

**PEDRO GABRIEL PADILHA GANDARA MENDES**

**ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM  
PEDREIRA NA GRANDE SÃO PAULO**

**São Paulo**

**2021**

**PEDRO GABRIEL PADILHA GANDARA MENDES**

**ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM  
PEDREIRA NA GRANDE SÃO PAULO**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia de Minas e de  
Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

Orientador:

Prof. Dr. Wilson Siguemasa Iramina

**São Paulo**

**2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

### **Catálogo na fonte**

Mendes, Pedro Gabriel Padilha Gandara

Análise dos métodos de controle de vibração em pedreira na Grande São Paulo/ P. G. P. G. Mendes -- São Paulo, 2021.  
38 p.

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

1.Equação carga-distância 2.Controle ambiental 3.Vibração do terreno I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Minas e de Petróleo II t.

## Resumo

Devido ao constante crescimento das cidades, apresentou-se como consequência a aproximação com as minerações. Além disso, no caso das pedreiras, por originalmente não poderem estar longe do mercado consumidor, seu englobamento à área das cidades ocorreu de forma ainda mais rápida. A presença de comunidades próximas à pedreira comumente causa conflitos e insatisfações. Um dos principais motivos de conflito é a vibração sísmica, causada pelo desmonte utilizando explosivos, o qual interfere na vida cotidiana dos habitantes da região. Em resposta aos constantes conflitos, as restrições ambientais estão cada vez mais rígidas. Do lado das mineradoras, existe a constante procura por métodos de controle da vibração mais eficazes para minimizar os efeitos adversos. Neste trabalho, foram analisados os métodos de controle de vibração atualmente aplicados em uma pedreira localizada na Grande São Paulo. A pedreira monitora a vibração do solo utilizando um sismógrafo por desmonte. Utilizando-se das medições do sismógrafo, foi possível elaborar modelos de equações carga-distância para as direções mais críticas em relação à proximidade das comunidades com a pedreira. As equações carga-distância, assim como a análise dos métodos de controle e monitoramento da vibração atualmente aplicados, servem como ferramenta para auxiliar no controle da vibração.

Palavras-chave: Equação carga-distância, controle ambiental, vibração do terreno

## **Abstract**

Due to the constant growth of the cities, one of the consequences was the approximation with mining. Furthermore, regarding the quarries, as they were originally close to the consumer market, their involvement by the cities occurred even faster. The presence of communities near the quarry commonly causes conflicts. One of the main reasons for conflict is seismic vibration, caused by blasting, which interferes in the daily lives of the inhabitants in the region. In response to constant conflicts, environmental restrictions are becoming increasingly strict. On the mining companies' side, there is robust search for more effective vibration control methods to minimize adverse effects. In this work, the vibration control methods currently applied in a quarry located in São Paulo Metropolitan area were analyzed. Quarry seismic vibration was controlled using a single seismograph per blasting. By using seismograph measurements, it was possible to develop scaled-distance models for the most critical directions relating to the proximity of the communities to the quarry. The scaled-distance equations, as well as the currently applied vibration control analysis and monitoring methods, serve as a tool to support vibration control.

**Keywords:** Scaled-distance, environment control, ground vibrations.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Diagrama esquemático de distribuição da energia de detonação. ....                    | 8  |
| Figura 2 - Mapa de iso-velocidades para Pedreira Juruaçu. ....                                   | 12 |
| Figura 3 - Limites de velocidade de vibração da partícula de pico por faixas de frequência. .... | 14 |
| Figura 4 - Área da pedreira e comunidades ao redor. ....                                         | 16 |
| Figura 5 – Pontos de instalação do sismógrafo. ....                                              | 17 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Equação carga-distância para todos os dados válidos. ....                                                                 | 21 |
| Gráfico 2 – Equação carga-distância para os dados medidos nos pontos 1 e 2. ....                                                      | 23 |
| Gráfico 3 – Equação carga-distância para medição nos pontos 1 e 2, sem desmontes secundários e sem o ponto considerado disperso. .... | 26 |
| Gráfico 4 – Equação carga-distância considerando o dobro de carga máxima por espera para $V_p$ maiores que 5 mm/s. ....               | 29 |
| Gráfico 5 - Equação carga-distância considerando o dobro de carga máxima por espera. ....                                             | 31 |
| Gráfico 6- Equação carga-distância para as medições no ponto 5. ....                                                                  | 34 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência. ....                                  | 13 |
| Tabela 2 - Dados fornecidos pela pedreira. ....                                                                                   | 18 |
| Tabela 3 – Dados de medição com distância escalonada. ....                                                                        | 20 |
| Tabela 4 – Dados medidos nos pontos 1 e 2. ....                                                                                   | 22 |
| Tabela 5 – Dados medidos nos pontos 1 e 2 com destaque para os desmontes secundário. ....                                         | 25 |
| Tabela 6 – Dados medidos nos pontos 1 e 2 considerando o dobro de carga máxima por espera para vibrações maiores que 5 mm/s. .... | 28 |
| Tabela 7 - Dados medidos nos pontos 1 e 2 considerando o dobro de carga máxima por espera. ....                                   | 30 |
| Tabela 8 – Equação carga-distância para cada modelo. ....                                                                         | 32 |
| Tabela 9 – Simulação da equação carga-distância para os modelos elaborados. ....                                                  | 32 |
| Tabela 10 – Comparativo dos modelos elaborados com os modelos da literatura. ...                                                  | 33 |
| Tabela 11 – Dados medidos no ponto 5. ....                                                                                        | 34 |

## SUMÁRIO

|     |                                  |    |
|-----|----------------------------------|----|
| 1   | INTRODUÇÃO .....                 | 6  |
| 1.1 | OBJETIVO .....                   | 6  |
| 2   | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....      | 7  |
| 3   | MATERIAIS E MÉTODOS.....         | 14 |
| 4   | CARACTERÍSTICAS DA PEDREIRA..... | 16 |
| 5   | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....     | 17 |
| 6   | CONCLUSÃO.....                   | 35 |
|     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 37 |

## **1 INTRODUÇÃO**

O uso de explosivos é o método mais utilizado para a extração de rochas, porém apenas uma parcela da energia atua na fragmentação da rocha. O restante da energia produzida pelo explosivo se dispersa causando efeitos indesejáveis, como a vibração do terreno, ruído e sobrepressão atmosférica.

Esse método é o mais comumente aplicado nas pedreiras, que possuem alguns agravantes devido a sua localização. Por ter o produto com baixo valor agregado, as pedreiras têm de estar localizadas próximas às cidades. No caso das pedreiras mais antigas, o avanço da cidade pode chegar até as proximidades ou mesmo englobar a área da pedreira.

A convivência entre as comunidades próximas e a pedreira é complexa, uma vez que dificilmente a operação da pedreira não trará impactos na vida da comunidade. No entanto, existem medidas de controle e fiscalização para diminuir os impactos.

A vibração do terreno é um dos impactos que mais interfere, podendo inclusive causar danos nas edificações próximas, se não for controlada. Desta forma, existem modelos matemáticos para estimar o comportamento da vibração do terreno pelo uso de explosivos. Um destes modelos é a equação carga-distância, o qual, para uma determinada direção, permite avaliar a vibração do terreno de acordo com a carga máxima por espera, bem como a distância para o ponto de detonação.

A equação carga-distância é uma importante ferramenta. Ela auxilia na realização do plano de fogo, de modo a informar uma relação entre carga máxima por espera e níveis de vibração, ajudando a obter uma melhor fragmentação da rocha, sem impactar nas comunidades próximas ou ultrapassar os limites legais para vibração do terreno.

### **1.1 OBJETIVO**

O trabalho tem como objetivo analisar os métodos de controle das vibrações resultantes do desmonte de rocha por explosivos atualmente utilizados em uma pedreira situada na Grande São Paulo, estudando os possíveis modelos de equação carga-distância para analisar o comportamento da vibração e propondo melhorias para o controle da vibração do terreno.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desmonte de rochas por explosivos é o método que apresenta o melhor custo-benefício na fragmentação de rochas. Porém, apenas 5 a 15% da energia liberada é efetivamente utilizada para fragmentar o material e o restante da energia se dissipa no ambiente, gerando efeitos secundários (DINIS DA GAMA, 1998).

Dessa forma, fica evidente que boa parte da energia é desperdiçada, e pode ocasionar efeitos indesejáveis as regiões ao redor da mineração.

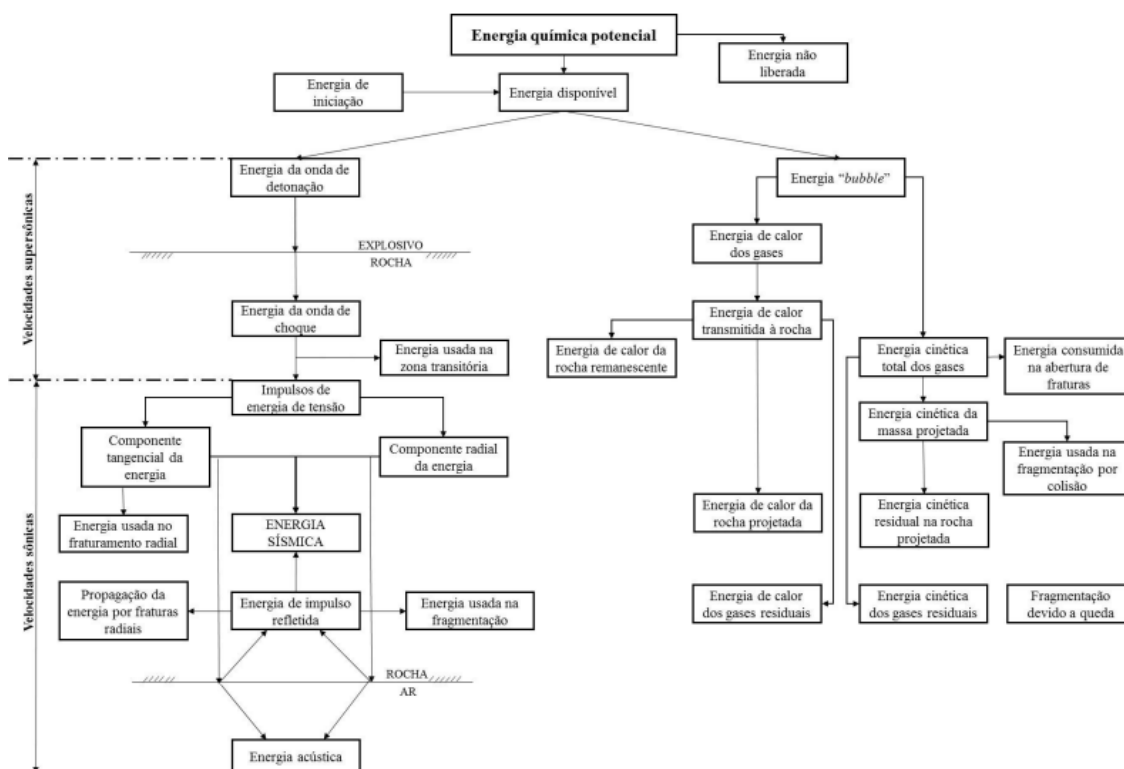
Para Sen (1995), as técnicas envolvendo explosivos diferem de outras técnicas em que a energia é liberada rapidamente, podendo existir risco real de perturbação ambiental caso o processo de liberação de energia não seja adequadamente controlado.

