



# Determinação de raio de influência de detonação em galeria subterrânea da Mina Cuiabá - Análise de vibrações, PPVmin e Curva de Atenuação.

Rafael Soares Pereira

Geotécnico, AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, RSPereira@anglogoldashanti.com.br

João Pedro Alves Fraga

Estagiário de Geotecnica, AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, joaopedrofraga@hotmail.com

**RESUMO:** Para determinação de raio de influência de detonação na oficina em subsolo da mina Cuiabá, o qual definirá a necessidade de evacuação ou não, durante os horários de desmonte de rocha, dos funcionários que nela trabalham, foram utilizadas informações de vibrações captadas pelo sistema microssísmico disponíveis em regiões próximas da galeria, essas foram comparadas com valores teóricos de velocidades de partícula de pico (PPV) que conferem a reativação de fraturas preexistentes no maciço rochoso da área analisada. A partir das curvas de atenuação calibradas para o maciço rochoso da mina Cuiabá estabeleceu-se os raios máximos de influências que garantem a não ocorrência de sismos com PPVs maiores do que aqueles considerados limites. Foi estimado para o maciço rochoso presente na oficina um valor de 59.8 mm/s de PPV capaz de reativar fraturas preexistentes, além disso, foi observado que os valores máximos de PPV obtidos anos de 2017, 18 e 19 são respectivamente 3 mm/s; 3,7 mm/s e 0.1 mm/s. Através da curva de atenuação foi obtido as distâncias escalonadas para cada tipo de desmonte que são: 2.4 m/raiz<sup>3</sup>(kg), 3.6 m/raiz<sup>2</sup>(kg) e 16.1 m/raiz<sup>2</sup>(kg). Esses valores conferem raios de influência que variam de 19m a 73m.

**PALAVRAS-CHAVE:** Curva de Atenuação, Monitoramento Microssísmico, Análise de Vibrações e PPV.

**ABSTRACT:** To determine the area under detonation's influence in a underground workshop in the Cuiabá mine, which is going to define an evacuation need or not during the blasting times, were used the seismic data information captured by the microseismic monitoring system available in the regions close to the gallery, these were compared with theoretical values of peak particle velocity (PPV) that confer a reactivation of preexisting fractures in the rock mass of the analyzed area. From the attenuation curves calibrated for the Cuiabá Mine's rockmass, the maximum area under influence were established that guarantee the non-occurrence of seismic activity with PPVs greater than those limits. It was estimated for the rock mass to present a value of 59.8 mm / s of PPV in the workshop capable of reactivating preexisting fractures. Furthermore in, it was observed that the maximum values of PPV registered in 2017, 18 and 19 are respectively 3 mm / s; 3.7 mm / s and 0.1 mm / s. Through the attenuation curve, the step distances for each type of blasting were reached, which are: 2.4 m / root<sup>3</sup> (kg), 3.6 m / root<sup>2</sup> (kg) and 16.1 m / root<sup>2</sup> (kg). These values give the influenced distances by blasting that vary from 19m to 73m.

**KEYWORDS:** Attenuation Curve, Microseismic Monitoring, Vibration Analysis and PPV.

## 1 Introdução

Em função da crescente demanda de manutenção nos equipamentos pesados da frota da mina Cuiabá em subsolo foi necessário a realização de estudos técnicos que analisou a viabilidade de manutenção de atividades corriqueiras da oficina do nível 11 durante os horários de detonações. Portanto, a partir de análise das vibrações que ocorreram nas regiões de domínio da oficina supracitada foi avaliado tal possibilidade. Abaixo pode ser observado a área definida como área potencial para continuidades das operações durante os horários de “fogo”.

