

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/785

## Monitoramento de Vibrações Geradas no Desmonte de Rochas por Explosivos em Barragens e Pilhas de Rejeito de Mineração

Marcelo Lopes Mendes

Engenheiro de Minas, Belo Horizonte, Brasil, marcelo@vibroengenharia.com.br

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

**RESUMO:** As atividades de engenharia que envolvem o uso de explosivos industriais devem ser rigorosamente controladas, principalmente no desmonte de rochas convencionais, seja na construção civil ou mineração. Esse controle visa a prevenção de danos estruturais e/ou estéticos em edificações localizadas nas proximidades (casas, edificações históricas, etc.). Também devem ser controlados outros impactos ambientais inerentes à atividade de mineração, como: propagação de ruídos e sobrepressão acústica atmosférica entre outros. Neste contexto destaca-se o objetivo geral do artigo que buscou avaliar o armazenamento e utilização de explosivos. Além disso, buscou-se a análise dos resultados de um conjunto de medições sismográficas que foram executados em 2019 em mineração subterrânea, localizada na região noroeste de Minas Gerais, junto às frentes de produção e desenvolvimento da lavra subterrânea executada com operação unitária de desmonte de rochas por explosivos. Como metodologia, foi realizada uma pesquisa documental, assim como estudos de caso, produzindo uma revisão de literatura com abordagem qualitativa-quantitativa e exploratória. Foi verificado durante o trabalho que é primordial a realização de uma análise técnica rigorosa com avaliação dos níveis de vibração no maciço rochoso geradas na operação unitária de desmonte de rochas por explosivos e/ou em eventual detonação acidental de explosivos armazenados. Esse monitoramento se mostra eficaz na avaliação e potencial do dano em estruturas físicas de barramento (barragem de rejeitos de mineração) existente no entorno da área de mineração, evitando assim danos diretos às estruturas, ou mesmo, gerando gatilhos para eventos de colapso global destas estruturas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragem de Mineração, Monitoramento Sismográfico, Desmonte de Rochas por Explosivos.

**ABSTRACT:** Engineering activities that involve the use of industrial explosives must be strictly controlled, especially when dismantling conventional rocks, whether in civil construction or mining. This control aims to prevent structural and/or aesthetic damage to buildings located nearby (houses, historic buildings, etc.). Other environmental impacts inherent to mining activities must also be controlled, such as: noise propagation and atmospheric acoustic overpressure, among others. In this context, the general objective of the article stands out, which sought to evaluate the storage and use of explosives. Furthermore, we sought to analyze the results of a set of seismographic measurements that were carried out in 2019 in underground mining, located in the northwest region of Minas Gerais, next to the production and development fronts of underground mining carried out with a unitary dismantling operation. rocks by explosives. As a methodology, documentary research was carried out, as well as case studies, producing a literature review with a qualitative-quantitative and exploratory approach. It was verified during the work that it is essential to carry out a rigorous technical analysis with evaluation of the vibration levels in the rock mass generated in the unitary operation of dismantling rocks using explosives and/or in the eventual accidental detonation of stored explosives. This monitoring proves to be effective in evaluating the potential for damage to physical dam structures (mining tailings dam) existing around the mining area, thus avoiding direct damage to the structures, or even generating triggers for global collapse events of these structures.

**KEYWORDS:** Dam Mining, Seismographic Monitoring, Rock Blast.

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades de monitoramento sísmográfico em barragens e pilhas de rejeito de mineração são regidas por normas técnicas que sugerem parâmetros de medição e limites definidos na avaliação de prováveis danos. No caso específico do desmonte de rochas por explosivos em mineração a velocidade de vibração de partícula ( $V_p$ ), expressa em mm/s, é o parâmetro que tem dado melhor correlação na avaliação de possíveis danos às estruturas atribuídos às vibrações do terreno (MELLO, 2011).

A construção de uma barragem é uma tarefa que na fase de projeto obriga a tomada de decisão quanto ao tipo de barragem a ser projetada, sendo sua escolha essencialmente dependente de fatores geológicos, morfológicos, finalidade da estrutura, fatores de segurança e o fator econômico. Em seguida, faz-se uma reflexão não exaustiva sobre os tipos de barragens existentes distinguindo as barragens rígidas, as não rígidas ou de aterro (ALMEIDA, 2015).