A percepção humana e a resposta às vibrações do terreno decorrentes das detonações têm sido um problema constante para a indústria mineral, para as pessoas que vivem no entorno de uma mineração e também para os órgãos regulamentadores responsáveis pelos padrões de conforto e segurança (IRAMINA, 2002).

Para Dallora Neto (2004), a relação existente entre a frequência natural da edificação e a frequência de vibração que será submetida é critério decisivo para a ocorrência de danos a edificações. Os danos também podem ser causados por alongamento, cisalhamento e torção, que podem ser incrementadas pela superposição de tensões estacionárias preexistentes na edificação, devendo ser também considerado o estado de conservação da edificação.

Lopez Jimeno *et al.* (2003), propõem um diagrama para a distribuição de energia da detonação, que pode ser visto de maneira simplificada na figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático de distribuição da energia de detonação.



Fonte: Adaptado de Lopez Jimeno *et al.* (2003).

A energia que será de fato utilizada para o propósito do desmonte variará de acordo com as condições geológicas e de projeto.

Um projeto tecnicamente correto é aquele que maximiza a utilização da energia de detonação, canalizando-a para fragmentação adequada da rocha (IRAMINA, 2002).

Para Ataei e Sereshki (2017), podemos dividir as variáveis determinantes para o desmonte entre as variáveis controláveis e as variáveis não controláveis. As variáveis controláveis podem ser divididas em variáveis geométricas, variáveis do explosivo e variáveis do retardamento. As variáveis geométricas são o diâmetro do furo, espaçamento, afastamento, tampão, inclinação do furo e sub-furação; as variáveis do explosivo são o tipo do explosivo, a carga total de explosivo, a carga máxima por espera, a energia da explosão, a velocidade da detonação e o confinamento; as variáveis de retardamento são o ponto de iniciação, a sequência de retardo, o intervalo de retardo e o método de detonação. As variáveis não controláveis são a condição da rocha, a topografia, a geologia, as propriedades da rocha e as condições climáticas.

O projeto do plano de fogo deve considerar todas as variáveis, sempre que possível, modificando as variáveis controláveis para se adequar ao máximo às variáveis não controláveis. Desta forma, além de realizar o desmonte com a fragmentação desejada, deve-se obter uma relação menor de energia desperdiçada, diminuindo os efeitos indesejados do desmonte, como a vibração do terreno.

A vibração é expressa pela velocidade de vibração da partícula. Segundo a norma NBR 9653 (ABNT, 2018), a velocidade de vibração da partícula é a velocidade com que uma partícula oscila em torno do seu ponto de repouso devido a passagem de uma onda sísmica, neste caso decorrente da detonação de explosivos. Os movimentos podem ser definidos em três componentes: vertical, transversal e longitudinal, que são mutualmente perpendiculares.

Para controle da vibração, o valor de referência é a velocidade de vibração de pico da partícula. Na NBR 9653 (ABNT, 2018), temos que a velocidade de vibração de pico da partícula é o máximo valor instantâneo da velocidade de vibração de uma partícula em um ponto, durante um determinado intervalo de tempo.

Uma forma de determinar a velocidade de vibração da partícula é utilizando a equação carga-distância.

Para Persson (1994), a propagação radial da energia atinge rapidamente o limite plástico de deformação da rocha, a partir daí a onda de tensão começa a se comportar de maneira elástica, com atenuação ocorrendo de forma elástica estável.

Em Iramina (2002), é ressaltada a existência de diversos modelos que revelam que a relação entre a velocidade de pico da partícula e a distância escalonada segue a lei quadrática.

A distância escalonada é um parâmetro que é normalmente utilizado para comparar vibrações devidas às diferentes massas de explosivos detonadas em distâncias variadas com relação ao ponto de monitoramento (IRAMINA, 2002). Seguindo a seguinte equação:

$$DE = \left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right) \quad (1)$$

Onde  $Q$  [kg] é a massa do explosivo por espera e  $D$  [m] é a distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento.

Assim, o United States Bureau of Mines (USBM) estabelece a seguinte expressão para determinação da velocidade de pico da partícula:

$$V_p = k \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-b} \quad (2)$$

Onde  $V_p$  é a velocidade de pico da partícula,  $D$  é a distância da detonação ao ponto de medição e  $Q$  é a carga máxima por espera. As constantes  $k$  e  $b$  são fatores locais.

A equação acima plota uma reta em papel log-log, o valor de  $k$  é dado pela interceptação do eixo vertical, na distância escalonada igual a unidade, enquanto que a constante  $b$  é dada pela inclinação da reta (IRAMINA,2002).

Desta forma, diversos modelos foram propostos para estimar a velocidade de pico da partícula. Ressaltando os seguintes modelos aplicados ao granito:

Tripathy (2002) propôs o seguinte modelo para o desmonte de granito para construção na Índia:

$$V_p = 399,5 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,40} \quad (3)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg.

Scott (1996), indica a seguinte equação sugerida pela Australian Standards no caso de ausências de medições no local:

$$V_p = 1140 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,6} \quad (4)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg.

Segundo Konya (1995), a USBM adota a seguinte equação genérica para a velocidade de pico da partícula:

$$V_p = 714,4 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,6} \quad (5)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg.

Em Iramina (2002) o seguinte modelo é proposto para a Pedreira Lageado localizada em São Paulo:

$$V_p = 167,7 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,0775} \quad (6)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg.

Apesar de, através dos modelos, ser possível estimar o comportamento da vibração para uma determinada distância, vale ressaltar que as características geológicas para cada direção podem interferir significativamente na atenuação da vibração.

Iramina (2002) determina o mapa de iso-velocidades para a Pedreira Riuma, localizada na Zona Oeste da cidade de São Paulo. O mapa de iso-velocidades é uma técnica que permite que seja rastreado o efeito de uma carga explosiva por meio da distribuição e instalação de diversos sensores triaxiais ao redor do local de detonação, monitorando a vibração à medida que a onda se afasta do local de detonação. Assim, é possível desenhar um mapa de contorno das vibrações medidas pelos sismógrafos, conectando as áreas nas quais as amplitudes de vibração sejam iguais.

Entre as etapas para determinar o mapa de iso-velocidades para a Pedreira Riuma, foi monitorada a vibração para 8 direções e calculada a equação carga-distância para cada uma delas. Podemos destacar a diferença entre a equação para a direção norte e para a direção oeste.

Equação carga-distância para direção norte:

$$V_p = 399,9 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,1047} \quad (7)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg

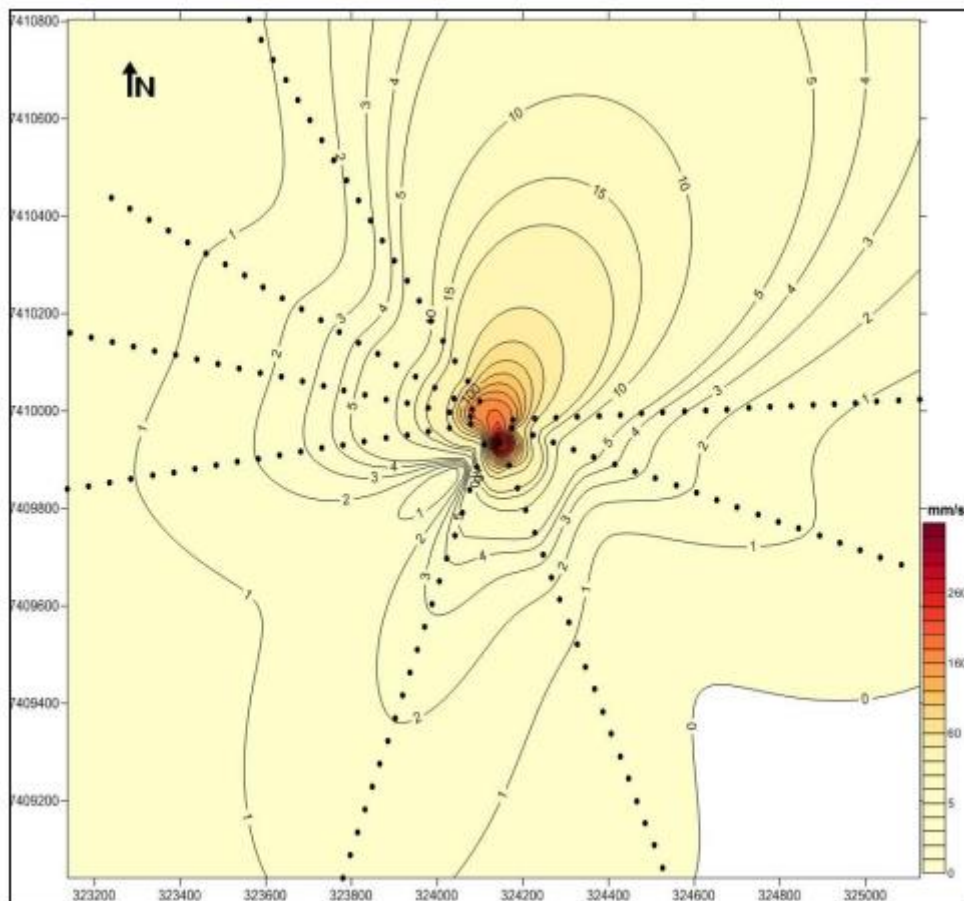
Equação carga-distância para direção oeste:

$$V_p = 167,4 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,1290} \quad (8)$$

Com  $V_p$  em mm/s,  $D$  em m e  $Q$  em kg

Canedo (2013), propôs o mapa de iso-velocidades da figura 2 para a Pedreira Juruaçu.

Figura 2 - Mapa de iso-velocidades para Pedreira Juruaçu.



Fonte: Canedo (2013).

No mapa, é possível ser visualizado o comportamento distinto da vibração para cada direção. Este tipo de questão, juntamente com algum tipo de falha no procedimento de desmonte, aumenta a importância do monitoramento constante da vibração do terreno.

O monitoramento das vibrações torna-se importante à medida que possibilita quantificar os impactos ambientais decorrentes de detonações, confrontando-os aos valores estipulados pelas normas técnicas vigentes e pela legislação ambiental (ABNT/NBR 9653/2018 e CETESB D7.013/2015). Avaliar o ajuste das variáveis por meio de métodos estatísticos resulta no melhor conhecimento do processo de detonação e em proposições de medidas mitigadoras (BACCI; LANDIM, 2016).

Atualmente no estado de São Paulo existem duas normas técnicas em vigor para controle da vibração, a NBR 9653 de 2018 da ABNT e a D7.013 de 2015 da CETESB.

Segundo a NBR 9653 (ABNT, 2018) o limite para a velocidade de vibração da partícula de pico deve ser de acordo com a tabela 1.

