

Análise Sísmica de Detonações em Minerações Subterrâneas

Alexandre Assunção Gontijo

MecRoc Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, alexandre.gontijo@mecroc.com.br

Felipe de Brito Pereira

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, fbpereira@anglogoldashanti.com.br

Andre Rezende Rati

NEXA, Vazante/MG, Brasil, andre.rati.ar1@nexaresources.com

Leandro Caio Barbosa Costa

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, lbcosta@anglogoldashanti.com.br

Arthur Resende Matos

MecRoc Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, arthur.matos@mecroc.com.br

Leandro Roque da Fonseca

MecRoc Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil, leandro.fonseca@mecroc.com.br

RESUMO: As vibrações provenientes de um desmonte podem gerar danos catastróficos em áreas próximas e distantes da fonte emissora. Entender o comportamento dessas no maciço rochoso vem sendo um grande desafio enfrentado nas minerações subterrâneas, pois há um número considerável de desmontes que ocorrem diariamente. As vibrações produzidas pela detonação, e o conhecimento das propriedades geomecânicas do maciço rochoso, permitem estimar a probabilidade de ocasionar danos no maciço sobrejacente. Com as informações de velocidade de partícula coletadas pelo geofone, a distância entre a fonte emissora e o ponto monitorado, e a carga máxima de explosivo utilizada, é possível definir a atenuação das ondas no meio, criando assim a curva de atenuação específica. Este trabalho consiste no detalhamento de dois estudos de caso, maciços rochosos de distintas resistências mecânicas e propriedades geomecânica a qual será apresentado desde o plano de monitoramento, metodologia, campanhas de instrumentação em desmontes confinados. Por fim será discutido a curva equivalente de atenuação para as situações apresentadas e uma sugestão de curva genérica mediante a todas informações coletadas.

PALAVRAS-CHAVE: Vibração, Geofone, Detonação, Curva de Atenuação.

1 INTRODUÇÃO

A detonação representa uma das operações unitárias de maior relevância na mineração subterrânea, a qual se busca uma boa fragmentação do material e uma boa aderência ao avanço planejado, sendo esse, em desenvolvimento ou lava.

O monitoramento de vibrações, utilizando

sensores de velocidade (geofones¹), permite vantagens no entendimento em detalhe da detonação, visto a possibilidade de quantificar os níveis de velocidade de partícula que a detonação provoca a partir de uma carga de explosivo conhecida, além de determinar a

¹Geofones são transdutores eletromagnéticos que emitem uma tensão elétrica proporcional à velocidade de partícula da onda; essa tensão é produzida por uma bobina móvel.

eficiência relativa de cada carga, sua interação com as cargas adjacentes e o comportamento geral do plano de fogo com o maciço rochoso (MR).

Desta forma, o monitoramento de vibrações tem sido utilizado como uma ferramenta de diagnóstico do “fogo”, onde uma adequada interpretação do registro de vibrações permite determinar o grau de interação entre as variáveis de uma detonação, possibilitando avaliar as cargas em uma sequência incorreta, dispersão dos tempos de retardos definidos, detonação deficiente em algumas esperas, detonações instantâneas, além de iniciações por simpatia.

As vibrações produzidas pela detonação, onde nesse caso são denominadas PPV (*peak particle velocity*), e o conhecimento das propriedades geomecânicas do MR, permitem estimar a probabilidade de ocasionar danos no maciço sobrejacente. Os altos níveis de vibração ocasionam danos ao MR, produzindo novas fraturas ou reabrindo descontinuidades pré-existentes. A vibração, neste contexto, pode ser considerada como agente causador de um esforço ou deformação no MR (Garrido, A. 2007).

2 OBJETIVOS

Apresentar os resultados sismográficos decorrentes de monitoramentos de detonações confinadas em duas distintas operações mineiras subterrâneas, buscando entender a propagação da vibração nos diferentes MR.

Na mina de Vazante, de propriedade da NEXA, que utiliza como método de lavra VRM (*vertical retreat mining*), o principal objetivo é elaborar uma curva de atenuação no dolomito brechado, enquanto que na mina Córrego do Sítio I (CDS), de propriedade da AngloGold Ashanti, que utiliza *sub-level* como método de lavra principal, o objetivo é definir a curva de atenuação do litotipo Xisto hidrotermalizado.

Os produtos finais do trabalho serão definir uma carga máxima por espera (CME) limite, em uma determinada distância (D), para cada

meio, buscando garantir o menor dano possível nas escavações próximas, ou pilares sobrejacentes.

3 METODOLOGIA

Para as campanhas de monitoramento das detonações foram utilizados sismógrafos de engenharia² devidamente calibrados.

