AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GEOLOGIA ESTRUTURAL NO CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES PROVENIENTES DE DESMONTE DE ROCHAS POR EXPLOSIVOS PARA A CAVIDADE N4WS_0008, SERRA NORTE, CARAJÁS, PARÁ, BRASIL

Luiz Felipe Mendonça de Amorim, DEMIN - UFRGS

Jair Carlos Koppe, DEMIN – UFRGS

Pedro Henrique Alves Campos, DEMIN – UFMG

Leandro Alves Caldeira Luzzi, Vale S/A

RESUMO

As vibrações geradas pelo uso de explosivos nas minerações têm o potencial de causar impactos a integridade física de cavidades naturais presentes no entorno de empreendimentos mineiros. Diante disso é necessário a aplicação de conceitos técnico/científicos levando-se em conta parâmetros geoestruturais intrínsecos ao meio no qual a onda de choque se propaga para adequar à compatibilização das atividades mineiras e a preservação do patrimônio espeleológico. Os resultados proporcionados por este estudo possibilitaram avaliar a maior e menor atenuação de acordo com a geologia estrutural local de diferentes equações de atenuação de velocidade de vibração de partícula de pico com a distância escalonada, podendo afirmar que, a direção das principais descontinuidades e estruturas locais interferem na atenuação das ondas provenientes de desmontes por explosivos.

Palavras-chave: Cavidades, atenuação, explosivos, geologia estrutural

ABSTRACT

The blast vibrations in mining have the potential to impact the physical integrity of natural cavities around mining projects. Therefore, it is necessary to apply technical/scientific concepts considering geostructural parameters intrinsic to the environment in which the shock wave propagates to adapt the compatibility of mining activities and the preservation of speleological heritage. The results provided by this study made it possible to assess the greater and lesser attenuation according to the local structural geology of different equations of peak particle vibration velocity equations with the scaled distance, being able to affirm that the direction of the main discontinuities and local structures affects the attenuation of blast waves.

Keywords: Caves, attenuation, explosives, structural geology

INTRODUÇÃO

De todas as operações unitárias presentes no contexto de um empreendimento mineral, o desmonte de rochas por explosivos é um dos que mais gera desconfiança e insegurança dos órgãos ambientais, já que na maioria das vezes é baseado na prática e experiência dos operadores que tem como objetivo principal fragmentar a rocha necessária à produção, mas que muitas vezes negligenciam a geração de vibrações e pressão acústica pela detonação.

O controle na mineração, de maneira geral, está cada vez mais restritivo em termos de licenciamento ambiental, em grande parte devido a decretos e exigências ambientais específicos para cavidades naturais subterrâneas. Não existem normas técnicas legais aplicáveis diretamente ao contexto do controle de vibrações decorrentes da atividade de mineração em relação a cavidades, apenas recomendações técnicas estabelecidas pelo CECAV – Centro de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas [1].

A integridade física das cavernas está ligada primariamente à sua fragilidade em relação às vibrações provenientes de atividades em um empreendimento mineiro. O grau de atenuação dessas vibrações em um maciço rochoso é altamente variável, dependendo do tipo de vibração e características estruturais do maciço rochoso que hospeda a caverna em relação à transmissão de ondas **[2].** Em algumas circunstâncias, as alterações do campo de tensão podem desencadear eventos que liberam substanciais quantidades de energia dentro do maciço rochoso. Esta liberação de energia pode significar a reativação de estruturas geológicas, como fraturas, falhas e zonas de cisalhamento nas cavidades, desfavoráveis às condições de estabilidade.

A aplicação de conceitos técnico/científicos no desmonte de rochas com explosivos permite a consideração de parâmetros geológicos e geotécnicos intrínsecos do meio no qual a onda de choque se propaga, bem como o dimensionamento do plano de fogo com os parâmetros adequados à compatibilização das atividades mineiras com o atendimento às exigências ambientais de preservação do patrimônio espeleológico. Alguns fatores como sazonalidade climática, geologia estrutural regional e local onde a mina está inserida, tipo de explosivo, litologia, cota e direção do desmonte são fundamentais para entender como a onda de choque se propaga. Finalmente, visto que diferentes litologias e descontinuidades, além da presença de água no maciço, interferem significativamente na velocidade de pico de partícula, deve-se estudar e determinar diferentes equações de atenuação de vibração para se obter uma estimativa mais assertiva dessa variável.