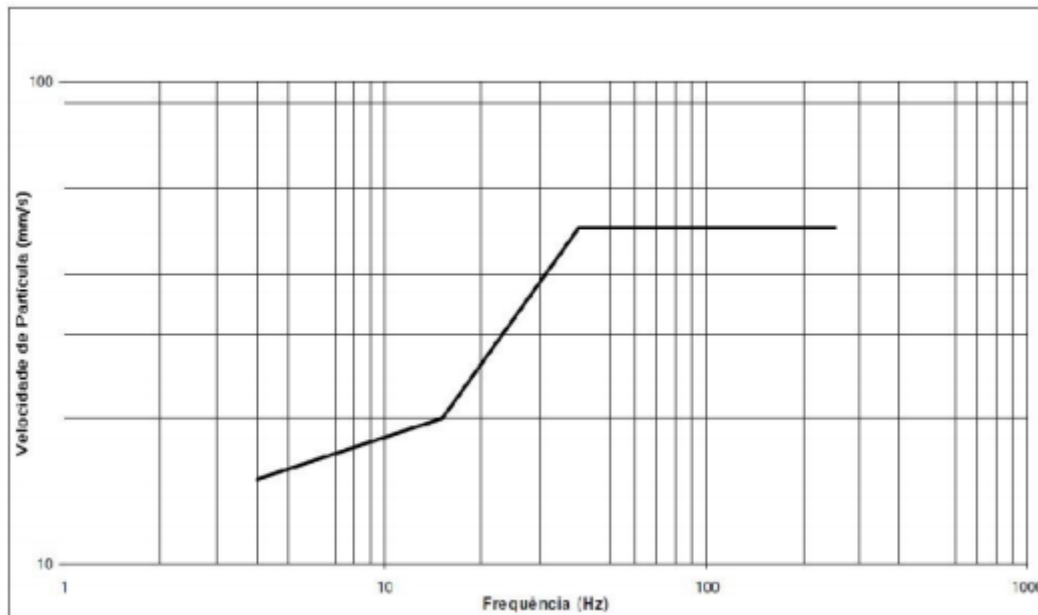
Tabela 1 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

| <b>Faixa de frequência <sup>a</sup></b>                                                                                                                                                                                            | <b>Limite de velocidade de vibração de partícula de pico</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 4 Hz a 15 Hz                                                                                                                                                                                                                       | Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 mm/s        |
| 15 Hz a 40 Hz                                                                                                                                                                                                                      | Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 mm/s            |
| Acima de 40 Hz                                                                                                                                                                                                                     | 50 mm/s                                                      |
| <sup>a</sup> Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).<br>NOTA 1 Hz corresponde a uma oscilação por segundo. |                                                              |

Fonte: ABNT (2018).

A NBR 9653 (ABNT, 2018) ainda ressalta que a variação entre as faixas de frequência é linear, conforme a figura 3.

Figura 3 - Limites de velocidade de vibração da partícula de pico por faixas de frequência.



Fonte: ABNT (2018).

A norma D7.013 (CETESB, 2015) determina que a velocidade resultante de vibração das partículas deve ser menor que 4,2 mm/s. A velocidade resultante de vibração das partículas é a somatória vetorial das três componentes ortogonais de vibração de partículas, medidos simultaneamente.

A norma D7.013 (CETESB, 2015) ainda faz referência quanto ao local de posicionamento do sismógrafo para medição, que deve ficar fora dos limites da propriedade ou área de ocupação da mineração. A norma cita também que a medição deve ser realizada, preferencialmente, no receptor mais próximo ou mais atingido, em ambiente externo a mineração. Para licenciamento ambiental, a medição deve ser realizada do lado oposto a bancada onde ocorrerá o desmonte da rocha.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do trabalho inicialmente foram realizadas entrevistas e conversas com o engenheiro e os técnicos responsáveis pelo desmonte das bancadas e monitoramento da vibração do terreno. Foi realizada uma visita ao local para melhor compreender a operação da pedreira e o modo como os controles de vibração são realizados.

Foram fornecidos o plano de fogo genérico e uma planilha com as principais



informações de monitoramento dos desmontes. A planilha foi elaborada pelo técnico responsável baseado nos relatórios do sismógrafo e contém os seguintes dados:

- Data do desmonte;
- Bancadas desmontadas;
- Velocidade de pico da partícula;
- Volume de material desmontado;
- Carga máxima por espera;
- Local de instalação do sismógrafo;
- Distância entre a bancada desmontada e o ponto de instalação do sismógrafo.

As planilhas contêm os dados dos desmontes que ocorreram entre outubro de 2020 e julho de 2021.

Utilizando palavras chaves como equação carga-distância, controle ambiental, vibração do terreno e controle de vibração por desmonte por explosivo, foi possível verificar os métodos de controle de vibração atualmente utilizados. Foram também selecionadas as normas técnicas que estabelecem os limites e controles da vibração no terreno.

Além disso, foi realizado o levantamento de equações carga-distância em outras minerações com características semelhantes.

Na pesquisa, foi possível determinar que a regressão linear é um método amplamente utilizado. A regressão linear é feita a partir da vibração de pico da partícula e da distância escalonada, plotados em um gráfico log-log. Além disso, foi possível elaborar modelos com a regressão linear a partir dos dados fornecidos pela pedreira.

Desta forma, foi feita a elaboração de alguns modelos de equação carga-distância, de modo a auxiliar no controle da vibração. Devido às incertezas no monitoramento e elaboração do plano de fogo, cada modelo possui condições de contorno diferentes.

Os dados foram separados de acordo com o local de medição. Baseado na quantidade de medições em cada local, foram determinadas as direções em que seria possível realizar o estudo. Para este estudo, apenas uma direção apresentava pontos

suficientes para realizar a análise. Portanto, a direção sudeste, que contém as medições realizadas nos pontos 1 e 2 da figura 5, foi selecionada.

Cabe aqui uma observação sobre a qualidade do monitoramento feito pela pedreira. Embora haja pontos em número suficiente para uma regressão, existe ainda uma deficiência relacionada à motivação do monitoramento, sendo realizado somente o necessário para estar em conformidade com as normas. Isso trouxe dificuldades para o estudo, levando à necessidade de se adotar algumas hipóteses de trabalho para se aproximar de um modelo razoável em termos de realidade no comportamento da vibração.

Por fim, os modelos de equação carga-distância foram comparados entre si e com os demais modelos presentes na literatura.

#### **4 CARACTERÍSTICAS DA PEDREIRA**

A pedreira estudada está localizada na grande São Paulo. Foi solicitado que não fosse identificado o nome da pedreira. Na figura 4 podemos ver a área da pedreira, assim como as comunidades ao redor dela.

Figura 4 - Área da pedreira e comunidades ao redor.



Fonte: Google Earth.

Ainda na figura 4, podemos notar duas comunidades próximas a pedreira, sendo uma a norte e outra a sudeste. A comunidade a norte está a aproximadamente 200 m da cava enquanto a comunidade a sudeste está a 550 m.

Em visita a pedreira, foi relatado que nunca receberam reclamações em relação a vibração do terreno vindo da comunidade a norte, mesmo com a pouca distância entre a pedreira e a comunidade. Em relação a comunidade a sudeste, já receberam reclamações. O prédio da administração da pedreira e o refeitório ficam nessa direção, sendo possível sentir a vibração do terreno nestas localidades.

O controle da vibração é feito por medição, utilizado um sismógrafo em cada operação de desmonte. O ponto de instalação varia de acordo com o desmonte, conforme a figura 5.

Figura 5 – Pontos de instalação do sismógrafo.



Fonte: Modificado de Google Earth.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados fornecidos pela pedreira foram compilados na tabela 2.

Tabela 2 - Dados fornecidos pela pedreira.

| Data       | Bancada     | D (m) | Q (kg) | VP (mm/s) | Ponto de medição | Rocha desmontada (t) |
|------------|-------------|-------|--------|-----------|------------------|----------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 605   | 98,00  | 2,54      | 2                | 18.833               |
| 16/10/2020 | 707 oeste   | 655   | 118,00 | 3,38      | 4                | 21.206               |
| 21/10/2020 | 707 leste   | 300   | 45,00  | 0,11      | 4                | 18.225               |
| 27/10/2020 | 707 norte2  | 335   | 108,00 | -         | 4                | 16.160               |
| 27/10/2020 | 791 sul     | 195   | 24,00  | -         | 4                | 2.348                |
| 30/10/2020 | 707 norte   | 300   | 104,00 | -         | 4                | 17.577               |
| 05/11/2020 | 707 oeste   | 650   | 110,00 | 3,43      | 4                | 18.644               |
| 05/11/2020 | 710 leste   | 650   | 29,00  | 3,43      | 4                | 2.980                |
| 11/11/2020 | 707 norte2  | 775   | 108,00 | 3,36      | 2                | 13.163               |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 600   | 100,00 | 4,19      | 2                | 20.716               |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 825   | 122,00 | 0,13      | 2                | 16.429               |
| 02/12/2020 | 791 sul     | 440   | 54,80  | -         | 2                | 8.161                |
| 02/12/2020 | 707 sul     | 820   | 64,24  | -         | 2                | 5.670                |
| 02/12/2020 | 707 norte   | 750   | 102,00 | -         | 2                | 8.222                |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 920   | 102,00 | 1,48      | 2                | 11.480               |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 540   | 104,00 | 1,48      | 2                | 11.340               |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 455   | 120,00 | 2,14      | 2                | 5.796                |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 770   | 33,00  | 0,44      | 2                | 15.380               |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 433   | 16,00  | 0,51      | 2                | 6.531                |
| 30/12/2020 | 707 norte 2 | 330   | 98,00  | 2,15      | 4                | 19.958               |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 425   | 21,40  | 3,62      | 1                | 4.388                |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 500   | 39,28  | 1,40      | 1                | 5.670                |
| 11/01/2021 | 729 Sul     | 790   | 104,46 | 14,41     | 4                | 20.979               |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 770   | 121,00 | 2,03      | 2                | 23.684               |
| 25/01/2021 | 699 Sul     | -     | 3,33   | -         | -                | 3.254                |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 410   | 79,00  | 6,54      | 2                | 17.223               |
| 25/01/2021 | 791 Sul     | 417   | 11,25  | 6,54      | 2                | 1.426                |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 530   | 118,00 | 6,02      | 2                | 18.205               |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 450   | 78,00  | 5,94      | 2                | 9.729                |
| 09/02/2021 | 793 Norte   | -     | 114,00 | -         | -                | 16.403               |
| 12/02/2021 | 707 Oeste   | 390   | 128,00 | 1,14      | 4                | 10.820               |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 400   | 119,00 | 4,57      | 2                | 11.510               |
| 18/02/2021 | 793 Leste   | 400   | 126,00 | 0,19      | 2                | 9.572                |
| 22/02/2021 | 793 Norte   | -     | 119,00 | -         | -                | 16.403               |
| 26/02/2021 | 781 Norte   | 590   | 86,00  | 1,26      | 3                | 10.719               |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 448   | 132,00 | 4,73      | 1                | 33.499               |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 590   | 86,80  | 5,27      | 1                | 28.401               |
| 19/03/2021 | 707 sul     | 400   | 112,00 | 2,25      | 5                | 15.781               |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 1.023 | 117,00 | 0,88      | 1                | 10.383               |
| 26/03/2021 | 791 sul     | 557   | 70,00  | 1,50      | 5                | 15.175               |
| 30/03/2021 | 707 SUL     | 392   | 133,00 | 1,81      | 5                | 8.750                |
| 30/03/2021 | 729 SUL     | 800   | 146,00 | 1,81      | 5                | 19.555               |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 595   | 117,00 | 2,36      | 1                | 14.467               |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 564   | 77,00  | 4,21      | 1                | 8.317                |
| 15/04/2021 | 707 sul     | -     | 90,00  | -         | -                | 22.756               |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1.030 | 111,00 | 1,82      | 1                | 17.982               |
| 27/04/2021 | 707 sul     | 400   | 146,00 | 2,95      | 5                | 11.389               |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 819   | 107,00 | 1,60      | 1                | 20.894               |
| 03/05/2021 | 781 leste   | 500   | 57,00  | 1,55      | 1                | 1.729                |
| 10/05/2021 | 707 sul     | 598   | 125,00 | 2,20      | 6                | 24.349               |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1.043 | 121,00 | 1,20      | 1                | 21.050               |
| 21/05/2021 | 791 sul     | 353   | 87,00  | 1,70      | 5                | 13.620               |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 796   | 43,00  | 0,16      | 1                | 4.871                |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 552   | 82,00  | 1,79      | 1                | 7.241                |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 1.050 | 130,00 | 0,88      | 1                | 9.131                |
| 07/06/2021 | 696 sul     | 708   | 4,50   | 0,19      | 1                | 1.555                |
| 07/06/2021 | 714 norte   | 1.020 | 18,00  | 0,19      | 1                | 1.960                |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 1.000 | 110,00 | 0,19      | 1                | 17.233               |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 473   | 108,00 | 3,19      | 1                | 16.149               |
| 11/06/2021 | 781 leste   | 473   | 3,50   | 1,53      | 1                | 670                  |
| 15/06/2021 | 791 sul     | -     | 92,00  | -         | -                | 7.898                |
| 15/06/2021 | 807 leste   | -     | 52,00  | -         | -                | 8.465                |
| 22/06/2021 | 696 oeste   | 900   | 8,23   | 1,15      | 6                | 4.199                |
| 22/06/2021 | 707 norte   | 746   | 145,00 | 1,15      | 6                | 17.265               |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 500   | 83,00  | 3,81      | 1                | 15.400               |
| 02/07/2021 | 780 leste   | 194   | 113,00 | 0,94      | 6                | 10.886               |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 880   | 45,00  | 0,08      | 1                | 5.982                |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 557   | 104,52 | 2,44      | 1                | 7.634                |
| 08/07/2021 | 780 sul     | -     | 89,48  | -         | -                | 11.057               |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