O método de leitura adotado pelo sismógrafo variou-se no trigger com limite inferior entre 0,51 a 2,0 mm/s e tempo de gravação variou-se de acordo com os tempos de retardo de cada desmonte, em virtude do plano de fogo adotado em cada *Slot*³.

A localização dos pontos de monitoramento e o local das detonações com suas respectivas distâncias foram feitas através de um medidor de distância a laser, utilizando como referência plugs topográficos localizados próximos aos pontos de monitoramento. A partir do local de detonação, instalava-se o primeiro sismógrafo a uma determinada distância, e então eram instalados os demais em distâncias variadas.

Quanto ao tipo de explosivo, na operação de Vazante, utilizou-se emulsão bombeada, enquanto que na unidade CDS, com emulsão encartuchado. Sobre o acionamento, ambas minas trabalham com iniciadores eletrônicos.

Para um padrão de coleta de dados por campanha de monitoramento, seguiu-se um procedimento desenvolvido pela MecRoc Engenharia, conforme é detalhado nos subitens abaixo.

3.1 Dados de Carregamento e Amarração

As informações coletadas em campo são de importância extrema, pois são os dados reais do carregamento, de onde sairão as premissas para a interpretação dos dados. A Figura 1 apresenta

² Instalados sobre a superfície do contorno da escavação, sendo piso ou lateral, utilizando gesso para fixá-los e sem microfone.

³ Abertura de face livre em áreas de lavra ascendente ou descendente.

as informações básicas coletadas em campo que foram utilizadas para ambos estudos.

Data	Blaster	Litologia	Tipo de Explosivos	Iniciação	Diâmetro do furo	Número furos
------	---------	-----------	--------------------	-----------	------------------	--------------

Figura 1. Informações básicas coletadas em campo.

De posse desses dados, e com o acompanhamento da operação de carregamento, é possível ilustrar um perfil da distribuição da carga por furo, conforme ilustra a Figura 2 (a e b).

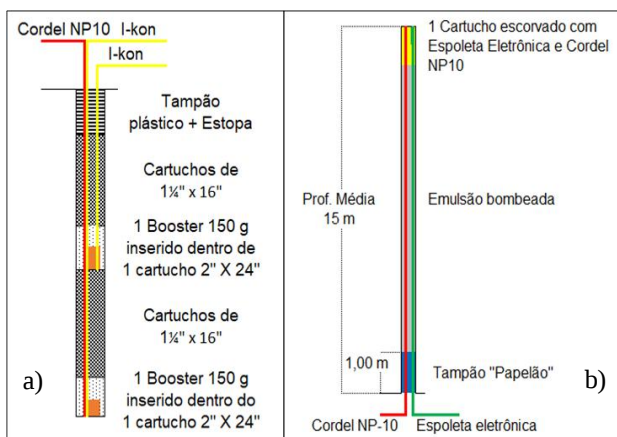


Figura 2. Perfil de carregamento padrão para slot em CDS (a) e Mina Vazante (b).

Após a execução do carregamento, inicia-se a definição do plano de fogo. Na mina de CDS I, como boa prática, utilizam o equipamento de verificação de desvio de furo, onde é possível evitar iniciação por simpatia⁴ (Orica, 1999), ou acionar furos que tenham possibilidade de um confinamento elevado⁵. A Figura 3 ilustra uma imagem da perfilagem.

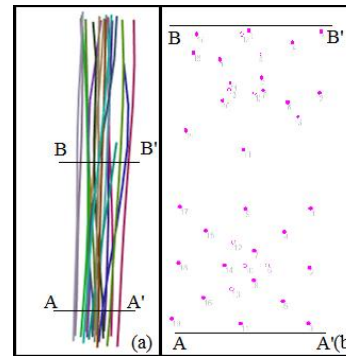


Figura 3. (a) Perfil da análise de desvio de perfuração; (b) seções da perfilagem. (MecRoc, 2018)

A Figura 4 ilustra um slot carregado, pronto para iniciar a amarração.



Figura 4. Slot carregado, pronto para iniciar a conexão de todos os furos a linha de iniciação.

Para cada desmonte gerou-se um mapa ilustrando os locais de instalação dos geofones e as respectivas distâncias até à fonte emissora, conforme ilustra a Figura 5.