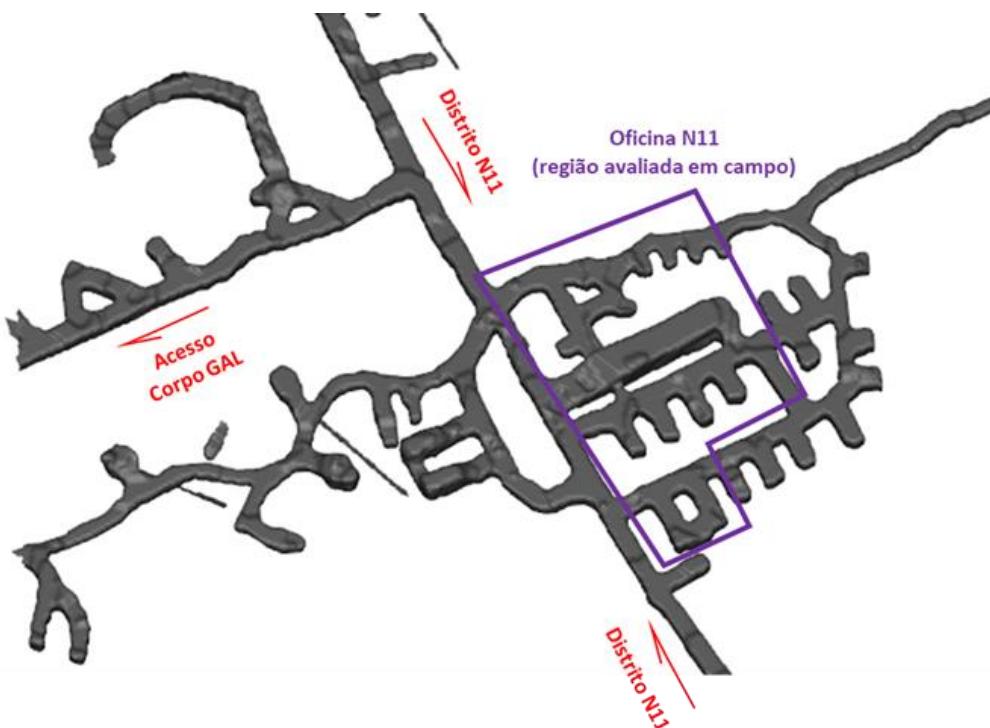


Figura 1. Localização da Oficina do Nível 11.

A segurança e a estabilidade de escavações subterrâneas são fortemente influenciadas por vibrações induzidas por detonações. As ondas geradas por detonações subterrâneas, seja para o avanço de desenvolvimento ou para a produção, se propagam pelo maciço rochoso e refletem na superfície das aberturas criadas pelas galerias. Dessa forma, as vibrações causadas por essas ondas, incidentes e refletidas, podem criar fraturas por acúmulo ou alívio de tensão ou mesmo propagar fraturas preexistentes (Li et al., 2013). Segundo Singh et al. (2015), essas perturbações sísmicas dependem da quantidade de energia liberada pela detonação e da proximidade das galerias do ponto onde ocorreu a explosão. Cardu, Coragliotto, Oreste (2019), levantaram alguns estudos dos últimos 60 anos, sobre as vibrações induzidas por explosivos, e verificaram que a maioria deles sugere que o parâmetro que melhor correlaciona com a energia liberada pela detonação e a variação de tensão observada no maciço rochoso é a velocidade de vibração ou velocidade de partícula de pico (PPV).

Para a condução da análise foram utilizadas informações dos dados sísmicos disponíveis em regiões próximas a área da galeria estuda, que foram captadas pelo sistema de monitoramento microssísmico instalado na mina Cuiabá, essas foram comparadas com valores teóricos de velocidades de partícula de pico (PPV) que conferem a reativação de fraturas preexistentes no maciço rochoso presente na área de estudo. Além dessas informações, foi utilizado também as curvas de atenuação de vibração calibradas para o maciço rochoso da mina Cuiabá (Matos et al., 2019). Ressalta-se que tais curvas foram obtidas a partir de campanhas de instrumentação sismográfica que perfazem medições de detonações de leques de produção de lavra, de slots e de avanços de desenvolvimento. As litologias nas quais as vibrações foram avaliadas e as curvas de atenuação obtidas são as mesmas presentes na oficina do nível 11.

A partir das curvas de atenuação calibradas para o maciço rochoso da mina Cuiabá estabeleceu-se os raios máximos de influências que garantem a não ocorrência de sismos com PPVs maiores do que aqueles considerados limites na presente análise.