Na tabela 2 temos as seguintes colunas:

- Data: data do desmonte;
- Bancada: cota em metros e direção da bancada;
- D: distância entre a bancada desmontada e o ponto de monitoramento do sismógrafo em metros;
- Q: carga máxima por espera em kg;
- Vp: a velocidade máxima da partícula em mm/s;
- Ponto de medição: O ponto de instalação do sismógrafo de acordo com a figura 5;
- Rocha desmontada: A quantidade de rocha desmontada em toneladas.

Pelos dados da tabela 2, observamos que nos dias 25/01/21, 09/02/21, 22/02/21, 15/04/21, 15/06/21 e 08/07/21 não é descrito nem mesmo o ponto de instalação do aparelho, indicando que não foi monitorada a vibração. Para o estudo, portanto, esses dias foram descartados.

Nos dias 27/10/20, 30/10/20 e 02/12/20 ocorre a descrição da instalação do aparelho, mas não há registro de medição. Isso pode ocorrer pela vibração estar abaixo do limite inferior de sensibilidade do sismógrafo, não disparando o sensor ou por uma falha na instalação ou acionamento do aparelho. Como não é possível determinar a causa de não ter ocorrido a medição, os dados também foram descartados para o estudo da vibração.

Com os dados restantes, foi desenvolvida a tabela 3, que inclui a distância escalonada, a velocidade máxima da partícula, a data de desmonte, a bancada desmontada e o ponto de medição.

Tabela 3 – Dados de medição com distância escalonada.

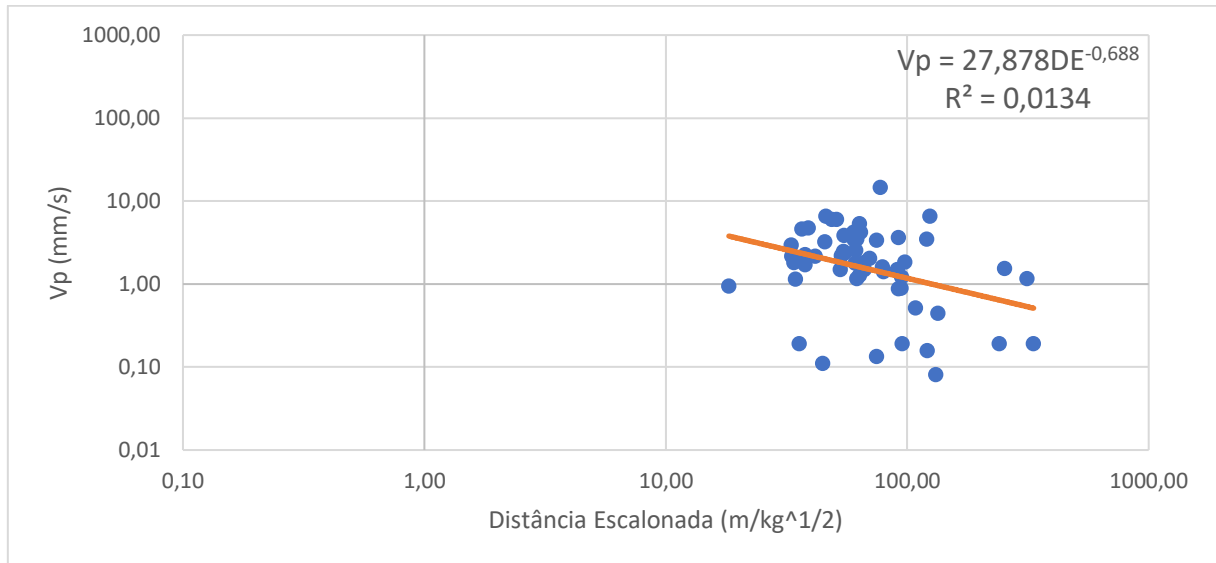
| Data       | Bancada     | Vp (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) | Ponto de medição |
|------------|-------------|-----------|---------------------------|------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 2,54      | 61,11                     | 2                |
| 16/10/2020 | 707 oeste   | 3,38      | 60,30                     | 4                |
| 21/10/2020 | 707 leste   | 0,11      | 44,72                     | 4                |
| 05/11/2020 | 707 oeste   | 3,43      | 61,98                     | 4                |
| 05/11/2020 | 710 leste   | 3,43      | 120,70                    | 4                |
| 11/11/2020 | 707 norte2  | 3,36      | 74,57                     | 2                |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 4,19      | 60,00                     | 2                |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 0,13      | 74,69                     | 2                |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 1,48      | 91,09                     | 2                |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 1,48      | 52,95                     | 2                |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 2,14      | 41,54                     | 2                |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 0,44      | 134,04                    | 2                |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 0,51      | 108,13                    | 2                |
| 30/12/2020 | 707 norte 2 | 2,15      | 33,34                     | 4                |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 3,62      | 91,87                     | 1                |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 1,40      | 79,78                     | 1                |
| 11/01/2021 | 729 Sul     | 14,41     | 77,30                     | 4                |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 2,03      | 70,00                     | 2                |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 6,54      | 46,13                     | 2                |
| 25/01/2021 | 791 Sul     | 6,54      | 124,33                    | 2                |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 6,02      | 48,79                     | 2                |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 5,94      | 50,95                     | 2                |
| 12/02/2021 | 707 Oeste   | 1,14      | 34,47                     | 4                |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 4,57      | 36,67                     | 2                |
| 18/02/2021 | 793 Leste   | 0,19      | 35,63                     | 2                |
| 26/02/2021 | 781 Norte   | 1,26      | 63,62                     | 3                |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 4,73      | 38,95                     | 1                |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 5,27      | 63,33                     | 1                |
| 19/03/2021 | 707 sul     | 2,25      | 37,80                     | 5                |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 0,88      | 94,58                     | 1                |
| 26/03/2021 | 791 sul     | 1,50      | 66,57                     | 5                |
| 30/03/2021 | 707 SUL     | 1,81      | 33,99                     | 5                |
| 30/03/2021 | 729 SUL     | 1,81      | 66,21                     | 5                |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 2,36      | 55,01                     | 1                |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 4,21      | 64,27                     | 1                |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1,82      | 97,76                     | 1                |
| 27/04/2021 | 707 sul     | 2,95      | 33,10                     | 5                |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 1,60      | 79,18                     | 1                |
| 03/05/2021 | 781 leste   | 1,55      | 66,23                     | 1                |
| 10/05/2021 | 707 sul     | 2,20      | 53,49                     | 6                |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1,20      | 94,82                     | 1                |
| 21/05/2021 | 791 sul     | 1,70      | 37,85                     | 5                |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 0,16      | 121,39                    | 1                |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 1,79      | 60,96                     | 1                |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 0,88      | 92,09                     | 1                |
| 07/06/2021 | 696 sul     | 0,19      | 333,75                    | 1                |
| 07/06/2021 | 714 norte   | 0,19      | 240,42                    | 1                |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 0,19      | 95,35                     | 1                |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 3,19      | 45,51                     | 1                |
| 11/06/2021 | 781 leste   | 1,53      | 252,83                    | 1                |
| 22/06/2021 | 696 oeste   | 1,15      | 313,72                    | 6                |
| 22/06/2021 | 707 norte   | 1,15      | 61,95                     | 6                |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 3,81      | 54,88                     | 1                |
| 02/07/2021 | 780 leste   | 0,94      | 18,25                     | 6                |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 0,08      | 131,18                    | 1                |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 2,44      | 54,48                     | 1                |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.



Assim foi elaborada a equação carga-distância, que pode ser vista no gráfico 1.

Gráfico 1 - Equação carga-distância para todos os dados válidos.



Fonte: Elaboração própria.

O modelo apresenta baixo ajuste com os dados, o que já é esperado uma vez que estão sendo consideradas medições para direções diferentes. O fato de os desmontes terem sido realizados em bancadas diferentes também influencia negativamente no ajuste dos dados. A equação carga-distância para este modelo é:

$$V_p = 27,878 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-0,688} \quad (9)$$

Onde:

$V_p$ : velocidade máxima da partícula (mm/s).

$D$ : distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

$Q$ : carga máxima por espera (kg).

A direção sudeste possui mais medições, por ser mais sensível em relação à vibração, inclusive em relação à comunidade. A seguir serão apresentados modelos de equação carga-distância concentrados nessa direção, que possui os pontos de medição 1 e 2. Com estes dados será possível diminuir a interferência da direção de medição na equação carga-distância.

Na tabela 4 são apresentados os dados medidos nos pontos 1 e 2.

Tabela 4 – Dados medidos nos pontos 1 e 2.