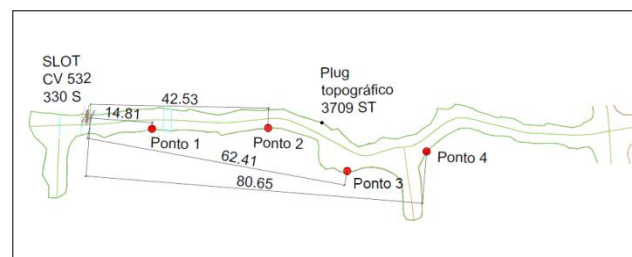


Figura 5. Mapa ilustrando distâncias entre os geofones e o slot, na mina CDS I.

⁴ A detonação de uma carga associada a um determinado retardo, induz a iniciação antecipada de uma carga próxima.

⁵ Uma ou mais perfurações estão trabalhando contra um volume de rocha superior ao ideal.

3.2 Dados Sísmicos

As informações sísmicas foram tratadas em duas etapas. Na primeira etapa, se coletou os

dados do geofone com as principais informações para estudos posteriores, conforme apresenta a Figura 6.

Pontos de Monitoramento	Longitudinal PPV(mm/s)	Vertical PPV(mm/s)	Transversal PPV(mm/s)	PVS Resultante(mm/s)	Distância (m)
-------------------------	------------------------	--------------------	-----------------------	----------------------	---------------

Figura 6. Informações sísmicas dos geofones.

A etapa dois, sobre os dados sísmicos, é onde se busca entender sobre os furos que saíram e os que não foram identificados no sismograma.

3.3 Conciliação Geométrica

A melhor ferramenta para se avaliar o resultado do desmonte em campo, desde entender aderência do mesmo (planejado x realizado), sendo *over* ou *underbreak*, trata-se do escaneamento digital. A Figura 7 ilustra uma conciliação realizada na mina de Vazante.

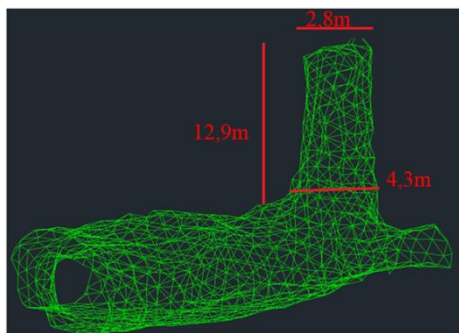


Figura 7. Conciliação realizada na mina de Vazante. (MecRoc, 2017)

3.4 Atenuação das Ondas

A atenuação da onda em um MR consiste em uma propriedade intrínseca do meio de propagação, onde sua definição está condicionada nos valores de vibrações (PPV). Segundo Lima e Silva (2006), Yang et. al. (2014) e Silva (2006) o modelo tradicional para investigar a lei da atenuação das vibrações é baseado numa análise de regressão, sendo expresso pela equação:

$$PPV = k \times \left(\frac{d}{\sqrt{Q}} \right)^{-\alpha} \quad (1)$$

Onde:

PPV = Velocidade de partícula de pico (mm/s).

K e α = Constantes representativas do comportamento do terreno.

d = Distância entre a carga de explosivo e o ponto de monitoramento.

Q = Carga máxima por espera (kg).

3.5 Danos ao Maciço Rochoso

No que tange à mecânica das rochas, devemos avaliar qual a influência da carga de explosivo nas redondezas do local escavado. Para tal, devemos acumular dados a partir de leituras realizadas com geofones e assim buscar interpretá-los com das teorias existentes.

3.5.1 Critério $PPV_{\text{mínimo}}$

Uma maneira de 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, pode ser expresso pela equação:

$$PPV_{\text{mínimo}} = \frac{0,021\sigma_1}{V_p \cdot \rho_R} \quad (2)$$

$PPV_{\text{mín.}}$ = Velocidade mínima de partícula causadora de extensão e dilatação de fraturas preexistentes (mm/s).

σ_1 = Tensão principal maior na ruptura estimada para rocha intacta (Pa).

ρ_R = Densidade da rocha intacta (g/cm³).

V_p = Velocidade de propagação de onda (m/s).

Dentre as informações necessárias para determinação do $PPV_{\text{mín.}}$, a Figura 8 destaca-se a obtenção através de informações de campo, análises empíricas e ensaios de laboratório disponibilizado pelas minas.

Data fogos de leque	Litologia	UCS (MPa)	Q de Barton	Profundidade Maciço Rochoso (m)	Densidade Rocha Intacta(g/cm ³)	Velocidade de Propagação (m/s)
---------------------	-----------	-----------	-------------	---------------------------------	---	--------------------------------

Figura 8. Dados necessários para definição do $PPV_{\text{mín.}}$.