## 2 Dados Sísmicos (Sistema Microssísmico)

Desde a implementação do sistema de monitoramento microssísmico, ocorrida no ano de 2015, o número hipocentros registrados na região de domínio da oficina no nível 11 não é significativo. No

entanto, vibrações oriundas de outras regiões da mina, tanto de origem geológicas/naturais como de decorrência de detonações possuem efeitos atenuados na região de análise. Abaixo podem ser observados os hipocentros gravados pelo sistema microssísmico relativamente próximos à escavação analisada.

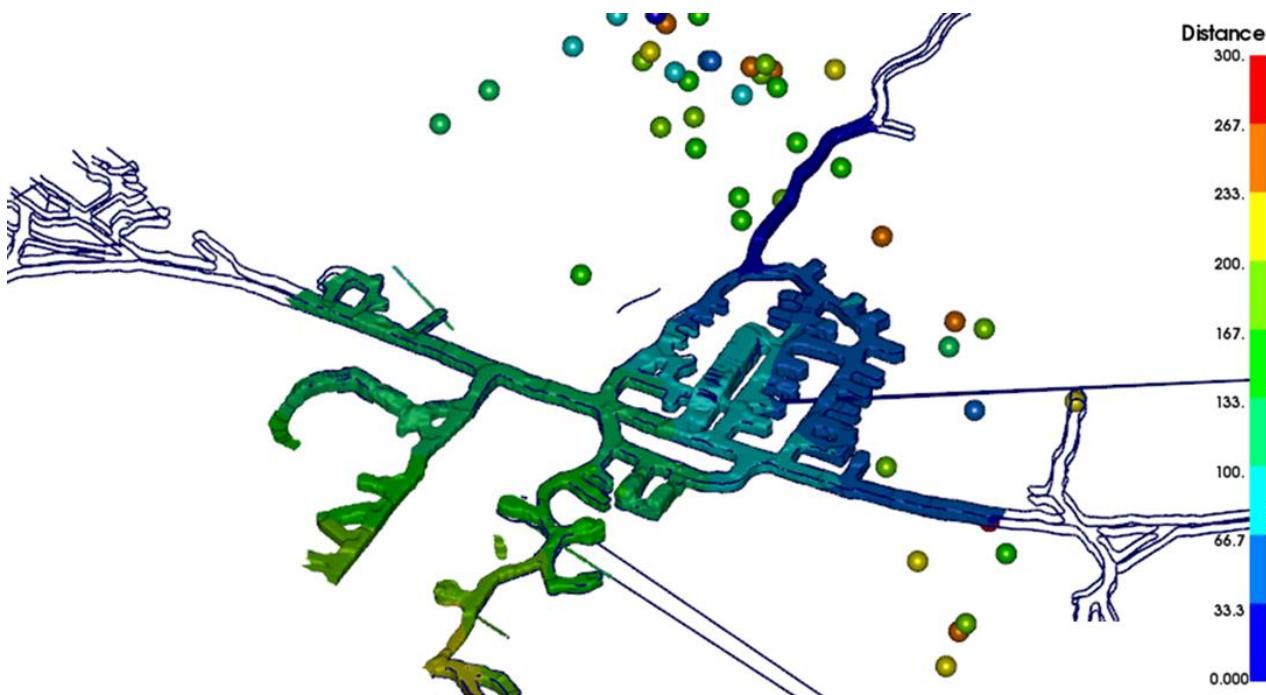


Figura 2. Hipocentros registrados próximos à galeria de análise

### 3 Determinação de PPV mínimo

Para que se possa avaliar a extensão máxima da zona de danos, onde fraturas preexistentes na rocha podem se propagar e dilatar sob a influência de níveis relativamente baixos de vibração, Ryan e Harris (2000) adotaram o critério do CANMET (Calder, 1977), o qual, com as modificações sugeridas por Silva (2004), é expresso pela equação abaixo:

$$PPV_{mín} = \frac{0.021 * σ_1}{V_p * ρ}$$

Onde  $PPV_{mín}$  é a velocidade mínima de partícula causadora de extensão e dilatação de fraturas preexistentes (mm/s),  $V_p$  é a velocidade de propagação da onda primária (m/s),  $σ_1$  é a tensão principal maior na ruptura estimada para rocha intacta (MPa) e  $ρ$  é a densidade da rocha intacta (g/cm³).