A região das minas de Carajás, em Serra Norte, no Pará, particularmente apresenta uma grande quantidade de cavidades naturais subterrâneas ferríferas, e a cavidade N4WS_0008 é, de certa forma, peculiar, devido à sua fragilidade estrutural e grande umidade constante ao longo do ano.

O objetivo desse estudo é avaliar a influência da geologia estrutural na estimativa de equação de atenuação de vibrações provenientes de desmontes por explosivos em relação à uma cavidade ferrífera na mina de N4WS da empresa Vale S/A.

METODOLOGIA

Contextualização

A mina de N4WS está localizada em Serra Norte, parte da Província Mineral de Carajás, localizada no sudeste do estado do Pará. De forma mais específica, a cavidade alvo do presente estudo se desenvolve em litologias ferríferas da Formação Carajás, que representa parte de um greenstone belt do Domínio Carajás. Nessa unidade estratigráfica estão incluídas formações ferríferas bandadas de fácies óxido com jaspilitos interdigitados a pacotes de metabasaltos e metavulcânicas ácidas, moderadamente a fortemente deformadas, metamorfisadas em fácies subxisto verde a anfibolito [3].

Os altos teores de Fe das litologias da Formação Carajás propiciam a formação de coberturas concrecionárias ferruginosas comumente denominadas "cangas". Esses depósitos de idade cenozoica ocorrem na forma residual quando formados in situ pelo intemperismo com teor expressivo de Fe. Podem, também, se estabelecer na forma detrítica quando a rocha de origem (rica em Fe) é desagregada, transportada e posteriormente cimentada. Essas coberturas podem constituir carapaças de alta rigidez e em contato com outras litologias atuam como um excelente elemento de sustentação para vazios subterrâneos. Em campo observa-se que grande parte das cavidades se insere no contexto do contato entre laterita ferruginosa (topo) e rocha alterada (base), ou nas proximidades deste.

As cavidades da região de Carajás se formam em posições variadas do relevo (Figura 1), porém, na área de estudo, são evidenciadas em sua grande maioria nas bordas dos platôs, o que se deve principalmente à atuação dos processos intempéricos e erosivos, onde há recuo da encosta e exposição das cavidades. Frequentemente se tem cavidades desenvolvidas na base de escarpamentos rochosos, em bordas dos platôs, locais em que o gradiente hidráulico é mais pronunciado, resultando em maior velocidade de fluxo da água subterrânea e maior capacidade erosiva.



Figura 1 - Inserção mais frequente das cavidades da província mineral de Carajás

A gênese de cavidades ferríferas pode se dar por processos endógenos e exógenos. Grande parte das cavidades estudadas na Serra Norte apresentam indícios de gênese endógena, com cavidades que possuem morfologia do tipo "câmaras compostas" onde as câmaras são comumente conectadas por passagens mais estreitas, formadas aparentemente após a gênese dos salões. Quanto mais evoluída e extensa a cavidade, maior a quantidade de câmaras. Este modelo espeleogenético envolve processos dissolutivos, possivelmente intermediados por ação bacteriana. Também ocorrem cavidades com indício de processos exógenos, estes têm como principal modelador os agentes intempéricos externos. Cavidades formadas por processos fluviais, desplacamentos ocasionados por variação térmica, recuo erosivo da escarpa e, em parte, ações biológicas, se encaixam nesta categoria.