4 ESTUDOS DE CASO

Em razão da quantidade de informações de monitoramentos realizados, nesse trabalho será apresentado em detalhes as análises sísmicas de uma amostra de cada mina, e ao final, será apresentado a compilação dos dados e uma curva de atenuação global de cada estudo.

4.1 Nexa Resources – unidade Vazante

Para buscar entendimentos básicos do comportamento das vibrações na litologia Brecha Dolomítica, realizaram-se oito campanhas de instrumentação sismográfica, com três geofones em cada monitoramento, em desmontes confinados ascendentes e descendentes.

A abertura da face livre do realce GMS_370 (entre TR10130_S e TR10090_S), do bloco H10130, foi monitorado seguindo a metodologia detalhada no trabalho. A Figura 9 apresenta os pontos de monitoramento e o plano do slot, além de suas respectivas distâncias.

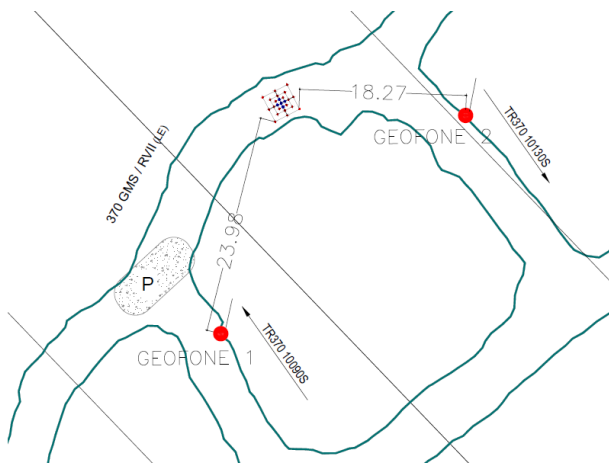


Figura 9. Pontos de monitoramento e o plano do slot com suas respectivas distâncias. (MecRoc, 2017)

A detonação em questão trata-se de uma abertura de slot ascendente em somente um estágio. Contemplando 20 furos carregados, cinco alargados com comprimento máximo de 12 metros. O sequenciamento e distribuição de cargas da detonação se deu de acordo com a Figura 10. Vale ressaltar que o carregamento se

deu de maneira mecanizada utilizando cartuchos Senatel Magnafrag da Orica de 480 gr ao fundo da coluna de carga, e emulsão bombeada na coluna da perfuração, conforme Figura 11. Todas as espoletas utilizadas foram eletrônicas (Unitronic), considerando uma por furo.

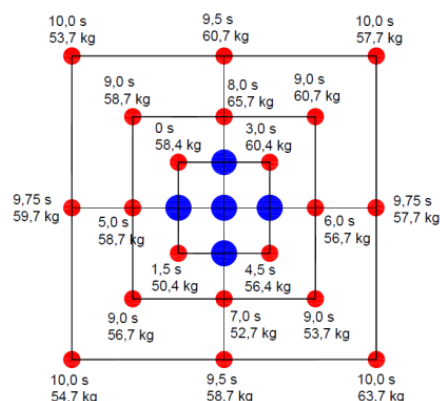


Figura 10. Sequenciamento e distribuição das cargas da detonação. (MecRoc, 2017)

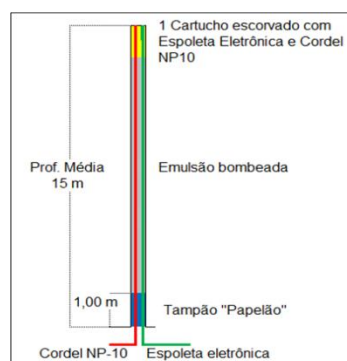


Figura 11. Perfil de carregamento do furo. (MecRoc, 2017)

Neste evento a maior carga por espera utilizada foi de 229,9 kg, nos tempos de espera de 9000ms e 10000ms.

4.1.1 Análises Sísmicas

Os dados coletados pelo geofone são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados coletados pelo geofone. (MecRoc, 2017)

	Long.	Trans.	Vert.	Res.
PPV (mm/s)	95,63	134,7	233,8	282,8
Frequência (Hz)	2,8	>100	85	
PPA (g)	14,73	14,12	21,17	

Avaliando o sismograma da Figura 12, onde é apresentado os respectivos PPV's, e suas CME, é perceptível que as espoletas eletrônicas proporcionaram tal precisão para os retardos dos furos, garantindo assim que não haja interferência entre ondas, caso os retardos estejam adequadamente dimensionados. Evidências de acoplamento insuficiente do geofone pode ser observada quando a oscilação ocorre fora do eixo principal (Bollinger, 1980).