A partir da equação observada acima estimou-se para o maciço rochoso presente na oficina do nível 11 um valor de 59.8 mm/s de PPV mín. Portanto, qualquer vibração que possua PPV maiores do que esse, pode conferir ao maciço da oficina do nível 11 elevação do nível de plastificação já observada e consequentemente majoração dos riscos de ocorrência de desarticulações dentro da galeria analisada. Ressalta-se que os parâmetros “inputados” no modelo definido pela equação acima atendem à condição específica do maciço rochoso avaliado.

### 4 PPVs estimados na região da oficina do nível 11

A partir de todos os sismos naturais (não oriundos de detonações) registrados no banco de dados do monitoramento microssísmico foi estimado os valores de PPVs que alcançariam as galerias localizados nas regiões de domínios da oficina do nível 11.

É salientado que os valores de PPVs calculados foram obtidos a partir de função indicada pelo Institute of mine seismology (IMS). Ressalta-se que não foram consideradas nessas análises os efeitos de amplificações de sismos nas bordas das galerias que segundo Zhang et al (2019) podem conferir uma amplificação de até 3.77 a depender das características das ondas e do grau de faturamento do maciço próximo a superfície.

Observa-se a partir da imagem abaixo que a função utilizada para estimação de PPVs, é coerente com os dados medidos. Portanto, entende-se que as estimações de PPVs obtidas para as escavações da oficina do nível 11 é assertiva e confiável para análise executada.

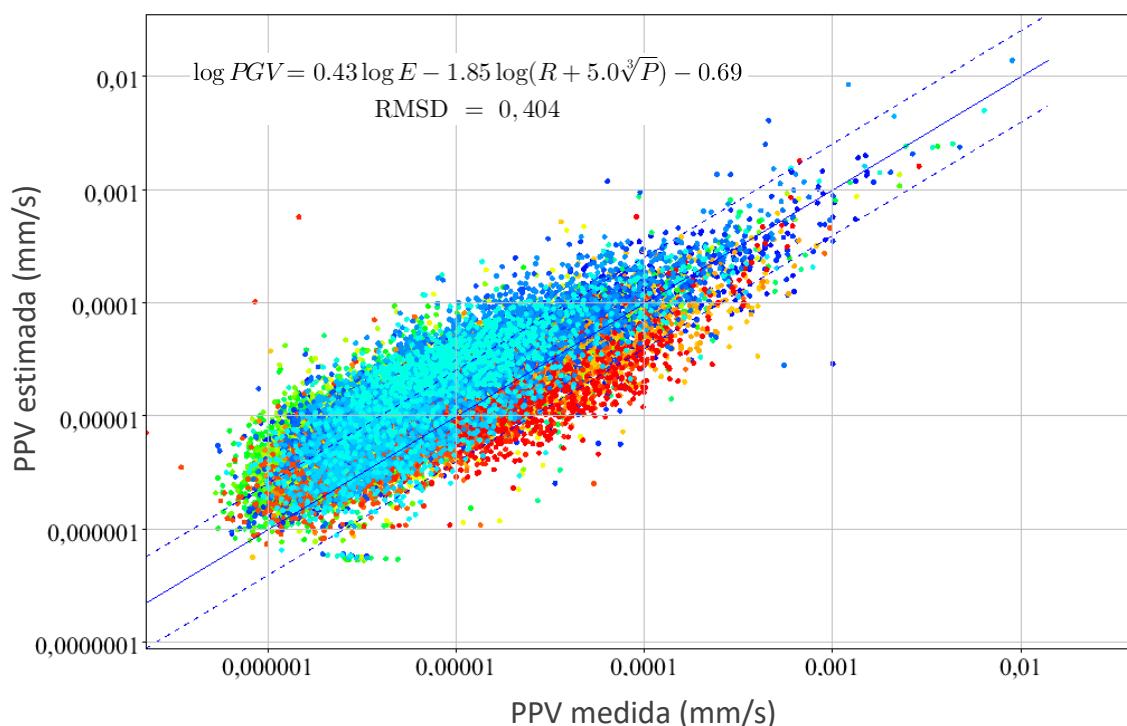


Figura 3. PPV estimada *versus* PPV medida nos pontos de monitoramento da mina.