Os litotipos observados nas cavidades de Serra Norte pertencem a três grupos principais: Formações Ferríferas Bandadas (FFB), Cangas e Metabasaltos. No grupo das FFB inserem-se os jaspilitos (protominério) e o minério de ferro (hematitito, produto de alteração do jaspilito). No grupo das cangas (lateritas) tem-se a canga detrítica e a canga química. As rochas máficas (metabasaltos) representam diques e sills que podem variar de poucos a dezenas de metros. Devido ao alto grau de intemperismo, pode apresentar aspecto saprolítico e presença marcante de argila. Entretanto, em algumas cavidades foram evidenciados corpos de rocha máfica maciça e pouco alterada, que ocorrem na parede ou no teto intersectando a cavidade quase em sua totalidade.

Caracterização da cavidade NS0008

Segundo a IN MMA nº2/2009, cavidades naturais subterrâneas devem ser classificadas quanto ao seu grau de relevância (máxima, alta, média e baixa) em função de seus atributos. Os atributos que conferem o grau de relevância Alta à cavidade N4WS_0008 são:

1. Alta projeção horizontal da cavidade em relação às demais cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica;

2. Alta área da cavidade em relação às demais cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica;

3. Alto volume da cavidade em relação às demais cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica;

4. Diversidade de sedimentação química com muitos tipos de espeleotemas e processos de deposição;

5. Presença de populações estabelecidas de espécies com função ecológica importante;

- 6. Alta riqueza de espécies;
- 7. Alta abundância relativa de espécies;
- 8. Presença de espécies troglomórficas.

Em relação à espeleometria, os dados são mostrados na Tabela 1.

CAVIDADE	UTM E	UTM N	ALTITUDE (m)	PH (m)	DESNIVEL (m)	ÁREA (m²)	VOLUME (m ³)
N4WS-0008	589109	9326847	682	79	9,2	454,1	1004

Tabela 1 - Espeleometria da cavidade N4WS_0008.

Sendo constituída por dois condutos de direção grosseiramente norte/sul (cerca de 10m um e o outro cerca de 15m) interligados por um conduto de direção noroeste/sudeste (cerca de 36m), o perfil da cavidade é ascendente, com gradiente de cerca de 12 m/m, conforme Figura 2. A entrada se faz por um conduto de seção quadrática a elíptica de aproximadamente 1,5m de altura por 3,5 m de largura (Figura 3), piso plano composto por sedimentos de granulometria silte em meio a blocos e matacões.



Figura 2 - Mapa da cavidade N4WS_0008.



Figura 3 - Entrada da cavidade N4WS_0008; a) de fora para dentro e b) de dentro para fora.

Na cavidade N4WS_0008 observa-se o contato entre a formação ferrífera, rochas máficas, canga química e canga detrítica. Capeando a cavidade tem-se a canga contendo clastos milimétricos a centimétricos de hematita e matriz ferruginosa.

A formação ferrífera ocupa a maior parte da cavidade, e mostra expressiva contribuição/contaminação argilosa, especialmente pelo de contato com a rocha máfica decomposta. Apresenta bandamento em geral subverticalizado de direção NW-SE (250/75), com núcleos dobrados e de mergulhos para SW. Observa-se dobras de amplitude decimétrica a métrica de eixos subhorizontais a inclinados, de trend geral também NW-SE. Nota-se também

clivagens de fratura com espaçamento e persistência decimétricos cortando o bandamento em arranjo subortogonal a oblíquo (Figura 4).



Figura 4 – a) formação ferrífera em zona de cisalhamento mostrando goethita; b) presença de magnetita euédrica próximo ao contato com rocha máfica.

A magnetita ocorre na maioria das vezes sob a forma de kenomagnetita **[4]** como cristais idiomórficos a hipidiomórficos individualmente ou constituindo agregados. Frequentemente ocorrem como relictos dentro dos cristais de hematita. Presença de hematita manganesífera é comum próximo ao contato com os corpos de rocha máfica.

O contato da formação ferrífera com a rocha máfica é lateral, brusco, em zona de cisalhamento onde observam-se camadas anastomosadas, 'boudins' e brecha cataclasada. Próximo ao contato com as rochas máficas intrusivas os grãos de martita e/ou hematita são recristalizados para magnetita (martita subédrica). Também há presença de veios de carbonatos nas proximidades do contato.