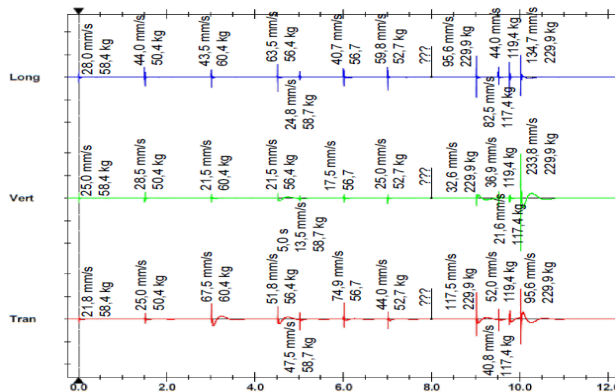


Figura 12. Sismograma (MecRoc, 2017)

É evidente que o furo temporizado em 8000ms não detonou, mesmo sabendo que a espoleta que ali estava não apresentou problemas durante a leitura do aparelho Unitronic. Razões que podem justificar tal fato são difíceis de ser assertivo, pelo fato desse slot não ter sido perfilado, porém, é provável que esteja relacionado a detonação por simpatia, já que não se percebe nenhuma vibração residual e tampouco possibilidade de que em um slot haja detonação de parte do bloco rochoso no ar.

Relacionando os retardos de cada furo, ou por carga máxima por espera (CME), é evidente uma divergência entre o PPV de 10000ms e o PPV de 9000ms, sabendo que ambos foram acionados com a mesma carga por espera, de 229,9kg. A Figura 13 detalha e ilustra os

momentos finais do sismograma, com os PPV's e seus respectivos tempo de retardo, que no qual é percebido a possibilidade de uma sobreposição de ondas, já que a amplitude do pulso em 10000ms ocorreu quase duas vezes o valor de 9000ms.

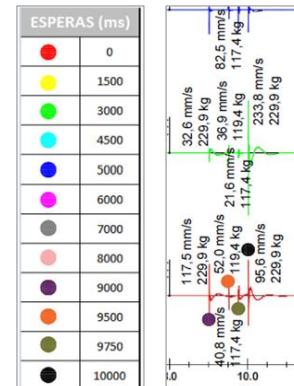


Figura 13. Momentos finais do sismograma, com os PPV's e seus respectivos tempo de retardo. (MecRoc, 2017)

4.1.2 Curva de Atenuação

Pelos sismogramas, foi possível compilar os dados dos pulsos como pontos, gerando uma curva de atenuação global dos ensaios, representada no gráfico abaixo, da Figura 14.

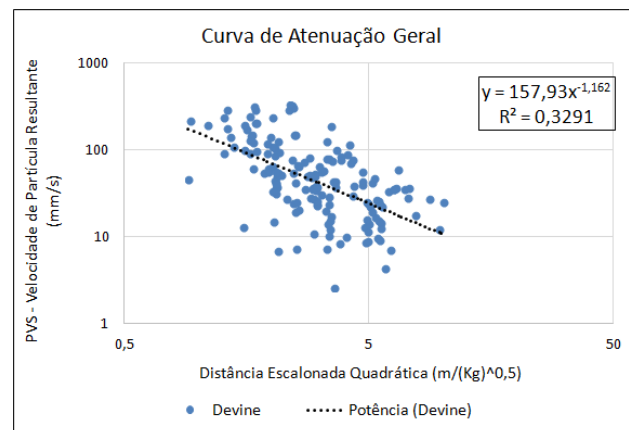


Figura 14. Gráfico curva de atenuação geral. (MecRoc, 2017)

Ao filtrar os pulsos gerados por detonação, foi obtido uma curva de atenuação logarítmica com coeficiente de correlação equivalente a 0,73, onde demonstra uma boa correlação matemática da distribuição, com a tendência da

nuvem de dados adquiridos. Um fator relevante para a alta correlação dos dados foi a utilização de espoletas eletrônicas, que permite melhor controle de vibração (Yang et. al, 2014).

A partir destes dados, foram obtidos os coeficientes de atenuação locais do MR e então foi calculado o PPV_{mín} igual a 169,23 mm/s com as informações geomecânicas da mina. Posterior as análises de atenuação e a definição do PPV_{mín}, elaborou-se um ábaco que correlaciona Quilo de explosivo x Distância x Vibrações, conforme ilustra a Figura 15. A partir deste é fácil notar que todos os pontos acima da linha vermelha, PPV mínimo, representa pontos a qual ocorrem dilatação de fraturas pre existentes.