Para melhor visualização dos valores obtidos de PPVs nas galerias da oficina do N11 a partir da metodologia descrita acima, foram criados mapas de PPV separados nos anos de 2017, 2018 e 2019. Observa-se em escala de cor os valores estimados de PPVs na região de análise.



Figura 4. PPVs estimados – 2017

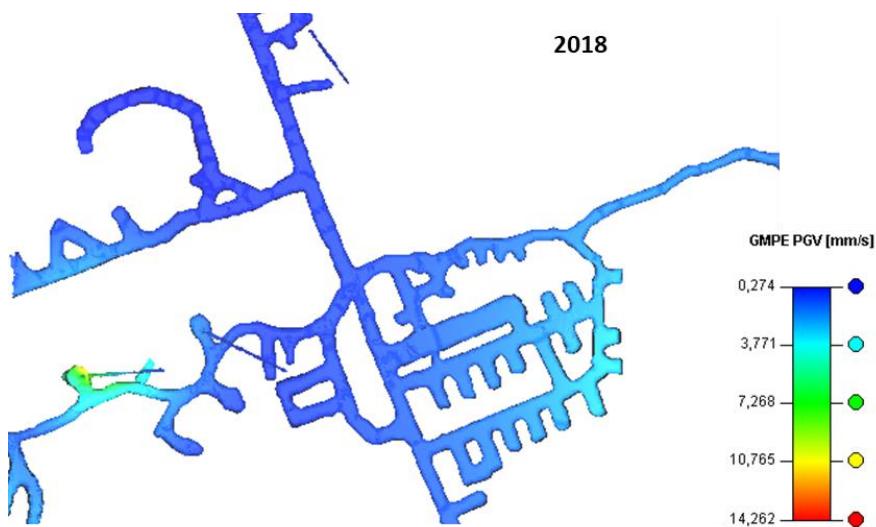


Figura 5. PPVs estimados – 2018

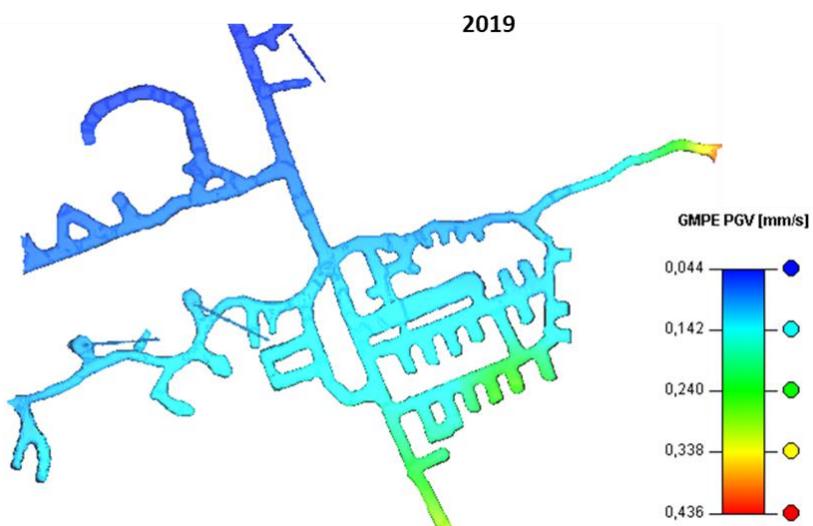


Figura 6. PPVs estimados – 2019



Através da observação das imagens acima é visto que os valores máximos de PPV nos anos de 2017, 18 e 19 são respectivamente 3 mm/s; 3,7 mm/s e 0.1 mm/s. Tais valores não correspondem mais que 7% do valor limite estabelecido para aumento de possibilidade de desarticulações.