O aumento do número de acidentes em barragens, tornou crescente a preocupação com a segurança deste tipo de estrutura. Acidentes com barragens causam problemas em larga escala e quase sempre catastróficos, haja vista que a falha destas estruturas pode deixar áreas inundadas, leitos d'água contaminados, plantações dizimadas e causar mortes de populações e animais (COSTA, 2012).

No Brasil, como forma de minimizar o risco de uma barragem e identificar possíveis problemas, são realizadas inspeções periódicas para identificação de anomalias no barramento e suas estruturas auxiliares e uso de tecnologias que possibilitam conhecer a estrutura internamente seguindo a legislação da Lei Federal nº 12.334/2010 (Política nacional de Segurança de Barragens). Com base nas inspeções e nos dados obtidos com os equipamentos, é realizada a avaliação de risco da barragem, de modo a ser o principal instrumento para a prevenção de possíveis acidentes (BRASIL, 2010).

Neste contexto destaca-se o objetivo geral: avaliar o armazenamento e utilização de explosivos na operação unitária de mineração, assim como a análise dos resultados de um conjunto de medições sísmográficas que foram executadas no ano de 2019 em empresa conceituada do setor de mineração, em suas frentes de lavra subterrânea com operação de desmonte de rochas por explosivos.

Os objetivos específicos foram: entender os diferentes tipos de barragens e suas principais características; mostrar as consequências da falta de monitoramento das barragens e seus impactos ambientais e sociais; aplicar a norma brasileira ABNT/NBR 9653:2018 que regulamenta a aplicação de explosivos atrelada ao controle de vibração no Brasil; avaliar algumas tecnologias utilizadas para o monitoramento de barragem; caracterizar a aplicação dos sísmógrafos, assim como o levantamento de dados em uma barragem, mostrando os relatórios gerados e suas conclusões.

## 2 METODOLOGIA

Para avaliar danos decorrentes de detonações acidentais de explosivos em paióis de superfície e subterrâneos, bem como diretamente nas operações de mineração convencional, uma metodologia técnica específica foi empregada, seguindo os parâmetros das normas atuais, incluindo a Norma ABNT NBR 9653:2018, onde os pontos de captação de dados foram determinados entre os pontos de detonação e as estruturas mais próximas à área de mineração, incluindo a barragem de rejeitos, com o geofone (sensor) do sísmógrafo fixado diretamente no terreno, ou diretamente no concreto das próprias estruturas usando-se gesso de secagem rápida.

As medições sísmográficas foram realizadas com sísmógrafos de engenharia devidamente calibrados em conformidade com a norma pertinente, com a seguinte configuração padrão de disparo (trigger):

- $V_p > 0,254$  mm/s
- Pressão Acústica  $> 100$  dB (Mínimo)

Para vibrações inferiores aos valores de configuração de disparo foram atribuídos para efeito de cadastro os valores  $< 0,254$  mm/s e  $< 100$  dB.

As principais referências Normativas utilizadas foram as normas ANBT NBR 9653:2018 e ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 - Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. A seguir são apresentados conceitos que visam descrever as etapas realizadas para avaliação e controle da detonação.

## 2.1 Metodologia para Avaliação e Controle de Detonação

Um evento de detonação de explosivos é uma forma de emprego de energia pouco eficiente, uma vez que parte da energia é liberada ao meio ambiente, propagando-se através do maciço rochoso e do ar na forma de ondas, ruído e calor. A rocha não é um meio isotrópico, logo cada situação encontrada terá uma propagação de onda diferente, devido à direção e mergulho de foliações e acamamentos, distâncias entre planos de fraqueza, descontinuidades e flutuações no nível do lençol freático, além de parâmetros do próprio plano de fogo como desempenho do explosivo, acoplamento explosivo-rocha, intervalos de iniciação, entre outros.

Quando uma carga explosiva é detonada, sua energia potencial é liberada num intervalo de tempo muito curto, provocando uma onda de choque que é utilizada no trabalho de fragmentação da rocha, e podem ser captadas e registradas por instrumentos específicos, como os sismógrafos de engenharia.

A vibração pode ser descrita matematicamente como o modo com que um corpo ou partícula se move em determinado intervalo de tempo. Pode-se dizer que um corpo vibra quando descreve um movimento oscilatório em relação a um corpo de referência. O número de vezes que um ciclo do movimento se completa no período de um segundo é chamado de Frequência, medido em hertz (Hz). O movimento pode constituir-se em um único componente, ocorrendo numa única frequência, ou em vários componentes que ocorrem em frequências diferentes, simultaneamente.