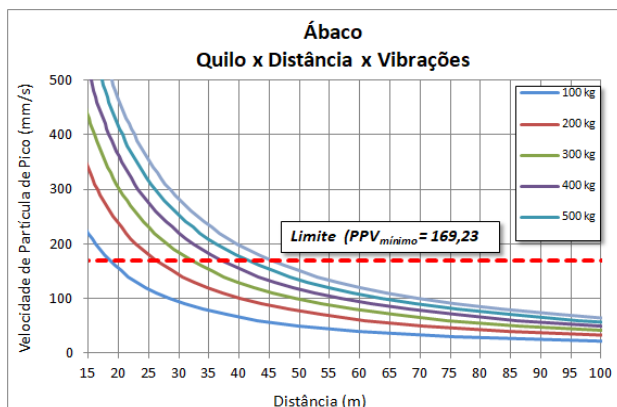


Figura 15. Ábaco que correlaciona Kg explosivo x Distância x Vibrações. (MecRoc, 2017)

4.2 AngloGold Ashanti – unidade CDS I

Apesar de na mina CDS I, terem sido executados estudos de vibração em desenvolvimento e lavra, sendo os últimos confinados (slot) ou não confinados (leques), nesse trabalho iremos detalhar apenas a atenuação que ocorreu em desmontes confinados na área da lavra.

Foram executadas cinco campanhas de monitoramento, totalizando 17 pontos na curva de atenuação.

4.2.1 Análises Sísmicas

A análise foi feita de acordo a Figura 16, onde os furos da detonação com sua respectiva

espera, foram alinhados com o tempo no gráfico do sismograma captado pelo sismógrafo de engenharia.

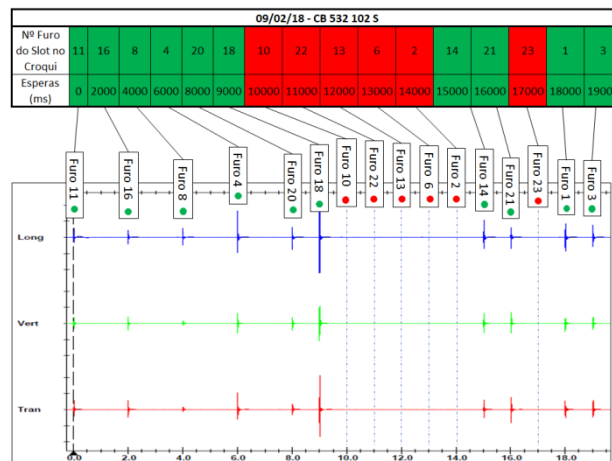


Figura 16. Ábaco que correlaciona Quilo de Explosivo x Distância x Vibrações. (MecRoc, 2018)

Desta forma, foi possível identificar os furos detectados no sismograma e os furos não detectados. Através da foto da face do local da detonação, foi possível fazer a representação destes furos com cores diferentes como mostra a figura 17.

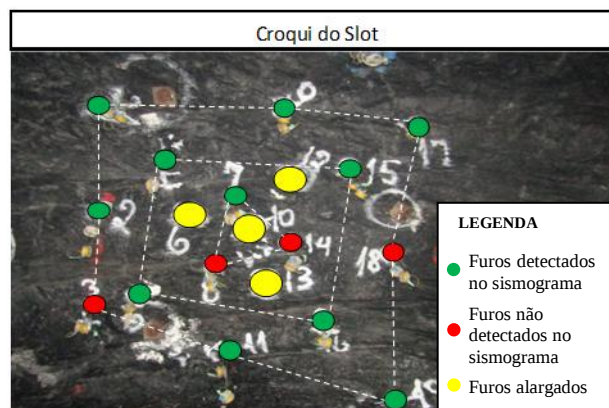


Figura 17. Face do local da detonação com a identificação dos furos detectados e não detectados no sismograma. (MecRoc, 2018)

4.2.2 Curva de Atenuação

A curva de atenuação foi elaborada estabelecendo-se limite superior e inferior com intervalo de confiança de 95%. Segundo Vallejos, J. et. Al (2017), a elevação da curva a

um intervalo de confiança de 95%, cobre uma maior quantidade de dados, tornando-se mais seguro e confiável para estimar as vibrações. Complementando a análise, a delimitação do limite inferior de confiabilidade do modelo é relevante para definição inferior do domínio. A Figura 18 ilustra a curva com os dois intervalos de confiança.