## 5 Curva de atenuação (Determinação de raio de influência)

Abaixo podem ser observados as curvas de atenuações obtidas para cada tipo de desmonte praticado (Detonação de Leques de produção, Detonação de face desenvolvimento e detonação de slot). Salienta-se que demais informações do procedimento praticado para obtenção das curvas supracitadas podem ser encontradas em (Matos et al., 2019).

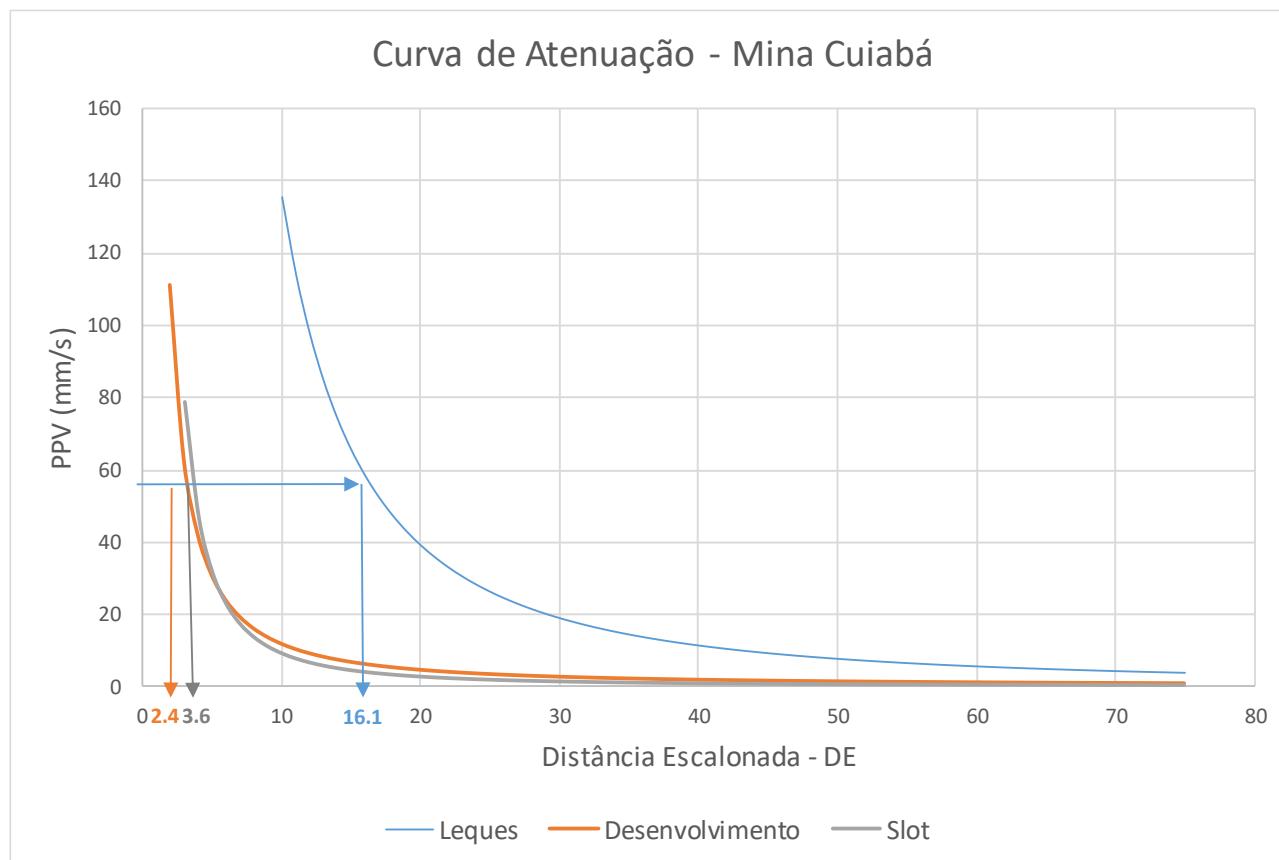


Figura 7. Curvas de atenuação estimada para a mina Cuiabá.