A rocha máfica intemperizada aflora na porção distal da cavidade ocupando parede e teto (Figura 5). Apresenta intenso intemperismo podendo ser caracterizada como saprolito onde predomina a coloração vermelha a localmente amarelada e textura silto-argilosa baixa resistência geomecânica. É possível observar planos de fratura verticais a sub-verticais bem definidos.



Figura 5 – a) material argiloso nas paredes – rocha máfica intemperizada; b) presença de rocha máfica alternada com formação ferrífera - salão.

Além da zona de cisalhamento entre a rocha básica e a formação ferrífera observam-se outras de direção NW/SE que abrange as cavidades no entorno e a própria N4WS_0008; estas zonas condicionam condutos NW/SE e podem favorecer a ocorrência de instabilidades naturais. Percebe-se também descontinuidades recentes, caracterizadas por juntas subverticais e juntas subhorizontais persistentes (> 3m) e em geral abertas (> 0,5cm). Outras estruturas observadas foram: foliação, juntas de alívio, fraturas e dobras. A atitude da foliação mostra mergulhos de alto ângulo 70° com direção preferencial SW (direção do mergulho). Os condutos estão condicionados por falhas (e zonas de cisalhamento), fraturas e foliação. (Figura 6)



Figura 6 - Mapa geoestrutural da cavidade N4WS_0008.

Na parte hídrica observam-se gotejamentos variados principalmente na linha de contato entre a rocha máfica e o jaspilito, decorrente da presença de zona de cisalhamento e da diferença de porosidade/permeabilidade. Há cinco locais de acúmulo de água de gotejamento formando pequenas poças.

A cavidade N4WS_0008 apresenta vários pontos de fragilidade estrutural, já que está contida em um contexto geológico/geotécnico peculiar. Além de importante zona de cisalhamento com presença de cataclasitos e brechas no contato da rocha máfica com o jaspilito tem-se camadas verticalizadas de formação ferrífera favorecendo a percolação de água e presença de veios de carbonato. Os carbonatos são facilmente dissolvidos em águas ácidas formando "vazios" nas rochas contribuindo para a instabilidade.

Esta percolação de águas permite que a cavidade mostre umidade em todos os períodos, seja na seca ou na chuva, incrementando o intemperismo das rochas.

Na Figura 7 é apresentado os valores obtidos de Índice Geotécnico de Cavidade (IGC) para os vãos da cavidade N4WS_0008 segundo a metodologia de BRANDI (2018) [5].



Figura 7 - Mapa de IGC para a cavidade N4WS_0008.

Critério de avaliação

Para avaliação da atenuação das vibrações provenientes dos desmontes por explosivos neste estudo foi considerada a proposta de DOWDING (1996) **[6]**, em que a velocidade de partícula é estimada pela relação de escalonamento, que descreve o decaimento da velocidade de vibração pico de partícula com a distância de forma normalizada pela fonte de energia. Na prática, a "Lei de Atenuação da Vibração dos Terrenos", relaciona a velocidade de partícula com a distância do ponto de detonação e a carga máxima por espera, sendo expressa pela equação:

$$VVPP = k \left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^{-m}$$

Onde:

VVPP = Velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s)

D = Distância entre o ponto de medição e o ponto de detonação (m)

Q = Carga máxima de explosivo detonada por espera (kg)

k e m = variáveis em função dos parâmetros de fogo e das características do terreno

A relação da distância sobre a raiz da carga é chamada distância escalonada (DE).

O fator "k" é uma medida da intensidade da energia que é transferida para o meio (terreno ou atmosfera) e propagada para longe da detonação, estando relacionado ao grau de confinamento da detonação, densidade e energia do explosivo. A inclinação da reta, fator "m", está associada às variações litológicas e estruturais da geologia local por onde passam as ondas sísmicas, e a condições atmosféricas locais, e é uma medida da redução das intensidades de vibração e pressão acústica com a distância **[7,8].**

De uma forma geral, ao analisar as variáveis da equação prognóstica de atenuação de vibrações, observa-se que o aumento no valor da variável k está relacionado à uma menor atenuação da onda à medida em que ela viaja pelo meio, e, da mesma forma, um aumento no valor da variável m refere-se a uma maior atenuação da onda à medida em que ela viaja pelo meio.

