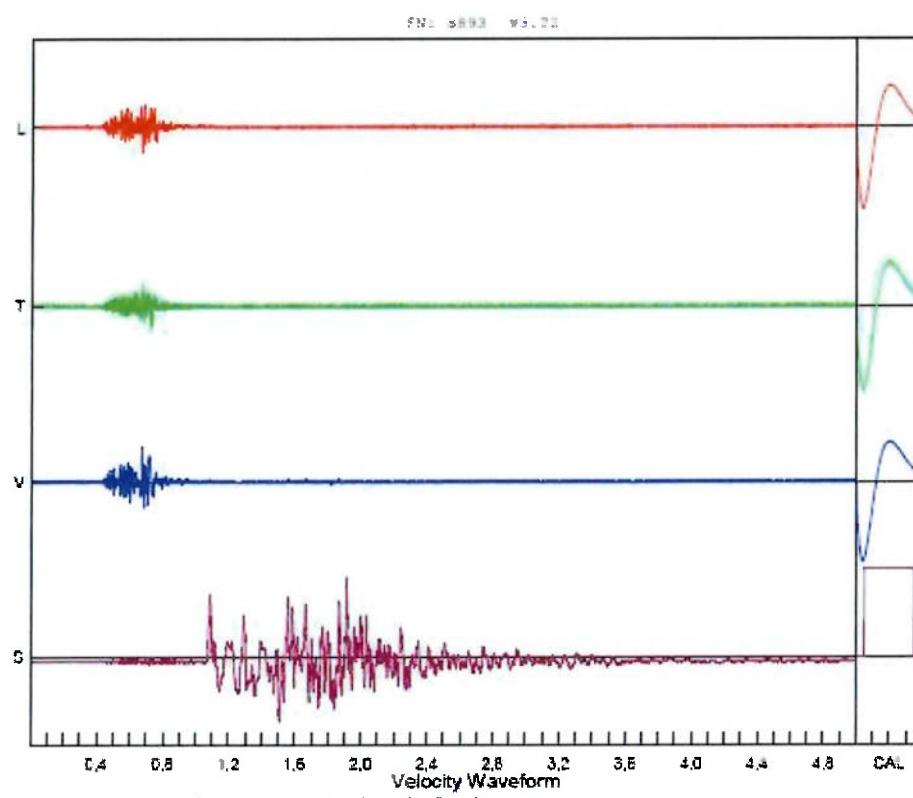
	L	T	V
PPV (mm/s)	0.57	0.89	0.70
PD (.01mm)	0.36	0.25	0.36
PPA (g)	0.033	0.033	0.039
FREQ (Hz)	41.7	50.0	29.4
Resultant PPV:		0.95 mm/s	
Peak Air Pressure:		123 db	
		0.0043 psi	

Additional Info:
 Shaketable Calibrated: 09/21/2017
 By: GeoSonic Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



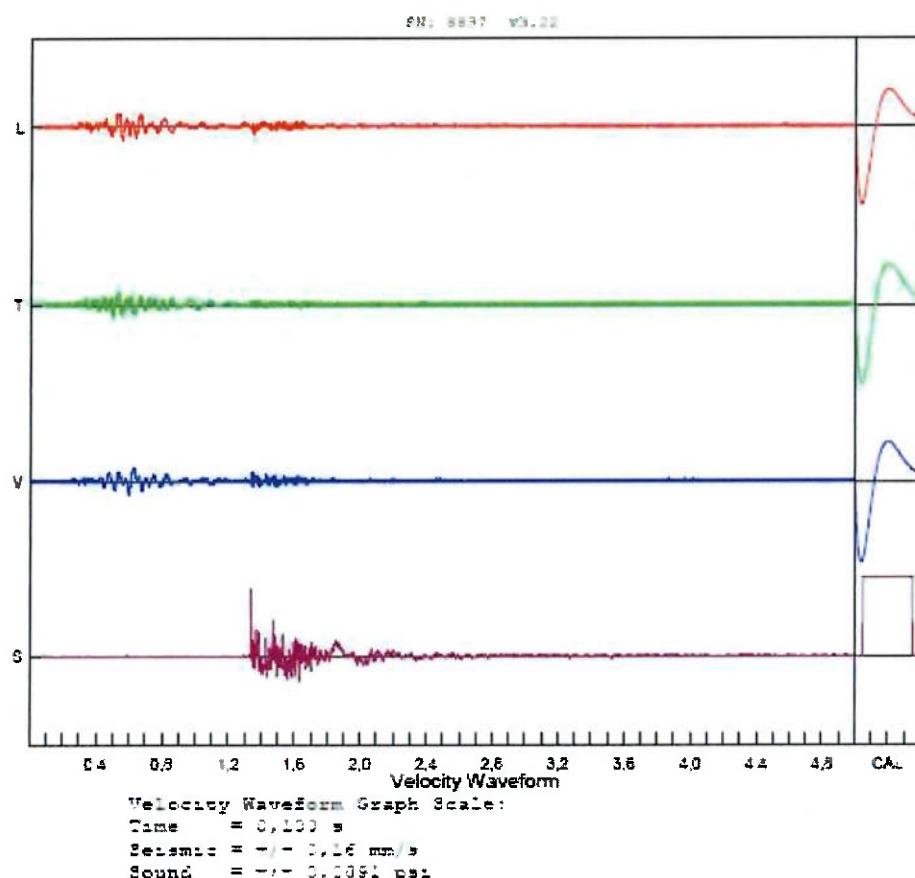
SN: 8893 v3.22
 Date: 03.10.2017 Time: 11.50:18
 Event: 4 Record Time: 5.0 s
 Client: [REDACTED] Summary Data
 Operation: DESMONTE L T V
 Location: CAVA PPV (mm/s) 1.14 1.02 1.65
 Distance: 0. FD (0.1mm) 0.46 0.46 0.61
 Operator: LACA PPA (g) 0.065 0.046 0.098
 Comment: Trigger Level: 0.51 mm/s FREQ (Hz) 62.5 41.7 83.3
 Resultant PPV: 2.16 mm/s
 Peak Air Pressure: 122 db
 0.0 psig