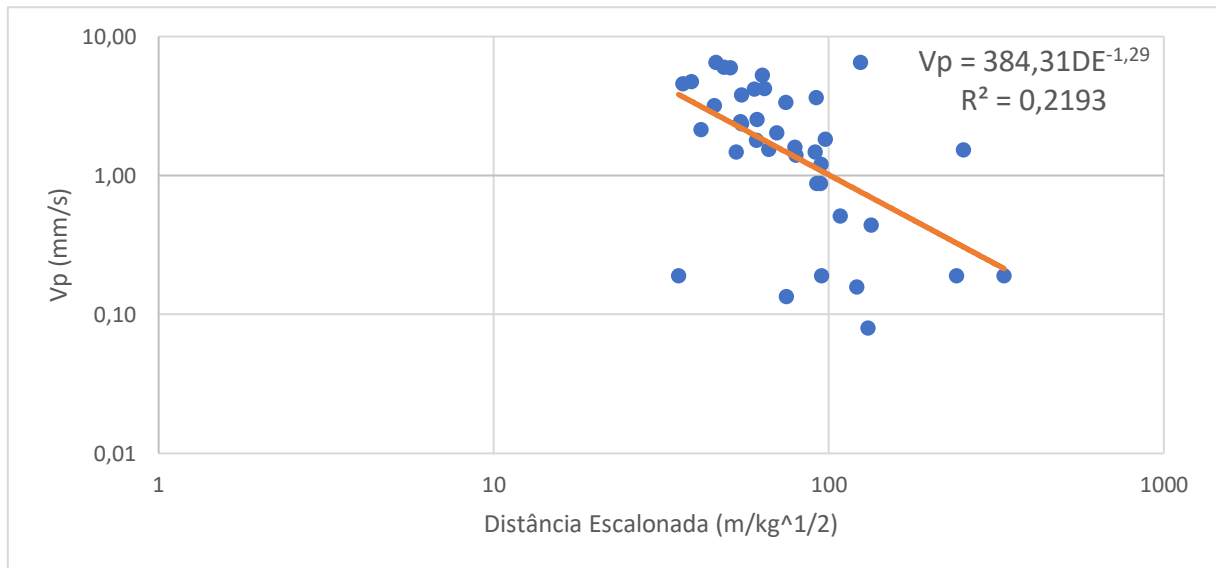
| Data       | Bancada     | D (m) | Q (kg) | Vp (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) | Ponto de medição | Rocha<br>desmontada (t) |
|------------|-------------|-------|--------|-----------|---------------------------|------------------|-------------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 605   | 98,00  | 2,54      | 61,11                     | 2                | 18.833                  |
| 11/11/2020 | 707 norte2  | 775   | 108,00 | 3,36      | 74,57                     | 2                | 13.163                  |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 600   | 100,00 | 4,19      | 60,00                     | 2                | 20.716                  |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 825   | 122,00 | 0,13      | 74,69                     | 2                | 16.429                  |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 920   | 102,00 | 1,48      | 91,09                     | 2                | 11.480                  |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 540   | 104,00 | 1,48      | 52,95                     | 2                | 11.340                  |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 455   | 120,00 | 2,14      | 41,54                     | 2                | 5.796                   |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 770   | 33,00  | 0,44      | 134,04                    | 2                | 15.380                  |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 433   | 16,00  | 0,51      | 108,13                    | 2                | 6.531                   |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 770   | 121,00 | 2,03      | 70,00                     | 2                | 23.684                  |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 410   | 79,00  | 6,54      | 46,13                     | 2                | 17.223                  |
| 25/01/2021 | 791 Sul     | 417   | 11,25  | 6,54      | 124,33                    | 2                | 1.426                   |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 530   | 118,00 | 6,02      | 48,79                     | 2                | 18.205                  |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 450   | 78,00  | 5,94      | 50,95                     | 2                | 9.729                   |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 400   | 119,00 | 4,57      | 36,67                     | 2                | 11.510                  |
| 18/02/2021 | 793 Leste   | 400   | 126,00 | 0,19      | 35,63                     | 2                | 9.572                   |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 425   | 21,40  | 3,62      | 91,87                     | 1                | 4.388                   |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 500   | 39,28  | 1,40      | 79,78                     | 1                | 5.670                   |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 448   | 132,00 | 4,73      | 38,95                     | 1                | 33.499                  |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 590   | 86,80  | 5,27      | 63,33                     | 1                | 28.401                  |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 1.023 | 117,00 | 0,88      | 94,58                     | 1                | 10.383                  |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 595   | 117,00 | 2,36      | 55,01                     | 1                | 14.467                  |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 564   | 77,00  | 4,21      | 64,27                     | 1                | 8.317                   |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1.030 | 111,00 | 1,82      | 97,76                     | 1                | 17.982                  |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 819   | 107,00 | 1,60      | 79,18                     | 1                | 20.894                  |
| 03/05/2021 | 781 leste   | 500   | 57,00  | 1,55      | 66,23                     | 1                | 1.729                   |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1.043 | 121,00 | 1,20      | 94,82                     | 1                | 21.050                  |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 796   | 43,00  | 0,16      | 121,39                    | 1                | 4.871                   |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 552   | 82,00  | 1,79      | 60,96                     | 1                | 7.241                   |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 1.050 | 130,00 | 0,88      | 92,09                     | 1                | 9.131                   |
| 07/06/2021 | 696 sul     | 708   | 4,50   | 0,19      | 333,75                    | 1                | 1.555                   |
| 07/06/2021 | 714 norte   | 1.020 | 18,00  | 0,19      | 240,42                    | 1                | 1.960                   |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 1.000 | 110,00 | 0,19      | 95,35                     | 1                | 17.233                  |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 473   | 108,00 | 3,19      | 45,51                     | 1                | 16.149                  |
| 11/06/2021 | 781 leste   | 473   | 3,50   | 1,53      | 252,83                    | 1                | 670                     |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 500   | 83,00  | 3,81      | 54,88                     | 1                | 15.400                  |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 880   | 45,00  | 0,08      | 131,18                    | 1                | 5.982                   |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 557   | 104,52 | 2,44      | 54,48                     | 1                | 7.634                   |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

No gráfico 2 é apresentado a equação carga-distância para os dados apresentados na tabela 4, medidos nos pontos 1 e 2.



Gráfico 2 – Equação carga-distância para os dados medidos nos pontos 1 e 2.



Fonte: Elaboração própria.

A equação carga-distância para o modelo é:

$$V_p = 384,31 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,29} \quad (10)$$

Onde:

$V_p$ : velocidade máxima da partícula (mm/s).

$D$ : distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

$Q$ : carga máxima por espera (kg).

Por ser elaborada apenas para uma direção, a equação carga-distância apresenta melhor ajuste entre os dados quando comparado ao modelo que incluía todos os dados. No entanto, ainda assim, um coeficiente de determinação de 0,219 é um valor baixo para transmitir confiabilidade entre os dados e o modelo. Uma das principais razões para o baixo ajuste é a grande distância entre o desmonte e a medição. Além disso, não ocorre grande variação entre as distâncias das medições, fazendo com que ocorra a concentração dos pontos, desfavorecendo um melhor coeficiente de determinação.

A seguir são apresentados alguns modelos de equação carga-distância para a direção sudeste, levando em conta algumas considerações.

A análise dos dados da tabela 4 permite identificar desmontes secundários. O indicativo dos desmontes secundários é a pequena quantidade de material desmontado. A vibração causada por desmontes secundários, por não estarem confinados no maciço, possuem um padrão de vibração diferente. Além disso foi relatado em conversa com o técnico da pedreira que o monitoramento da vibração do terreno nos desmontes secundários nem sempre era realizado corretamente, assim os valores podem não ser reais. Portanto, as medições referentes aos desmontes secundários serão desconsiderados. Os desmontes considerados secundários estão marcados em azul na tabela 5.

Tabela 5 – Dados medidos nos pontos 1 e 2 com destaque para os desmontes secundário.

| Data       | Bancada     | D (m)   | Q (kg)        | Vp (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) | Ponto de medição | Rocha desmontada (t) |
|------------|-------------|---------|---------------|-----------|---------------------------|------------------|----------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 605,00  | <b>98,00</b>  | 2,54      | 61,11                     | 1                | 18.833               |
| 11/11/2020 | 707 norte2  | 775,00  | <b>108,00</b> | 3,36      | 74,57                     | 1                | 13.163               |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 600,00  | <b>100,00</b> | 4,19      | 60,00                     | 1                | 20.716               |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 825,00  | <b>122,00</b> | 0,13      | 74,69                     | 1                | 16.429               |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 920,00  | <b>102,00</b> | 1,48      | 91,09                     | 1                | 11.480               |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 540,00  | <b>104,00</b> | 1,48      | 52,95                     | 1                | 11.340               |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 455,00  | <b>120,00</b> | 2,14      | 41,54                     | 1                | 5.796                |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 770,00  | <b>33,00</b>  | 0,44      | 134,04                    | 1                | 15.380               |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 432,50  | <b>16,00</b>  | 0,51      | 108,13                    | 1                | 6.531                |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 770,00  | 121,00        | 2,03      | 70,00                     | 1                | 23.684               |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 410,00  | 79,00         | 6,54      | 46,13                     | 1                | 17.223               |
| 25/01/2021 | 791 Sul     | 417,00  | 11,25         | 6,54      | 124,33                    | 1                | 1.426                |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 530,00  | 118,00        | 6,02      | 48,79                     | 1                | 18.205               |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 450,00  | 78,00         | 5,94      | 50,95                     | 1                | 9.729                |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 400,00  | 119,00        | 4,57      | 36,67                     | 1                | 11.510               |
| 18/02/2021 | 793 Leste   | 400,00  | 126,00        | 0,19      | 35,63                     | 1                | 9.572                |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 425,00  | 21,40         | 3,62      | 91,87                     | 2                | 4.388                |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 500,00  | 39,28         | 1,40      | 79,78                     | 2                | 5.670                |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 447,50  | 132,00        | 4,73      | 38,95                     | 2                | 33.499               |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 590,00  | 86,80         | 5,27      | 63,33                     | 2                | 28.401               |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 1023,00 | 117,00        | 0,88      | 94,58                     | 2                | 10.383               |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 595,00  | 117,00        | 2,36      | 55,01                     | 2                | 14.467               |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 564,00  | 77,00         | 4,21      | 64,27                     | 2                | 8.317                |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1030,00 | 111,00        | 1,82      | 97,76                     | 2                | 17.982               |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 819,00  | 107,00        | 1,60      | 79,18                     | 2                | 20.894               |
| 03/05/2021 | 781 leste   | 500,00  | 57,00         | 1,55      | 66,23                     | 2                | 1.729                |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1043,00 | 121,00        | 1,20      | 94,82                     | 2                | 21.050               |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 796,00  | 43,00         | 0,16      | 121,39                    | 2                | 4.871                |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 552,00  | 82,00         | 1,79      | 60,96                     | 2                | 7.241                |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 1050,00 | 130,00        | 0,88      | 92,09                     | 2                | 9.131                |
| 07/06/2021 | 696 sul     | 708,00  | 4,50          | 0,19      | 333,75                    | 2                | 1.555                |
| 07/06/2021 | 714 norte   | 1020,00 | 18,00         | 0,19      | 240,42                    | 2                | 1.960                |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 1000,00 | 110,00        | 0,19      | 95,35                     | 2                | 17.233               |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 473,00  | 108,00        | 3,19      | 45,51                     | 2                | 16.149               |
| 11/06/2021 | 781 leste   | 473,00  | 3,50          | 1,53      | 252,83                    | 2                | 670                  |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 500,00  | 83,00         | 3,81      | 54,88                     | 2                | 15.400               |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 880,00  | 45,00         | 0,08      | 131,18                    | 2                | 5.982                |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 557,00  | 104,52        | 2,44      | 54,48                     | 2                | 7.634                |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