Observa-se na figura acima a indicação de  $PPV_{mín}$  calculado (59.8 mm/s) para o maciço rochoso da mina Cuiabá nos gráficos que contém as curvas de atenuação. É verificado que as distâncias escalonadas para cada tipo de desmonte são  $2.4 \text{ m}/\text{raiz}^3(\text{kg})$ ,  $3.6 \text{ m}/\text{raiz}^2(\text{kg})$  e  $16.1 \text{ m}/\text{raiz}^2(\text{kg})$ . Esses valores conferem raios de influência observados na tabela abaixo:

Tabela 1. Legenda em Times New Roman, tamanho 11.

Detonação	DE	Carga Máxima/espera	Raio de Inflênci(a)m)
Leques	16.1	94.8	73
Desenvolvimento	2.4	60	19
Slot	3.6	52.7	26

Deve-se entender os valores de raio de influência de detonação como distâncias máximas entre a oficina do nível 11 e a área de detonação, onde será possível alcançar vibrações com PPVs maiores que aqueles



estimados como limite na análise proposta (59.8 mm/s). O maior raio de influência obtido foi de 73 m para detonações de leques de produção. Isso se deve ao fato de que para essas detonações utiliza-se uma carga máxima por espera maior. Dessa forma, optou-se por adotar a distância de 73 m como o valor limite para a permanência de colaboradores na oficina do nível 11. O que implica na não permanência dos empregados na oficina caso hajam detonações em distâncias menores do que 73 m. Por fim, ressalta-se que não foram mapeadas estruturas como zonas de dobramento em distância considerável da área de domínio da oficina, caso esses existissem, poderiam implicar em amplificações das vibrações, além de serem condutos preferenciais que possuem maior condutividade sísmica.

## 6 Conclusões

Observa-se que as vibrações históricas naturais que ocorreram na região de domínio da oficina do nível 11, não possuem velocidades de partículas suficientemente grandes para que seja possível o desencadeamento de aberturas de descontinuidades preexistentes no maciço rochoso. Portanto, não há uma majoração do risco de desarticulações.

As detonações que por ventura aconteçam aos arredores da oficina do nível 11 com distâncias menores do que 73 m podem oferecer maiores riscos à condição de estabilidade da galeria estudada. Portanto, caso a mesma ocorra não é recomendado a permanência de empregados em subsolo (Oficina) durante os horários de detonação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALDER, P. *Perimeter blasting*. In: *Pit Slope Manual*. Ottawa: CANMET (Canadá Centre for Mineral and Energy Technology), 1977. Cap. 7, p. 37.
- CARDU, M., CORAGLIOTTO, D., ORESTE, P. *Analysis of predictor equations for determining the blast-induced vibration in rock blasting*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019. VOL 29, p. 905-915.
- LI, J.C., LI, H.B., MA, G.W., ZHOU, Y.X. *Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion*. *Tunnelling and underground space technology*, 2013. VOL 35, p. 227-234.
- MATOS, et al. *Seismic analysis of vibration induced by rock blasting in underground mine*, Foz do Iguaçu, Setembro 2019.
- RYAN, J. M., HARRIS, S. P. *Using state of the art blast modeling software to assist the excavation of the Yucca Mountain nuclear waste repository*. In: *High-Tech Seminar. State-of-the-Art Blasting Technology Instrumentation and Explosives Applications*, 2000. *Proceedings*. Orlando: Blasting Analysis International Inc., 2000. p. 407-423.
- SILVA, J. C. R. M. *As implicações do desmonte com explosivos na estabilidade da rocha remanescente em mina subterrânea*. Ouro Preto: Escola de Minas, UFOP. 2004. p. 52-54. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral).
- SINGH, P.K., ROY, M.P., PASWAN, R.K., DUBEY, R.K., DREBENSTEDT, C. *Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015. VOL 80, p. 79-88.
- ZHANG, P., NORDLUND, E., SWAN, GRAHAN., YI, CHANGPING. *Velocity Amplification of Seismic Waves Through Parallel Fractures Near a Free Surface in Fractured Rock: A Theoretical Study*. *Rock Mechanincs and rock engineering*, 2019. VOL 52, p. 199-213.