Shaketable Calibrated: 21.08.2017
Additional Info:
 By: GeoSonic Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL. 724.934.1900 FAX 724.934.1999



SN: 8897 v3.12
 Date: 03.10.2017 Time: 11:50:19
 Event: + Record Time: 5.0 s
 Client: [REDACTED] Summary Data
 Operation: DESMONTE L T V
 Location: CAVA PPV (mm/s) 0.64 0.64 0.64
 Distance: 0. PD (.01mm) 0.65 0.54 0.76
 Operator: LACA PPA (g) 0.020 0.013 0.033
 Comment: Trigger Level: 0.51 mm/s FREQ (Hz) 16.1 31.3 20.8
 Resultant PPV: 0.95 mm/s
 Peak Air Pressure: 128 dB
 0.0 psi

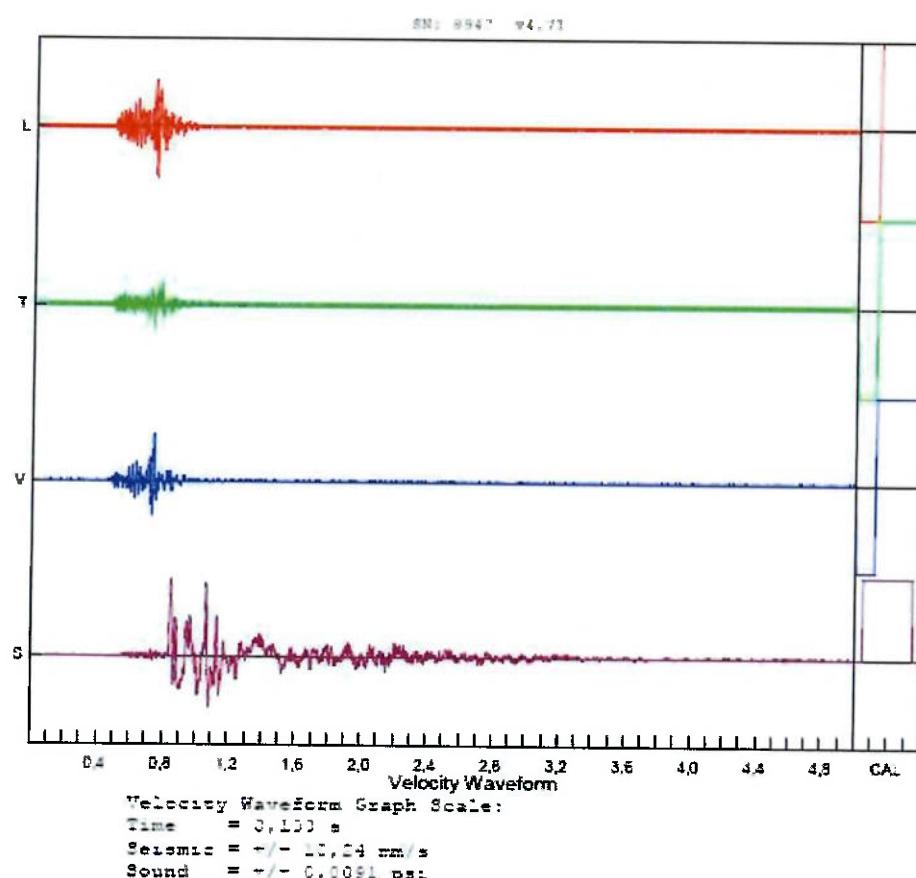
Shaketable Calibrated: 21.09.2017
 Additional Info:
 By: GeoSonic Inc
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