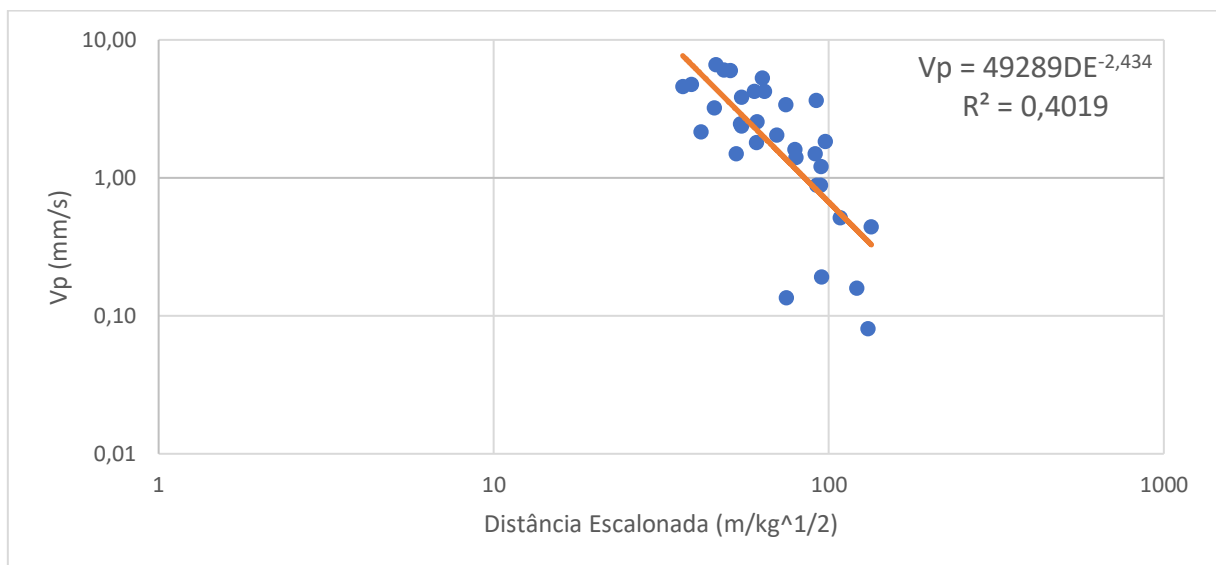
O desmonte do dia 18/02/21 na bancada 793 Leste, marcado em verde na tabela 5, possui valor muito disperso do restante das medições. Existem duas possíveis explicações para esse ponto. A primeira é que o ponto seja um “hotspot”, ou seja, uma anomalia associada à geologia local ou à uma estrutura, como uma laje solta, por

exemplo. A segunda explicação está relacionada com a elaboração do material fornecido pela pedreira, que foi digitado manualmente segundo as informações dos relatórios do sismógrafo, e, portanto, pode ter ocorrido erro ao digitar o valor da medição.

De toda forma, para melhor elaboração do modelo o ponto será desconsiderado.

O gráfico 3 apresenta a equação carga-distância para o modelo com os dados obtidos pela medição nos pontos 1 e 2, sem os desmontes secundários e sem o ponto considerado disperso em relação aos demais.

Gráfico 3 – Equação carga-distância para medição nos pontos 1 e 2, sem desmontes secundários e sem o ponto considerado disperso.



Fonte: Elaboração própria.

Esse modelo já apresenta melhora significativa no ajuste entre os dados, indicando que os pontos desconsiderados podem ser de pontos que não representavam o padrão de vibração para a direção. A equação carga-distância para o modelo baseado na tabela 5 é:

$$V_p = 49289 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2,434} \quad (11)$$

Onde:

$V_p$ : velocidade máxima da partícula (mm/s).

$D$ : distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

Q: carga máxima por espera (kg).

Em visita à pedreira, o técnico responsável pela montagem do plano de fogo e elaboração dos dados fornecidos para a realização deste trabalho informou que considerava como carga máxima por espera apenas as cargas dos furos com exatamente o mesmo tempo de detonação. Se considerarmos o tempo menor que 5 ms entre a detonação de dois furos como sendo simultânea, e considerando que na pedreira são utilizados apenas os retardos de 17 ms, 25 ms e 42 ms, existe a possibilidade de a carga máxima por espera ser maior do que o apresentado nos dados fornecidos pela pedreira.

Assim, para alguns pontos, foram elaborados modelos considerando a carga máxima por espera como sendo o dobro do apresentado originalmente nos dados fornecidos pela pedreira.

Na tabela 6, já foram retirados os dados destacados na tabela 5. Para velocidade máxima da partícula maior do que 5 mm/s, foi considerado que possuía o dobro de carga máxima por espera do que foi originalmente apresentado pela pedreira, estes valores foram marcados em vermelho.

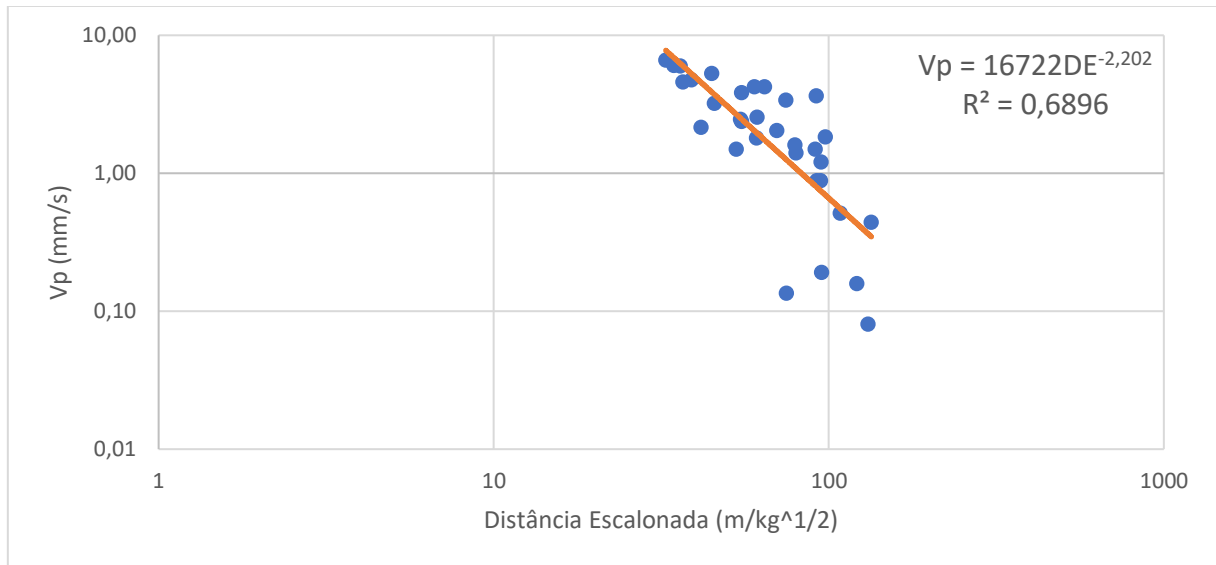
Tabela 6 – Dados medidos nos pontos 1 e 2 considerando o dobro de carga máxima por espera para vibrações maiores que 5 mm/s.

| Data       | Bancada     | D (m)   | Q (kg) | Vp (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) com os dados fornecidos pela pedreira | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) considerando o dobro de carga máxima por espera | Rocha desmontada (t) |
|------------|-------------|---------|--------|-----------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 605,00  | 98,00  | 2,54      | 61,11                                                           | 61,11                                                                     | 18.833               |
| 11/11/2020 | 707 norte2  | 775,00  | 108,00 | 3,36      | 74,57                                                           | 74,57                                                                     | 13.163               |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 600,00  | 100,00 | 4,19      | 60,00                                                           | 60,00                                                                     | 20.716               |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 825,00  | 122,00 | 0,13      | 74,69                                                           | 74,69                                                                     | 16.429               |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 920,00  | 102,00 | 1,48      | 91,09                                                           | 91,09                                                                     | 11.480               |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 540,00  | 104,00 | 1,48      | 52,95                                                           | 52,95                                                                     | 11.340               |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 455,00  | 120,00 | 2,14      | 41,54                                                           | 41,54                                                                     | 5.796                |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 770,00  | 33,00  | 0,44      | 134,04                                                          | 134,04                                                                    | 15.380               |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 432,50  | 16,00  | 0,51      | 108,13                                                          | 108,13                                                                    | 6.531                |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 770,00  | 121,00 | 2,03      | 70,00                                                           | 70,00                                                                     | 23.684               |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 410,00  | 79,00  | 6,54      | 46,13                                                           | 32,62                                                                     | 17.223               |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 530,00  | 118,00 | 6,02      | 48,79                                                           | 34,50                                                                     | 18.205               |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 450,00  | 78,00  | 5,94      | 50,95                                                           | 36,03                                                                     | 9.729                |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 400,00  | 119,00 | 4,57      | 36,67                                                           | 36,67                                                                     | 11.510               |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 425,00  | 21,40  | 3,62      | 91,87                                                           | 91,87                                                                     | 4.388                |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 500,00  | 39,28  | 1,40      | 79,78                                                           | 79,78                                                                     | 5.670                |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 447,50  | 132,00 | 4,73      | 38,95                                                           | 38,95                                                                     | 33.499               |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 590,00  | 86,80  | 5,27      | 63,33                                                           | 44,78                                                                     | 28.401               |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 1023,00 | 117,00 | 0,88      | 94,58                                                           | 94,58                                                                     | 10.383               |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 595,00  | 117,00 | 2,36      | 55,01                                                           | 55,01                                                                     | 14.467               |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 564,00  | 77,00  | 4,21      | 64,27                                                           | 64,27                                                                     | 8.317                |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1030,00 | 111,00 | 1,82      | 97,76                                                           | 97,76                                                                     | 17.982               |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 819,00  | 107,00 | 1,60      | 79,18                                                           | 79,18                                                                     | 20.894               |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1043,00 | 121,00 | 1,20      | 94,82                                                           | 94,82                                                                     | 21.050               |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 796,00  | 43,00  | 0,16      | 121,39                                                          | 121,39                                                                    | 4.871                |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 552,00  | 82,00  | 1,79      | 60,96                                                           | 60,96                                                                     | 7.241                |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 1050,00 | 130,00 | 0,88      | 92,09                                                           | 92,09                                                                     | 9.131                |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 1000,00 | 110,00 | 0,19      | 95,35                                                           | 95,35                                                                     | 17.233               |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 473,00  | 108,00 | 3,19      | 45,51                                                           | 45,51                                                                     | 16.149               |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 500,00  | 83,00  | 3,81      | 54,88                                                           | 54,88                                                                     | 15.400               |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 880,00  | 45,00  | 0,08      | 131,18                                                          | 131,18                                                                    | 5.982                |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 557,00  | 104,52 | 2,44      | 54,48                                                           | 54,48                                                                     | 7.634                |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

Para a nova distância escalonada foi elaborado o modelo de equação carga-distância apresentado no gráfico 4.

Gráfico 4 – Equação carga-distância considerando o dobro de carga máxima por espera para  $V_p$  maiores que 5 mm/s.



Fonte: Elaboração própria.

O modelo apresenta a seguinte equação carga-distância:

$$V_p = 16722\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-2,202} \quad (12)$$

Onde:

$V_p$ : velocidade máxima da partícula (mm/s).

$D$ : distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

$Q$ : carga máxima por espera (kg).

O modelo apresentou grande melhora no valor do coeficiente de determinação. Porém, com base na hipótese de que a carga máxima por espera foi relatada de maneira equivocada, foi elaborado um novo modelo, considerando-se o dobro de carga máxima por espera em mais medições. Os dados em que foi considerado o dobro de carga máxima por espera estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Dados medidos nos pontos 1 e 2 considerando o dobro de carga máxima por espera.