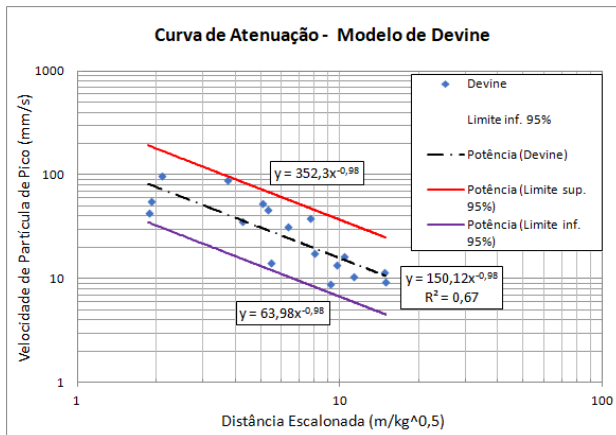


Figura 18. Curva de atenuação com limite superior e inferior com intervalo de confiança de 95%. (MecRoc, 2018)

A partir destes dados, foram obtidos os coeficientes de atenuação locais do MR.

Do mesmo modo que no estudo de caso da unidade Vazante, também para a unidade CDS I foi calculado um PPV_{mín.} igual a 88,73 mm/s através das informações geomecânicas da mina.

Posterior as análises de atenuação e a definição do PPV_{mín.}, elaborou-se três ábacos que correlacionam Quilo de explosivo x Distância x Vibrações para cada equação da curva de atenuação, conforme ilustram as Figuras 19, 20 e 21. Dowding (1985) destaca a relevância de que a elaboração das curvas de atenuação sejam realizadas controlando o número de variáveis do processo, para assim, garantir as respectivas confiabilidade.

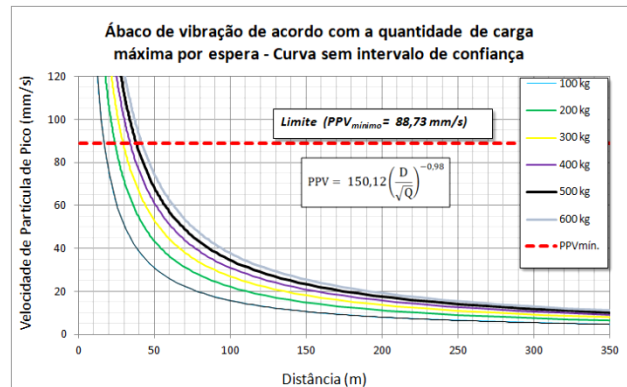


Figura 19. Ábaco curva de atenuação sem intervalo de confiança. (MecRoc, 2018)

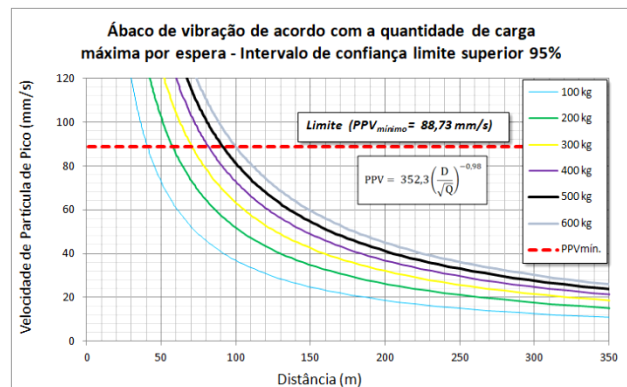


Figura 20. Ábaco curva de atenuação com intervalo de confiança limite superior 95%. (MecRoc, 2018)

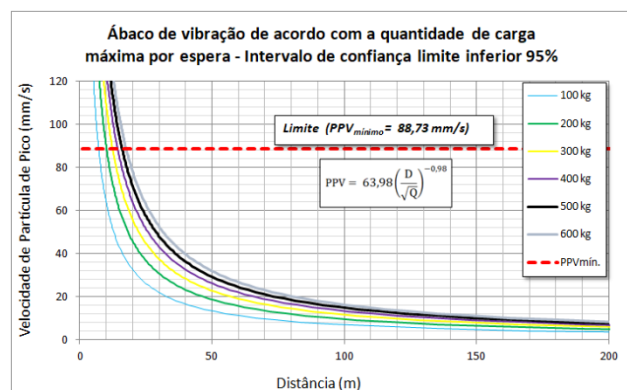


Figura 21. Ábaco curva de atenuação sem intervalo de confiança limite superior 95%. (MecRoc, 2018)

Considerando a teoria apresentada relativa ao PPV_{mín.} e aos ábacos propostos neste trabalho, a Tabela 2 resume as distâncias de potencial impacto decorrente de diferentes detonações a qual recomenda-se que haja uma inspeção de saneamento manual para minimização do risco no ambiente de trabalho

quanto a presença de potenciais blocos recém instabilizados pela detonação. A partir desta análise nota-se que a utilização do mais conservador, mostra-se mais adequado. Importante salientar que, caso as cargas máximas de cada tipo de detonação alterem as distâncias irão automaticamente modificar conforme modelo matemático apresentado.