O comportamento vibratório de um sistema pode ser estudado comparando-se as amplitudes de vibração em cada frequência. A Análise de frequência consiste na subdivisão de sinais de vibração em elementos individuais de frequência e é considerada base para o diagnóstico da vibração.

## 2.2 Parâmetros de Ação e Controle

No entorno da área de detonação, a energia transmitida ao maciço rochoso é captada na forma de uma vibração do terreno, que corresponde à passagem, através dos materiais (solo/rocha), de ondas sísmicas cuja frente se desloca radialmente a partir do ponto de detonação. Estas ondas produzem um movimento de partículas nos materiais.

Os parâmetros de medição da vibração mais utilizados compreendem a velocidade, a aceleração e o deslocamento da partícula no terreno, juntamente com sua respectiva frequência.

### a) Velocidade de Vibração de Partícula

As vibrações do terreno são medidas através da Velocidade de Vibração de Partícula de Pico – PPV (peak particle velocity) expresso em mm/s. Este número é o valor máximo instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo, considerado como sendo o maior valor dentre os valores de pico das componentes de velocidade de vibração de partícula é o máximo valor de qualquer uma das três componentes ortogonais de velocidade de vibração de partícula medido durante um dado intervalo de tempo.

A vibração no terreno está condicionada às características das ondas sísmicas geradas, assim como das características do meio, onde o uso de modelos empíricos que relacionam velocidade de vibração de partícula, distância e a carga explosiva máxima por espera, são suficientes para uma aplicação prática. Atualmente são utilizadas as Equações 1 e 2, denominadas "equações de propagação", cujas formas são atualmente, a mais utilizada na previsão de possíveis danos estruturais.

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

(usada quando a carga de explosivo apresenta o comportamento de uma carga cilíndrica)

$$V_p = k \left( \frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right) \quad (2)$$

(usada quando a carga de explosivo apresenta o comportamento de uma carga esférica)

Onde:

V.P.: Velocidade de vibração de partículas, expressa em mm/s;

D: Distância entre a fonte e o ponto de captação, expressa em metros;

Q: Carga explosiva máxima por espera, expressa em quilogramas;

k e b: São coeficientes numéricos inerentes à geometria do plano de fogo e características do terreno, sendo determinadas estatisticamente.

A expressão  $(D/\sqrt{Q})$  é chamada de distância escalonada, sendo é usada por alguns autores e órgãos norte-americanos como uma forma de se estimar a possibilidade de ocorrência de danos em uma detonação. A partir da Equação 3 considera-se, assim, que uma detonação seria segura se:

$$DE = \left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right) \geq 22,6 \quad (3)$$

A correta determinação dos coeficientes das equações anteriores para um determinado local, só é possível através da realização de medições sismográficas.

#### b) Frequência Predominante

A onda vibratória é um sinal transiente. Existem amplitudes diferentes de zero, relativas a determinadas frequências que são inexistentes sob o ponto de vista da resposta estrutural, mas que devem estar presentes para produzir corretamente a onda verdadeira. Não há frequência única que descreva a vibração na sua totalidade, sendo a Análise de Fourier (através de FFT) a mais usada para decompor o sinal em um espectro de frequências. Se uma das frequências for escolhida como a frequência dominante em relação as demais, uma avaliação equivocada do potencial de dano ou incômodo pode ser realizada. Para evitar este tipo de problema e simplificar os cálculos, usa-se como parâmetro de medição da frequência das vibrações a chamada “Zero-crossing Frequency” (ZC).

Os desmontes de rochas por explosivos apresentam vibrações complexas, com sobreposição de ondas, tendo-se, portanto, diversas frequências associadas aos diversos componentes. No entanto, essas frequências são normalmente elevadas e de curta duração, o que faz com que os atuais sismógrafos de engenharia, em geral, possam ser utilizados para o monitoramento da maioria dos eventos.

A frequência predominante é considerada na avaliação de possíveis danos estruturais, indicando, juntamente com a velocidade de partícula, se a estrutura corre algum risco de sofrer danos associados a um evento desta magnitude em função da possibilidade de ocorrência do fenômeno de ressonância, provocado pela coincidência da frequência predominante do evento com a frequência natural ou própria da estrutura.