Dados de entrada

Para o desenvolvimento do trabalho, foram selecionados os registros sismográficos do ano de 2018 obtidos por um sismógrafo de engenharia instalado no interior da cavidade N4WS_0008. As variáveis presentes no estudo podem ser observadas, a seguir, na Tabela 2 (Variáveis Sismográficas) e Tabela 3 (Variáveis de Detonação).

Cabe ressaltar que os pontos de desmonte não estão na mesma litologia e nem foram utilizados os mesmos acessórios de detonação para cada um deles. O objetivo do estudo foi apenas avaliar a interferência da geologia estrutural na atenuação de vibrações provenientes de desmontes por explosivos.

SISMOGRAFIA		
Dado	Unidade	
Detonação referente ao registro	-	
Data do registro	-	
Distância da detonação ao ponto de medição	m	
Velocidade de vibração de pico de partícula no canal transversal	mm/s	
Velocidade de vibração de pico de partícula no canal vertical	mm/s	
Velocidade de vibração de pico de partícula no canal longitudinal	mm/s	
Velocidade de vibração de pico de partícula resultante	mm/s	

Tabela 2 -	Variáveis	sismográficas	e suas	unidades

Tabela 3 - Variáveis de detonação e suas unidade	es
--	----

DETONAÇÃO			
Dado	Unidade		
Tag da detonação	-		
Data da detonação	-		
Carga máxima por espera	Kg		

Após a seleção dos dados, as localizações das detonações em relação a posição da caverna (Figura 8) foram classificadas em:

- Norte-Sul N-S (em azul)
- Nordeste-Sudoeste NE-SW (em laranja)
- Leste-Oeste E-W (em vermelho)
- Noroeste-Sudeste NW-SE (em verde)



Figura 8 - Localização das detonações utilizadas para o presente estudo.

A elaboração do diagnóstico estrutural seguiu uma base de lineamentos foto-interpretados da empresa Vale S/A a partir de imagem de satélite, resultando em 48 linhas estruturais. O mapa contendo a distribuição espacial dessas estruturas, incluindo o respectivo diagrama de roseta (baseados na frequência das estruturas) está apresentado na Figura 9. Na região da mina de N4WS, os lineamentos estruturais apresentam predomínio na direção NW-SE.



Figura 9 - Lineamentos estruturais da mina de N4WS.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Histogramas e o sumário estatístico da Distância Escalonada (m/kg^{1/2}) (DE) e da Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s) (VP) são apresentadas para as direções já estabelecidas (Figura 10 a Figura 17)



Figura 10 - Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s) para a direção N-S.



Figura 11 - Distância Escalonada (m/Kg1/2) para a direção N-S.



Figura 12 - Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s) para a direção NE-SW.



Figura 13 - Distância Escalonada (m/Kg1/2) para a direção NE-SW.



Figura 14 - Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s) para a direção E-W.



Figura 15 - Distância Escalonada (m/Kg1/2) para a direção E-W.



Figura 16 - Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (mm/s) para a direção NW-SE.



Figura 17 - Distância Escalonada (m/Kg1/2) para a direção NW-SE.

Pode-se perceber a grande quantidade de dados na direção NW-SE, isso se deve ao fato de as operações de lavra estarem concentradas nessa região da mina por ser a direção principal do corpo de minério.

Ao se comparar os histogramas dos parâmetros VVPP (mm/s) e DE (m/kg1/2) observa-se uma semelhança entre eles nas direções estudadas, exceto na direção E-W, apontando que os dados não estão enviesados de uma forma geral. Porém na direção E-W, devido à pequena quantidade de registros, observa-se uma tendência de distribuição dos dados que se difere das outras, mas, mesmo assim, os dados serão utilizados no estudo para efeito de comparação com as outras direções.

Analisou-se também a correlação (Pearson e Spearman) entre VP e DE para cada direção, a regressão linear existente e a equação de atenuação de vibração obtida (Figura 18 a Figura 21).