SN: 8947 v4.71
 Date: 10-03-2017 Time: 11:50.19
 Event: 6 Record Time: 5.0 s
 Client: [REDACTED] Summary Data
 Operation: Desmonte L T V
 Location: Cava PPV (mm/s) 5.91 2.60 5.59
 Distance: 0. PD (.01mm) 2.67 1.54 2.04
 Operator: Lucaseman PPA (g) 0.182 0.085 0.150
 Comment: Trigger Level: 0.51 mm/s FREQ (Hz) 33.3 35.7 38.5
 Resultant PPV: 7.94 mm/s
 Peak Air Pressure: 129 db
 0.0080 psi

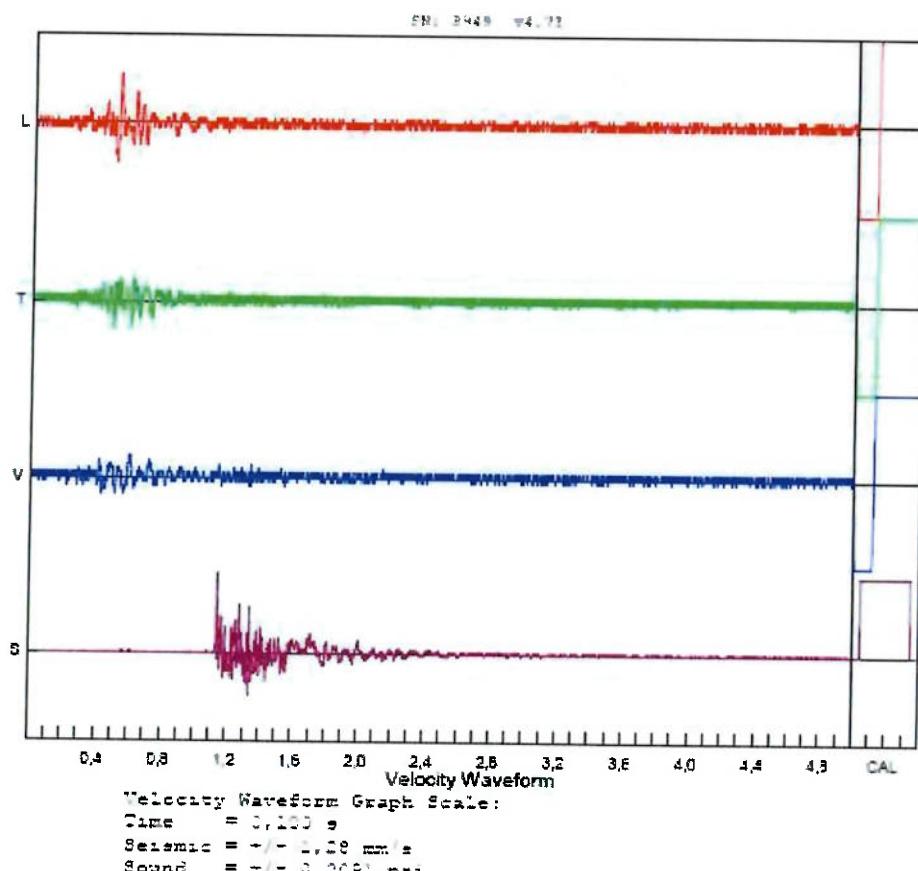
Additional Info:

Shaketable Calibrated: 09-18-2017
 By: GeoSonic Inc.
 359 Nortigate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999



SN: 8949 v4.71 Date: 10/03/2017 Time: 11:50:18
 Event: 6 Record Time: 5.0 s
 Client: [REDACTED] Summary Data
 Operation: DESMONTE L T V
 Location: CAVA PPV (mm/s) 0.70 0.38 0.32
 Distance: 0. PD (.01mm) 0.51 0.28 0.35
 Operator: CAVA PPA (g) 0.013 0.013 0.013
 Comment: FREQ (Hz) 20.8 31.3 14.7
 Trigger Level: 0.51 mm/s Resultant PPV: 0.70 mm/s
 Peak Air Pressure: 129 db
 0.0083 psi

Additional Info: Shaketable Calibrated: 09/18/2017
 By: GeoSonics Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL. 724.934.2900 FAX 724.934.2999



SN: 8950 v4.71

Date: 10/03/2017

Time: 11:50:19

Event: 6

Record Time: 5.0 s

Client: [REDACTED]

Operation: DESMONTE

Location: CAVA

Distance: 0.

Operator: LACA

Comment:

Trigger Level: 0.51 mm/s

Summary Data

	L	T	V
PPV (mm/s)	0.32	0.51	0.38
PD (.01mm)	0.38	0.41	0.29
PPA (g)	0.020	0.013	0.013
FREQ (Hz)	14.7	11.6	10.2
Resultant PPV:	0.64 mm/s		
Peak Air Pressure:	129 db		
	0.0079 psi		

Shaketable Calibrated: 09/18/2017

Additional Info:

By: GeoSonic Inc.
 359 Northgate Drive
 Warrendale, PA 15086 U.S.A.
 TEL. 724.934.2900 FAX. 724.934.2999