#### c) Sobrepressão Acústica

A sobrepressão acústica é a propagação de uma onda elástica no ar, onde as partículas da onda vibram em torno de uma posição de equilíbrio. Durante a passagem da onda aérea as partículas de ar oscilam ao redor da posição de equilíbrio. A pressão acústica pode ter sua energia distribuída ao longo do espectro de frequência de muitos modos. A parte que estiver entre 20 e 20.000 Hz ou acima de 20.000 Hz são denominadas respectivamente de infrassons e ultrassons.

O ruído é um som desagradável, definido segundo algum critério humano. A norma brasileira define ruídos contínuos, intermitentes e impulsivos. O ruído impulsivo é aquele cujo pico energético possui a durabilidade de menos de 1 segundo e está separado do próximo pico em mais de 1 segundo e está separado do próximo pico em mais de 1 segundo. O ruído contínuo é o que não é impulsivo.

Deste modo, uma detonação gera uma pressão acústica com parte não audível e/ou audível. Na parte audível, pode-se ter um ruído impulsivo. Dependendo do tempo e da quantidade de retardos, pode-se ter uma detonação que não seja impulsiva, por prolongar-se por mais de 1 segundo.

A certa distância da detonação, uma grande porção de energia acústica pode estar na faixa de infrassom, que apesar de não poder ser ouvida gera efeitos secundários nas estruturas como o vibrar de janelas e portas. A ausência de som audível pode fazer com que estes efeitos causem surpresa ou alarme nas pessoas, mesmo

estando a pressão acústica razoavelmente baixa, frequentemente confundindo esse tipo de fenômeno com o da vibração transmitido pelo terreno.

#### d) Potencial de Danos nas Estruturas

O Quadro 1 apresenta uma correlação entre valores de velocidade de vibração de partícula e possíveis efeitos e danos em potencial.

Quadro 1. Correlação entre valores de velocidade e danos causados (MEND, 2017 – adaptado).

Vp (mm/s)	Efeito Direto
3 a 5	Vibrações perceptíveis.
10	Dano físico em construções de baixa resistência e edifícios históricos.
33 a 50	Vibrações desagradáveis / desconforto ambiental urbano.
50	Dano físico em construções convencionais (Baixo risco - menor que 5%).
125	Dano físico em construções convencionais (Maior risco - maior que 5%).
230	Danos físicos (rachaduras) em bloco de concreto.
300	Quedas de blocos de concreto em túneis.
1000	Desalinhamento de eixo em bombas e compressores.
1500	Dano em edificações de metal ancoradas sobre sapatas de concreto.
2500	Fragmentação de rocha sã (Fratramento)

Parâmetros de Avaliação Preliminar: na impossibilidade de um estudo matemático aprofundado de correlação de dados para determinação de Carga Máxima por Espera (CME), pode-se utilizar a Equação 4 empírica para estimativa do potencial de danos inerentes ao desmonte.

$$V = K (D/Q^{0.5})^B \quad (4)$$

Onde:

V = Máxima Velocidade de Partícula (mm/s);

K = Coeficiente Numérico Relativo ao Local (Baixo confinamento = 500);

D = Distância da Carga (m);

Q = Carga Instantânea Máxima (Kg);

B = Constante Relativa à Rocha (-1,6).

Vale ressaltar que tal parâmetro de avaliação deve servir como base para estudo mais aprofundado com a geração maciça de dados em campo no sentido de se obter uma curva de atenuação de vibração que forneça a melhor correlação entre vibração, QME (Carga Máxima por Espera) e distância.

### 2.3 Limites Preconizados e Norma de Referência

A norma brasileira que trata da avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos em minerações em áreas urbanas é a Norma ABNT NBR 9653:2018, em sua 3ª Edição. Esta norma estabelece limites máximos para a Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (Vp) e para os níveis de sobrepressão acústica, estabelecendo parâmetros que visam reduzir os riscos para a segurança das populações vizinhas.

A Norma cita:

"Os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações de terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência de vibrações de partícula".

Os limites para a velocidade de vibração de partícula de pico acima dos quais podem ocorrer danos induzidos por vibrações do terreno são apresentados numericamente no Quadro 2.