Figura 18 - Atenuação de onda sísmica local para a direção N-S



Figura 19 - Atenuação de onda sísmica local para a direção NE-SW



Figura 20 - Atenuação de onda sísmica local para a direção E-W



Figura 21 - Atenuação de onda sísmica local para a direção SE-NW

Algumas equações apresentam um baixo valor de Coeficiente de Pearson e Spearman, porém isso pode ser explicado por ter sido utilizados no estudo dados de detonações de produção da mina de N4WS, e não ensaios específicos nessas direções. Em detonações de produção ao longo do ano pode-se ter diferença de cota entre os fogos além da sazonalidade climática, que na região de Carajás é muito marcante a diferença entre as estações seca e chuvosa.

Um resumo dos parâmetros k e m para cada uma das direções é apresentado na Tabela 4. A curva de atenuação de vibrações está representada graficamente na Figura 22.

DIREÇÃO	k	m
N -S	158.87	0.778
NE - SW	44.63	0.720
E - W	801.06	1.138
SE - NW	1264.27	1.298

Tabela 4 - Parâmetros k e m para as direções



Figura 22 - Comparação entre as equações de atenuação de ondas sísmicas.

É visível no gráfico a diferença de atenuação entre as quatro diferentes direções de detonação em relação à cavidade N4WS_0008. Quanto mais inclinada a reta, menor a atenuação da onda (observado na direção NW-SE), bem como quanto mais próxima à origem do gráfico, maior a atenuação da onda proveniente do desmonte por explosivos (observado na direção NE-SW).

CONCLUSÃO

Os resultados proporcionados por este estudo possibilitaram avaliar as diferentes equações de atenuação de velocidade de vibração de partícula de pico com a distância escalonada para quatro diferentes direções em relação à cavidade ferrífera N4WS_0008. Foi verificada as direções de maior e menor atenuação de acordo com a geologia estrutural local.

Na direção NW-SE há uma atenuação muito menor com o aumento da distância escalonada se comparada às outras direções, principalmente a direção NE-SW, imediatamente perpendicular a esta, corroborando com o sentido NW-SE das principais estruturas presentes na região do estudo, incluindo a principal direção do corpo de minério. Dessa forma, pode-se afirmar que, neste caso, a direção das principais descontinuidades e estruturas locais interferem na atenuação das ondas provenientes de desmontes por explosivos. As demais direções, E-W e N-S, tiveram um comportamento similar de atenuação de vibrações provenientes de desmonte de rochas por explosivos sem significativa correlação com a direção das principais estruturas geológicas locais, conforme esperado.

Salienta-se aqui que outras variáveis, como litologia e as relacionadas ao plano de fogo, também impactam as vibrações, mas não foram consideradas nesse estudo. O autor tem a intenção de fazer essa análise multivariada em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. (2016) Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais, Brasília, DF.

[2] AULER, A. (2011). Perímetro de Proteção - Cavidade CAI_03. Carste Consultores Associados. Belo Horizonte, p. 18.

[3] JUSTO, A. P.; LOPES, E. D. S. (2014). Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A-II. [S.I.].

[4] KULLERUD, G.; YUND, R. A.; MOH, G. H. Phase relations in the Cu–Fe–S, Cu–Ni–S, and Fe–Ni–S systems. Magmatic Ore Deposits, n. Economic Geology Monograph, p. 323-343, 1969.

[5] BRANDI, I. V. (2018). Proposta de uma metodologia de classificação geotécnica aplicada a cavernas em litologias ferríferas. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

[6] DOWDING, C. (1996). Construction Vibrations. Eaglewood Cliffs: Prentice Hall Inc.

[7] ROSENHAIM, V. L. Influência dos níveis de vibração e pressão acústica produzidos pelo desmonte de rochas com explosivos em construções de alvenaria. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.

[8] AIMONE-MARTIN, C. T. et al. Comparative Study od Structure Response to Coal Mine Blasting. Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement. [S.I.], p. 209. 2003.