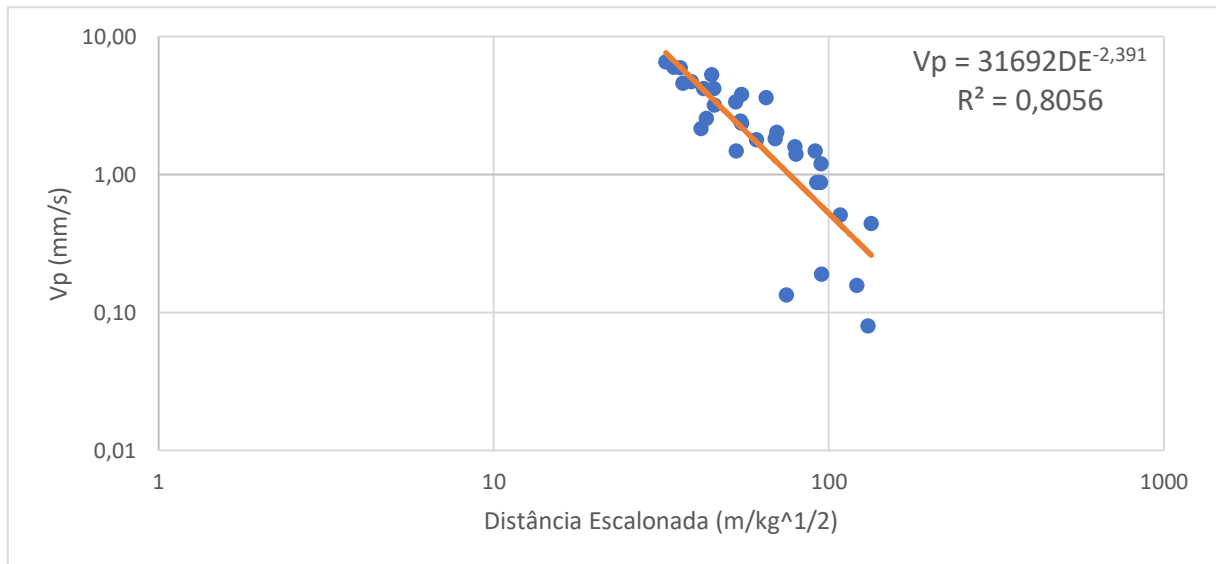
| Data       | Bancada     | D (m)   | Q (kg) | Vp (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> )<br>com os dados<br>fornecidos pela<br>pedreira | DE (m/kg <sup>0,5</sup> )<br>considerando o dobro<br>de carga máxima por<br>espera | Ponto de medição | Rocha<br>desmontada (t) |
|------------|-------------|---------|--------|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|
| 02/10/2020 | 791 sul     | 605,00  | 98,00  | 2,54      | 61,11                                                                    | 43,21                                                                              | 1                | 18.833                  |
| 11/11/2020 | 707 norte 2 | 775,00  | 108,00 | 3,36      | 74,57                                                                    | 52,73                                                                              | 1                | 13.163                  |
| 16/11/2020 | 707 oeste   | 600,00  | 100,00 | 4,19      | 60,00                                                                    | 42,43                                                                              | 1                | 20.716                  |
| 20/11/2020 | 707 sul     | 825,00  | 122,00 | 0,13      | 74,69                                                                    | 74,69                                                                              | 1                | 16.429                  |
| 10/12/2020 | 707 oeste   | 920,00  | 102,00 | 1,48      | 91,09                                                                    | 91,09                                                                              | 1                | 11.480                  |
| 10/12/2020 | 707 leste   | 540,00  | 104,00 | 1,48      | 52,95                                                                    | 52,95                                                                              | 1                | 11.340                  |
| 10/12/2020 | 793 norte   | 455,00  | 120,00 | 2,14      | 41,54                                                                    | 41,54                                                                              | 1                | 5.796                   |
| 17/12/2020 | 707 norte 1 | 770,00  | 33,00  | 0,44      | 134,04                                                                   | 134,04                                                                             | 1                | 15.380                  |
| 17/12/2020 | 791 sul     | 432,50  | 16,00  | 0,51      | 108,13                                                                   | 108,13                                                                             | 1                | 6.531                   |
| 15/01/2021 | 707 Norte   | 770,00  | 121,00 | 2,03      | 70,00                                                                    | 70,00                                                                              | 1                | 23.684                  |
| 25/01/2021 | 783 Sul     | 410,00  | 79,00  | 6,54      | 46,13                                                                    | 32,62                                                                              | 1                | 17.223                  |
| 01/02/2021 | 781 Norte   | 530,00  | 118,00 | 6,02      | 48,79                                                                    | 34,50                                                                              | 1                | 18.205                  |
| 01/02/2021 | 807 Sul     | 450,00  | 78,00  | 5,94      | 50,95                                                                    | 36,03                                                                              | 1                | 9.729                   |
| 18/02/2021 | 707 norte   | 400,00  | 119,00 | 4,57      | 36,67                                                                    | 36,67                                                                              | 1                | 11.510                  |
| 07/01/2021 | 791 Sul     | 425,00  | 21,40  | 3,62      | 91,87                                                                    | 64,96                                                                              | 2                | 4.388                   |
| 07/01/2021 | 707 Norte 2 | 500,00  | 39,28  | 1,40      | 79,78                                                                    | 79,78                                                                              | 2                | 5.670                   |
| 04/03/2021 | 793 sul     | 447,50  | 132,00 | 4,73      | 38,95                                                                    | 38,95                                                                              | 2                | 33.499                  |
| 12/03/2021 | 781 norte   | 590,00  | 86,80  | 5,27      | 63,33                                                                    | 44,78                                                                              | 2                | 28.401                  |
| 24/03/2021 | 707 oeste   | 1023,00 | 117,00 | 0,88      | 94,58                                                                    | 94,58                                                                              | 2                | 10.383                  |
| 08/04/2021 | 781 norte   | 595,00  | 117,00 | 2,36      | 55,01                                                                    | 55,01                                                                              | 2                | 14.467                  |
| 08/04/2021 | 791 sul     | 564,00  | 77,00  | 4,21      | 64,27                                                                    | 45,45                                                                              | 2                | 8.317                   |
| 22/04/2021 | 707 oeste   | 1030,00 | 111,00 | 1,82      | 97,76                                                                    | 69,13                                                                              | 2                | 17.982                  |
| 03/05/2021 | 707 sul     | 819,00  | 107,00 | 1,60      | 79,18                                                                    | 79,18                                                                              | 2                | 20.894                  |
| 17/05/2021 | 707 oeste   | 1043,00 | 121,00 | 1,20      | 94,82                                                                    | 94,82                                                                              | 2                | 21.050                  |
| 28/05/2021 | 696 sul     | 796,00  | 43,00  | 0,16      | 121,39                                                                   | 121,39                                                                             | 2                | 4.871                   |
| 01/06/2021 | 807 leste   | 552,00  | 82,00  | 1,79      | 60,96                                                                    | 60,96                                                                              | 2                | 7.241                   |
| 01/06/2021 | 707 oeste   | 1050,00 | 130,00 | 0,88      | 92,09                                                                    | 92,09                                                                              | 2                | 9.131                   |
| 07/06/2021 | 707 norte   | 1000,00 | 110,00 | 0,19      | 95,35                                                                    | 95,35                                                                              | 2                | 17.233                  |
| 11/06/2021 | 780 leste   | 473,00  | 108,00 | 3,19      | 45,51                                                                    | 45,51                                                                              | 2                | 16.149                  |
| 28/06/2021 | 791 leste   | 500,00  | 83,00  | 3,81      | 54,88                                                                    | 54,88                                                                              | 2                | 15.400                  |
| 06/07/2021 | 696 oeste   | 880,00  | 45,00  | 0,08      | 131,18                                                                   | 131,18                                                                             | 2                | 5.982                   |
| 06/07/2021 | 791 sul     | 557,00  | 104,52 | 2,44      | 54,48                                                                    | 54,48                                                                              | 2                | 7.634                   |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

Com base nos dados da tabela 7, foi elaborado o gráfico 5, com a equação carga-distância.



Gráfico 5 - Equação carga-distância considerando o dobro de carga máxima por espera.



Fonte: Elaboração própria.

O modelo apresenta a seguinte equação carga-distância:

$$V_p = 31692 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2,391} \quad (13)$$

Onde:

$V_p$ : velocidade máxima da partícula (mm/s).

$D$ : distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

$Q$ : carga máxima por espera (kg).

Nota-se que o modelo apresenta bom ajuste com os dados. Entretanto, por ter sido modificado em relação aos dados originais, pode não ser representativo do comportamento da vibração no terreno.

Para comparar o comportamento dos modelos, foi realizada uma simulação para a distância de 550 m, que representa a distância entre a pedreira e a comunidade. Cada modelo será testado em três situações de carga máxima por espera. Na primeira situação, será utilizado 83,50 kg, que representa a média de carga máxima por espera apresentado pela pedreira para os desmontes medidos nos pontos 1 e 2. Na segunda situação, será utilizado 132,00 kg de carga máxima por espera, que é o maior valor apresentado pela pedreira para as medições nos pontos 1 e 2. Para a terceira

situação, baseado na incerteza dos dados fornecidos para a carga máxima por espera, será utilizado 264,00 kg, que é o dobro da carga máxima por espera apresentado pela pedreira. A equação de cada modelo está apresentada na tabela 8.

Tabela 8 – Equação carga-distância para cada modelo.

| Modelo   | Equação                                                | R <sup>2</sup> |
|----------|--------------------------------------------------------|----------------|
| Modelo 1 | $V_p = 27,878\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-0,688}$ | 0,0134         |
| Modelo 2 | $V_p = 384,31\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-1,29}$  | 0,2193         |
| Modelo 3 | $V_p = 49289\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-2,434}$  | 0,4019         |
| Modelo 4 | $V_p = 16722\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-2,202}$  | 0,6896         |
| Modelo 5 | $V_p = 31692\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-2,391}$  | 0,8056         |

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados das simulações estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Simulação da equação carga-distância para os modelos elaborados.

| carga máxima por<br>espera (kg) | Vp (mm/s) |          |          |          |          |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
|                                 | modelo 1  | modelo 2 | modelo 3 | modelo 4 | modelo 5 |
| 83,5                            | 1,66      | 1,95     | 2,30     | 2,02     | 1,76     |
| 132                             | 1,95      | 2,61     | 4,01     | 3,34     | 3,05     |
| 260                             | 2,46      | 4,05     | 9,16     | 7,05     | 6,85     |

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos modelos indica que o modelo 3 é o mais restritivo. No modelo 1, era esperado que não seguisse o padrão dos demais modelos, por apresentar o comportamento para várias direções. No modelo 2, com os desmontes secundários, foram observados alguns valores baixos para vibração independente da carga de explosivo utilizada, uma vez que as rochas desmontadas nos desmontes secundários não fazem parte do maciço. Ao ser considerado o dobro de carga máxima por espera nos modelos 4 e 5, seria esperado que apresentassem resultados de vibração menores para a mesma condição de simulação, visto que os modelos consideram que

o valor de vibração foi causado por uma carga de explosivo maior, logo a dispersão da vibração é mais rápida.