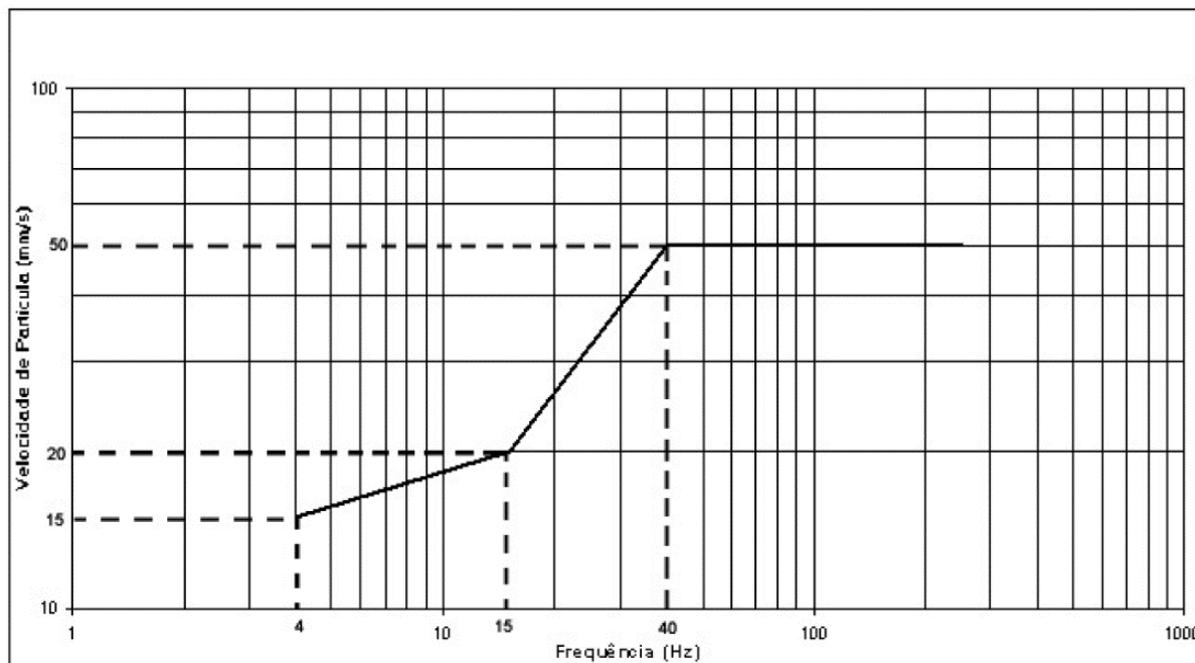
Quadro 2. Limites para velocidade de vibração, Fonte: ABNT 9653,2018.

Faixa de Frequência (Hz)	Limite de Vibração de Partícula de Pico - $V_p$ (mm/s)
4 a 15	Iniciando em 15, aumenta linearmente até 20
15 a 40	Acima de 20, aumenta linearmente até 50
Acima de 40	50

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).

Basicamente a Velocidade de Vibração de Partícula de Pico permitida é de 15 a 20 mm/s para frequências de 4 a 15 Hz e de 20 a 50 mm/s para frequências de 15 a 40 Hz, ou valores acima. Em frequências abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,60 mm (de zero a pico). Na sequência é apresentado na Figura 1 o gráfico da distribuição dos valores de pico de vibração em relação à frequência associada.

Figura 1. Limites de Velocidade de Vibração de Partícula de Pico, Fonte: Norma ABNT NBR 9653:2018



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da campanha de medição sismográfica e análise dos resultados do conjunto de medições sismográficas, apresentadas na Tabela 1, e que foram realizadas em 2019 na área do empreendimento de mineração em questão, em relação às estruturas mais próximas, incluindo as ombreiras da barragem de rejeitos, foi possível estabelecer uma gama de considerações e parâmetros de referência para continuidade nos ensaios correlatos, que poderão até servir como ponto de partida para o estabelecimento de uma norma própria específica.

Tabela 1. Resultados de Medição Sismográfica

Data	Dist. (m)	QME (Kg)	Vpr (mm/s)	Freq. (Hz)	Vpv (mm/s)	Freq. (Hz)	Vpt (mm/s)	Freq. (Hz)	PVS (mm/s)	Aceler. (g's)
08/04	1757	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	4051	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
09/04	1711	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3929	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
09/04	4.803	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	5740	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-