Tabela 2. Distâncias de potencial impacto decorrente de diferentes detonações. (MecRoc, 2018)

Tipo de detonação	CME (média real)	Distância de saneamento		
		Curva Limite Inferior 95%	Curva Sem Limite Média	Curva Limite Superior 95%
Slot	75,5 kg	6,19 m	14,86 m	35,48 m

5 CONCLUSÃO

O entendimento do processo de detonação é fundamental para que ocorram ganhos operacionais em granulometria e avanço, mas também para minimizar os impactos no maciço rochoso remanescente. Desta forma, análises sismográficas auxiliam a equipe para que os possíveis impactos negativos possam ser antecipados e mitigados pelo processo de melhoria contínua.

Em ambas as minas observou-se grande interesse do corpo geotécnico em elevar a compreensão de como o desmonte afeta o MR, fato este que irá promover a elevação da disciplina de detonação e vibração no ambiente de mineração, principalmente subterrânea.

Após análise de todos os sismogramas, nota-se que a ausência, na maioria, de controle de qualidade da perfuração limita a interpretação dos dados sismográficos e das potenciais consequência geotécnicas. Sendo assim, recomenda-se fortemente a utilização de instrumentos de perfilagem anteriormente a definição do plano de fogo (cargas e temporização).

A definição das curvas de atenuação permitiu de maneira gráfica obter-se uma previsibilidade quanto as vibrações esperadas para cada litologia, entretanto é importante

destacar que estas interpolações devem ser criadas considerando que o tipo de explosivo, tipo da detonação sejam constantes. Por isso, recomenda-se a criação de curvas individuais para cada situação, ou seja, em lavra e desenvolvimento.

A partir dos dados interpretados e do modelo de dano apresentado, a determinação de áreas de influência da detonação foi apresentada com intuito de reduzir o risco de queda de blocos recém induzidos pela vibração.

6 TRABALHOS FUTUROS

Percebe-se a necessidade de elevação da interpretação do efeito da detonação no maciço rochoso, logo, estudo utilizando sismógrafos de campo próximo associado a utilização instrumentos de calibração como micro cameras para furos de monitoramento serão conduzidos.

Maior detalhamento dos sismogramas permitirão definir para cada MR os tempos de retardos mínimos necessários, evitando assim, impactos de qualidade da detonação e na rocha encaixante.

A elevação do controle de qualidade dos explosivos na operação mostra-se uma oportunidade, logo, o controle do VOD (*Velocity of Detonation*) permitirá acompanhamento indireto da eficiência do explosivo já que este parâmetro é determinante da pressão de detonação e consequente vibração ao maciço rochoso.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a toda equipe das empresas Nexa e AngloGold Ashanti pela oportunidade de aprendizado compartilhado, em especial à equipe de Mecânica das Rochas e de desmonte.

REFERÊNCIAS

Bollinger, G. A. (1980). Blast Vibration Analysis. Southern Illinois University Press.

- Dowding, C. (1985). Blast Vibration Monitoring and Control.
- Gabriel Lima e Valdir Costa e Silva, UNESP, Geociência, 449-454, 2006.
- Garrido, A. A. (2007). Diagnostico y Optimizacion de Disparo En Desarrollo Horizontal, Mina El Teniente. Universidad de Chile.
- Orica (1999). Safe and Efficient Blasting in Underground Metal Mines. Orica Australia Pty Ltd A.C.N 004 117 828.
- MecRoc (2017). Relatório Técnico Votorantim Metais – Mina de Vazante – Análises de Vibrações induzidas por Desmonte de Rochas (fevereiro 2017)
- MecRoc (2018). Relatório Técnico AngloGold Ashanti – Mineração Córrego do Sítio. - Analise de Vibrações Induzidas por Desmonte de Rochas (maio de 2018)
- Lima, G.C e Silva, V.C, (2006) UNESP, Geociência, 449-454,.
- SILVA, V.C (2006) Operações Mineiras, p. 28-36, Ouro Preto.
- Vallejos, J., Burgos, L., Silva, G., Munoz, A., & Scherpenisse, C. (June de 2017). Excavaciones en Roca. Diplomado en Geomecanica Aplicada al Diseno Minero. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Yang, R., Wiseman, T., Scovira, S., Watkins. (2014) Multiple Seed Waveform (MSW) vibration Model an some case studies.