Ainda em relação aos modelos, foi realizada a comparação com os modelos apresentados da literatura. Os resultados estão computados na tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo dos modelos elaborados com os modelos da literatura.

| Carga máxima por espera (kg) |                 | 83,5 | 132  | 260  |
|------------------------------|-----------------|------|------|------|
| Vp (mm/s)                    | modelo 1        | 1,66 | 1,95 | 2,46 |
|                              | modelo 2        | 1,95 | 2,61 | 4,05 |
|                              | modelo 3        | 2,30 | 4,01 | 9,16 |
|                              | modelo 4        | 2,02 | 3,34 | 7,05 |
|                              | modelo 5        | 1,76 | 3,05 | 6,85 |
|                              | Tripathy (2002) | 1,29 | 1,78 | 2,85 |
|                              | Scott (1996)    | 1,62 | 2,34 | 4,02 |
|                              | Konya (1995)    | 1,02 | 1,46 | 2,52 |
|                              | Iramina (2002)  | 2,03 | 2,60 | 3,74 |

Fonte: Elaboração própria.

A comparação entre os modelos elaborados e os modelos da literatura mostra que a atenuação da vibração do terreno é menor do que dos outros modelos. Isso pode ocorrer visto que a atenuação da vibração ocorre de forma diferente para cada maciço.

Para a direção norte, que é a outra direção que possui uma comunidade próxima, o controle de vibração é feito no ponto 5. Apesar da proximidade da comunidade, como nunca houve relatos de problemas devido a vibração e por ser uma região de mais difícil acesso para instalação do sismógrafo, poucos monitoramentos foram realizados para essa direção. Ainda assim, vale ressaltar os dados obtidos para a direção, que são apresentadas na tabela 11.

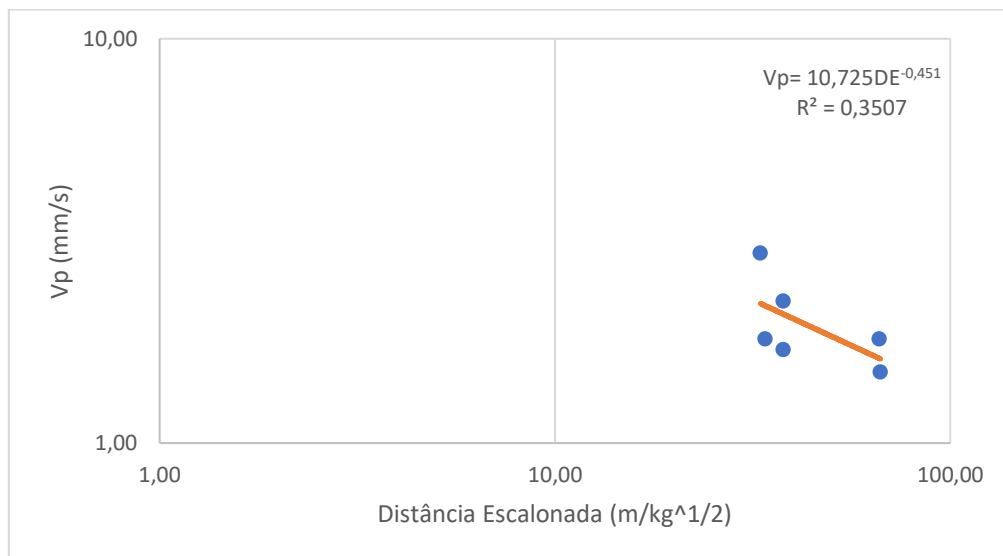
Tabela 11 – Dados medidos no ponto 5.

| Data       | Bancada | D (m)  | Q (kg) | VP (mm/s) | DE (m/kg <sup>0,5</sup> ) | Ponto de medição | Rocha desmontada (t) |
|------------|---------|--------|--------|-----------|---------------------------|------------------|----------------------|
| 19/03/2021 | 707 sul | 400,00 | 112,00 | 2,25      | 37,80                     | 5                | 15.781               |
| 26/03/2021 | 791 sul | 557,00 | 70,00  | 1,50      | 66,57                     | 5                | 15.175               |
| 30/03/2021 | 707 SUL | 392,00 | 133,00 | 1,81      | 33,99                     | 5                | 8.750                |
| 30/03/2021 | 729 SUL | 800,00 | 146,00 | 1,81      | 66,21                     | 5                | 19.555               |
| 27/04/2021 | 707 sul | 400,00 | 146,00 | 2,95      | 33,10                     | 5                | 11.389               |
| 21/05/2021 | 791 sul | 353,00 | 87,00  | 1,70      | 37,85                     | 5                | 13.620               |

Fonte: Modificado de dados fornecidos pela pedreira.

O gráfico 6 apresenta o modelo de equação carga-distância para os dados medidos no ponto 5.

Gráfico 6- Equação carga-distância para as medições no ponto 5.



Fonte: Elaboração própria.

O modelo apresenta a seguinte equação carga-distância:

$$V_p = 10,725 \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-0,451} \quad (14)$$

Onde:

V<sub>p</sub>: velocidade máxima da partícula (mm/s).

D: distância entre a detonação e o ponto de medição (m).

Q: carga máxima por espera (kg).

Como era esperado, o modelo não apresentou resultados confiáveis, visto que foi baseado em poucos dados. Porém, o fato de os monitoramentos realizados não apresentarem valores altos de vibração é um indicativo que, para a direção norte, o maciço possui condições que atenuam mais rapidamente a vibração quando comparado com a direção sudeste. Outro ponto é que as cotas das bancadas detonadas estão próximas do 700 m, enquanto o ponto de medição e a comunidade estão em cotas em torno de 900 m. Isso aumenta a distância entre a detonação e o monitoramento do sismógrafo.

## **6 CONCLUSÃO**

Atualmente uma das únicas formas de controle de vibração é a utilização de um sismógrafo por desmonte. O controle não é efetivo por ser realizado a grandes distâncias do ponto de medição, muitas vezes maiores do que a distância até a comunidade mais próxima. Assim, o controle é utilizado como forma de atendimento às normas técnicas.

A elaboração do relatório de controle de vibração também não é satisfatória, uma vez que a carga máxima por espera nem sempre é registrada corretamente.

Quanto à elaboração da equação carga-distância para a pedreira, os modelos apresentam baixos valores de coeficiente de determinação entre os pontos e a regressão linear, portanto não têm confiabilidade suficiente para a aplicação. Mesmo os modelos 4 e 5, que apresentam melhor ajuste entre os pontos e a regressão linear, podem não ser representativos para o comportamento da vibração, porque possuem grandes incertezas com relação aos dados fornecidos pela pedreira.

Para melhoria do controle de vibração, é possível variar a distância entre o desmonte e o ponto de instalação do sensor. Poderia também serem utilizados mais sismógrafos para o monitoramento de uma mesma detonação. Ao colocá-los em uma mesma direção, com distâncias diferentes, é possível obter dados mais confiáveis para a elaboração do modelo. Seria importante realizar mais medições em todas as direções, para poder compreender o comportamento da vibração no terreno.

Desta forma, foi possível fazer uma análise do controle das vibrações resultantes dos desmontes de uma pedreira situada na Grande São Paulo. Esta análise crítica indicou

algumas deficiências na elaboração de uma equação carga-distância para analisar o comportamento da vibração do terreno de forma confiável. Assim, foram propostas melhorias no procedimento de monitoramento sismográfico e no controle das informações do plano de fogo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2018.

ATAEI, M., SERESHKI, F. **Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm**, Journal of Mining and Environment, v. 8, n. 2, pp. 291–304, 2017.

BACCI, D. C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais**. 2000. 2 v. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, 2000.

BACCI, D. de L. C.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação de métodos estatísticos multivariados na avaliação de vibrações sísmicas**. Geologia USP. Série Científica, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 101-120, 2016. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v16i1p101-120. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/113865>. Acesso em: 01 jul. 2021.

BACCI, D. C.; LANDIM, P. M. B.; ESTON, S. M.; IRAMINA, W. S. **Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte I**. Rev. Esc. Minas 56 (1). Mar 2003.

BRITO, L. A. et al. **Vibração: fonte de incômodo à população e de danos às edificações no meio urbano**. Ambient. constr. 13 (1). Mar 2013.

CANEDO, G. R. **Mapa de iso-velocidades: uma ferramenta para o controle das vibrações nas pedreiras**. Tese (Doutorado). 2013. 164p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). (2015). **Norma D7.013** Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivo na mineração. Norma de Procedimento.

COSTA, J. H. R. **Previsão de vibrações usando redes neurais artificiais no controle de desmonte de rochas**. Tese (Mestrado). 2019. 100p. Universidade federal De Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.

COSTA, L. V.; MATA, J. F. C. **A aplicação da técnica de smooth para o controle de vibrações próximos a áreas urbanas.** Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n.12, p. 97157-97165, dec. 2020.

DALLORA NETO, C. **Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilito posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para minimização de impactos ambientais.** 2004, 82 p. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo, 2004.

DINIS DA GAMA, C. **Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos.** In: 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro, Portugal, 16p., 1998.

ESTON, S. M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações.** Tese (Livre Docência). 1998. 125p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

FEHER, J.; CAMBAL, J.; PANDULA, B.; KONDELA, J.; SOFRANKO, M.; MUDARRI, T.; BUCHLA, I. **Research of the Technical Seismicity Due to Blasting Works in Quarries and Their Impact on the Environment and Population.** Appl. Sci. 2021, 11, 2118. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11052118>.

FRANÇA, S. D. **Controle ambiental através do monitoramento sismográfico: caso da mineração de calcário em João Pessoa-PB.** Tese (mestrado). 2017. 105p. Centro de Tecnologia em Geociência da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

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

KONYA, C. J. **Blast design.** Ohio, Intercontinental Development, 1995.

KOPPE, J. C.; SALVADORETTI, P.; MUNARETTI, E.; COSTA, J. F. C. L. **Monitoramento geofísico de desmonte de rocha com utilização de explosivos em condições de risco elevado em zona urbana. Mineração.** Rem: Rev. Esc. Minas 54 (4), Dez 2001.



LOPEZ JIMENO, C.; LOPEZ JIMENO, E.; GARCÍA BERMÚDEZ, P. **Manual de perforación y voladura de rocas**. Madrid, 2003.

OLIVEIRA, C. V. G. et al. **ANÁLISE COMPARATIVA DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO E RUÍDO EM PERÍMETRO URBANO E AMBIENTE DE MINERAÇÃO**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 15, n. 3, p. 264-270, jul./set. 2018.

PENG, K., ZENG, J., ARMAGHANI, D.J. et al. **A Novel Combination of Gradient Boosted Tree and Optimized ANN Models for Forecasting Ground Vibration Due to Quarry Blasting**. Nat Resour Res 30, 4657–4671, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-021-09899-1>

PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering**. Boca Raton: CRC Press, 1994.

PONTES, J. C.; LIMA, V. L.; SILVA, V. P. **Impactos ambientais do desmonte de rocha com uso de explosivos em pedreira de granito de Caicó-RN**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 35, n. 2, p.267-276, 2016.

SEN, G. 1995. **Blasting Technology: For Mining and Civil Engineers**. Sydney : University of New South Wales Press Ltd, 154 p. 1995.

SCOTT, A. et. al. **Open pit blast design analysis and optimisation**, 1996.

SILVEIRA, Leandro Geraldo Canaan. **Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do Quadrilátero Ferrífero**. 2017. 137 p. Tese (Mestrado) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

TRIPATHY, G., GUPTA, I. **Prediction of Ground Vibrations due to Construction Blasts in Different Types of Rock**. Rock Mech Rock Engng 35, 195–204, 2002.

ZORZAL, C. B. **Análise dinâmica via MEF das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas**. Tese (mestrado). 2019. 107p. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.