Data	Dist. (m)	QME (Kg)	Vpr (mm/s)	Freq. (Hz)	Vpv (mm/s)	Freq. (Hz)	Vpt (mm/s)	Freq. (Hz)	PVS (mm/s)	Aceler. (g's)
09/04	1737	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	4017	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
10/04	3394	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	5231	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
10/04	844	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	4020	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
11/04	862	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3867	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
11/04	93	08,33	1,02	19,6	1,40	34,1	0,635	102,4	1,40	
	3021	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
11/04	1021	08,33	1,02	19,6	1,40	34,1	0,635	102,4	1,40	0,0530
	3878	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
11/04	490	18,38	0,889	13,1	0,381	32,0	0,762	12,8	0,889	0,0133
	5873	18,38	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
12/04	843	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3876	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
12/04	1553	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3998	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
12/04	175	08,33	0,254	-	0,508	36,5	0,381	46,5	0,508	0,0265
	4026	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
13/04	2010	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3998	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
13/04	1683	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	3960	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
16/04	892	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	468	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
17/04	364	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
	827	08,33	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-	< 0,254	-
17/04	117	08,33	15,2	170,6	9,14	170,6	20,3	170,6	24,1	1,5600
	112	08,33	7,87	170,6	3,81	256,0	8,51	256,0	9,53	0,7550

No estudo em questão envolvendo o monitoramento sismográfico, as medições de vibração realizadas geraram um conjunto de dados, onde foi possível avaliar os resultados de pico de vibração (Vp) mais expressivos, de até 20,3 mm/s, porem com frequência associada significativamente alta, acima de 150 Hz. Portanto, em comparação com valores limites presentes na literatura internacional, assim como os limites das faixas estabelecidas pela Norma ABNT NBR 9653:2018 foi possível concluir que, tais valores de vibração, estariam bastante distantes dos limites de potencial de dano estrutural, ou seja, bastante inferiores a  $V_p = 50$  mm/s, com frequência associada abaixo de 40 Hz. Vale ressaltar que praticamente todos os resultados de vibração da tabela apresentada, onde a fonte geradora se encontrava a distâncias superiores a 120 metros em relação ao ponto de medição, os valores de medição sismográfica geraram resultados abaixo do trigger do sismógrafo,  $V_p < 0,254$  mm/s. Os valores de vibração captados, em relação ao desmonte convencional, foram considerados muito baixos e geralmente associados a frequências relativamente altas, portanto, neste caso específico, não representaram risco de dano físico qualquer às estruturas da Barragem de Rejeitos de Mineração do empreendimento, assim como de qualquer infraestrutura civil localizada na superfície. Para o caso específico, foi recomendado que fossem feitas campanhas periódicas de medição sismográfica para possibilitar a elaboração de um estudo mais completo tendo como base a geração de uma curva de atenuação e aplicação dos critérios internacionais supracitados para garantir a previsibilidade dos níveis de vibração em eventos futuros tipicamente operacionais, em relação direta com a detonação de uma determinada carga de explosivo.

Com relação à possível detonação acidental, tendo em vista os resultados obtidos em superfície na campanha de medição sismográfica, pode-se considerar que as cargas totais detonadas, em um evento acidental, seriam muito inferiores ao das quantidades armazenadas na empresa, da ordem de 0,2% da quantidade total apostilada para armazenamento. Levando-se em consideração uma quantidade de explosivos (aproximadamente 300 kg) a energia transferida ao maciço rochoso em forma de ondas sísmicas transientes

de curta duração seria insuficiente para ocasionar danos às estruturas do barramento em questão e/ou comprometer sua estabilidade, pois a  $V_p$  esperada seria  $< 0,254$  mm/s, tendo em vista a distância.

#### 4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados foi observado que é possível utilizar os sismógrafos de engenharia de maneira mais efetiva para o monitoramento de vibrações em barragens, assim como é possível conhecer o comportamento da estrutura (resposta) e elaborar planos de ações para resolver qualquer possível causa de vibrações excessivas.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos nossas famílias, amigos e mestres, que contribuíram significativamente para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos em especial nosso orientador Márcio Leão, pelos conhecimentos transmitidos e apoio. Gratidão pelas ideias compartilhadas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2018). NBR 9653. *Guia Para Avaliação dos Efeitos Provocados pelo Uso de Explosivos nas Minerações em Área Urbana*.
- Almeida, J. A. S. (2015). *Julgamento de condições de risco de uma barragem de aterro ou enrocamento*. Dissertação (Engenharia Civil). Universidade da Beira Interior. Covilhã.
- Costa, W. D. (2012). *Geologia de barragens*. São Paulo: Oficina de Textos. 352 p.
- Mello, F. M. (2011). *A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. Rio de Janeiro: Corrado Piasentin, p.524.
- MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project (2017). *MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies*. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá.