



DIEGO DE JESUS CARDOSO

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS PARA PREVISÃO E CONTROLE DE VIBRAÇÕES
NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS DA MINA VIGA**

Ouro Preto, MG

2021

DIEGO DE JESUS CARDOSO

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS PARA PREVISÃO E CONTROLE DE VIBRAÇÕES NO DESMONTE
DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS DA MINA VIGA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico
Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista
em Lavra de Minas a céu aberto

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Leandro Geraldo Canaan Silveira, MSc.

Ouro Preto, MG

2021

Título: Aplicação de técnicas para o controle de vibrações no desmonte de rochas da mina viga

Classificação: () Confidencial () Restrita (X) Uso Interno () Pública

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço.

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C268a

Cardoso, Diego de Jesus

Aplicação de técnicas para previsão e controle de vibrações no desmonte de rochas com explosivos da Mina viga. Diego de Jesus Cardoso. Ouro Preto, MG: ITV, 2021.

47 p.: il.

Monografia (Especialização *latu sensu*) - Instituto Tecnológico Vale, 2021.

Orientador: Leandro Geraldo Canaan Silveira

1. Vibrações induzidas por detonação. 2. Lei de atenuação. 3. Carga máxima por espera. 4. Danos estruturais. 5. Desconforto humano. I. Silveira, Leandro Geraldo Canaan II. Título

CDD.23. ed. 622

Diego de Jesus Cardoso

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS PARA PREVISÃO E CONTROLE DE
VIBRAÇÕES NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS DA MINA
VIGA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de especialista *lato sensu* em [Lavra de Minas a Céu Aberto].

Orientador: Prof. Leandro Geraldo Canaan Silveira

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em 03 de dezembro de 2021 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Leandro Geraldo Canaan Silveira
Orientador – Vale

Vidal Félix Navarro Torres
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV-Mi)

Fabiano Veloso Ferreira
Membro interno – Instituto Tecnológico Vale (ITV-Mi)

Os Signatários declaram e concordam que a assinatura será efetuada em formato eletrônico. Os Signatários reconhecem a veracidade, autenticidade, integridade, validade e eficácia deste Documento e seus termos, nos termos do art. 219 do Código Civil, em formato eletrônico e/ou assinado pelas Partes por meio de certificados eletrônicos, ainda que sejam certificados eletrônicos não emitidos pela ICP-Brasil, nos termos do art. 10, § 2º, da Medida Provisória nº 2.200-2, de 24 de agosto de 2001 (“MP nº 2.200-2”).



PROTOCOLO DE ASSINATURA(S)

O documento acima foi proposto para assinatura digital na plataforma Portal de Assinaturas Vale. Para verificar as assinaturas clique no link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/FE1E-9A2C-6B51-9B50> ou vá até o site <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> e utilize o código abaixo para verificar se este documento é válido. The above document was proposed for digital signature on the platform Portal de Assinaturas Vale. To check the signatures click on the link: <https://vale.portaldeassinaturas.com.br/Verificar/FE1E-9A2C-6B51-9B50> or go to the Website <https://vale.portaldeassinaturas.com.br> and use the code below to verify that this document is valid.

Código para verificação: FE1E-9A2C-6B51-9B50



1 Hash do Documento

02E969B688806F7E26DB2E2E3E3E86732A98BE0477D254798730
FF52A565BD02

O(s) nome(s) indicado(s) para assinatura, bem como seu(s) status em 19/01/2022 é(são) :



Leandro Geraldo Canaan Silveira (Signatário) - em 19/01/2022 15:59 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Por email: leandro.silveira@vale.com

Evidências

Client Timestamp Wed Jan 19 2022 15:59:50 GMT-0300 (Horário Padrão de Brasília)

Geolocation Latitude: -19.90656 Longitude: -43.9517184 Accuracy: 4061.8038820339466

IP 201.17.210.184

Hash Evidências:

58AC8B57F5B3FAEBD5A98BF2DBDC3F41BDB07DAF5BB07481FAAE82F8244342C4



Fabiano Veloso Ferreira (Signatário) - em 03/01/2022 09:03 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Autenticação de conta

Evidências

Client Timestamp Mon Jan 03 2022 09:03:35 GMT-0300 (GMT-03:00)

Geolocation Latitude: -19.9426048 Longitude: -43.9156736 Accuracy: 1000.1748126799546

IP 201.17.156.147

2 Hash Evidências:

659E53EB3FE76D4FAD06A24B8528F2C48716C1F0932AF03199A9EB0120D95992



Vidal Felix Navarro Torres (Signatário) - 275.950.565-00 em 27/12/2021 17:09 UTC-03:00

Tipo: Assinatura Eletrônica

Identificação: Autenticação de conta

3 Evidências

Client Timestamp Mon Dec 27 2021 17:10:05 GMT-0300 (GMT-03:00)

Geolocation Latitude: 38.6807995 Longitude: -9.1566962 Accuracy: 1644.5240191105331

IP 95.93.159.190

4 Hash Evidências:

A2CE92C5DA2B1B9EB275402ABF3881789DDD7ABF0DCD563520BCC690EAD59FB3



RESUMO

A detonação é etapa importante na produção de uma mineração, porém é uma fonte de preocupação devido ao seu impacto ambiental associado; em particular, as vibrações induzidas por detonações podem causar danos estruturais e desconforto humano. Por décadas, comunidades próximas às minas a céu aberto reclamam de vibrações induzidas por detonações e, mais recentemente, há crescente preocupação com as vibrações induzidas em estruturas geotécnicas. Este estudo apresenta a aplicação de técnicas para prever e controlar as vibrações induzidas por detonações na Mina de Viga, uma mina de ferro do Quadrilátero Ferrífero, operando próximo a estruturas geotécnicas e estruturas civis com populações próximas. Foram determinadas as cargas máximas por espera compatíveis aos limites de vibração admissíveis para cada estrutura de interesse a partir de um estudo completo com monitoramento sismográfico, determinação de leis de atenuação e recomendação de técnicas de controle de vibração. Foi verificado que a carga máxima por espera e os parâmetros atuais de perfuração e desmonte de Viga atendem aos limites estabelecidos. Por fim, foi observado que a metodologia e recomendações propostas está sendo validada e tem garantido a segurança das estruturas vizinhas à mina bem como a sustentabilidade das operações. Os resultados demonstram que esta metodologia pode ser aplicada a qualquer mina a céu aberto para controlar os efeitos da vibração induzida pela detonação.

Palavras-chave: Vibrações induzidas por detonação. Lei de atenuação. Carga máxima por espera. Danos estruturais. Desconforto humano.

ABSTRACT

Blasting is an important stage in mining production, but it is a source of concern due to its associated environmental impact; in particular, blast-induced vibrations can cause structural damage and human discomfort. For decades, communities near open-pit mines have complained about blast-induced vibrations, and more recently, there has been growing concern about vibrations induced in geotechnical structures. This study presents the application of techniques to predict and control blast-induced vibrations in Mina de Viga, an iron mine in the Cuadrilátero Ferrífero, operating close to geotechnical structures and civil structures with nearby populations. The maximum charge per delay compatible with the allowable vibration limits for each structure of interest were determined from a complete study with seismographic monitoring, determination of attenuation laws and recommendation of vibration control techniques. It was verified that the maximum charge per delay and the current drilling and blasting parameters of Viga meet the established limits. Finally, it was observed that the proposed methodology and recommendations are being validated and have ensured the safety of structures neighboring the mine as well as the sustainability of operations. The results demonstrate that this methodology can be applied to any open pit mine to control the effects of blast-induced vibration.

Keywords: Blasting-induced vibrations. Attenuation law. Charge per delay. Structural damage. Human discomfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha de perfuração estagiada (FONTE: SILVA, 2004)	17
Figura 2 - Malha de perfuração quadrada (FONTE: SILVA, 2004)	18
Figura 3 - Malha de perfuração retangular (FONTE: SILVA, 2004)	18
Figura 4 - Distância da Mina Viga em relação às barragens nível 3 de emergência, Forquilhas 1 e 3.....	29
Figura 5 - Região das detonações da CSN (polígono amarelo) e localização das estruturas geotécnicas. Fonte: TETRATECH (2000)	30
Figura 6 - Localização da mina Viga, escritórios e barramentos da CSN	32
Figura 7 - Geologia local da mina Viga (Fonte: WALM, 2011).....	32
Figura 8 - Secções de estudo geológico da minha Viga (Fonte: WALM, 2011)	33
Figura 9 - Geologia mina Viga SE-NW (Fonte: WALM, 2011).....	33
Figura 10 - Metodologia utilizada nos trabalhos do ITV-MI para trabalhos de controle de vibrações.....	36
Figura 11 - Carga máxima por espera em função da distância para atingir um nível de vibração PVS igual a 0,2 mm/s	37
Figura 12 - Alocação de sismógrafos (em verde) e detonações monitoradas (em vermelho) (adaptado de ITV, 2020)	39
Figura 13 - Gráfico PVS x D x Q obtido via LabFit® para a campanha de monitoramento na mina Viga, sentido CSN (ITV, 2020)	39
Figura 14 - Gráfico PVS x D x Q obtido via LabFit® para a campanha de monitoramento na mina Viga, sentido Dique do Bichento IIIA (pilha norte) (ITV, 2020)	40
Figura 15 - Distância entre o limite da cava da mina de Viga e o Barramento (ITV, 2020). .	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de plano de fogo monitorados (ITV, 2020)	35
Tabela 2 - PVS previstos com bases nas cargas máximas de explosivos por espera aplicados para uma distância de 10 km entre a mina Viga e as barragens nível 3 de emergência.	37
Tabela 3 - Parâmetros empíricos típicos para diferentes litologias (ITV, 2020).....	42
Tabela 4 - Dimensionamento de carga máxima por espera para os diferentes estruturas.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1.	GERAIS	14
2.2	ESPECÍFICOS	14
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1	O PROCESSO DE DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS	15
3.1.1	Plano de fogo e seus elementos.....	15
3.1.2	Mecanismos de ruptura de rochas por explosivos.....	20
3.1.3	Interação explosivos x maciço rochoso	21
3.2.	EFEITOS INDESEJÁVEIS DA DETONAÇÃO.....	22
3.3.	VIBRAÇÕES	23
3.3.1	Técnicas para o controle de vibrações induzidas pelas detonações	26
4	METODOLOGIA	29
4.1.	ESTUDO DE CASO NA MINA DE VIGA	29
4.1.1	Contextualização	29
4.1.2	Localização e geologia-geomecânica local.....	31
4.2.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1.	RESPOSTA TÉCNICA À ANM.....	37
5.2.	ESTUDO DETALHADO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELAS DETONAÇÕES COM O ITV.....	38
5.2.1.	Leis de atenuação de vibrações	38
5.2.2.	Aplicação do estudo para definição da carga máxima por espera.....	42
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46

5 INTRODUÇÃO

Historicamente o desmonte de rochas com explosivos sempre foi baseado na prática e experiência dos blásters e engenheiros que tinham como objetivo principal fragmentar a rocha necessária as etapas seguintes do processo produtivo, mas que muitas vezes negligenciavam a geração de vibrações induzidas pela detonação.

Diferente de outras atividades industriais, a mineração tem sua localidade condicionada a existência de corpos de minério, trazendo uma rigidez locacional aos empreendimentos e muitas vezes se faz necessário que essas empresas se estabeleçam próximas aos centros urbanos, e para continuidade de suas atividades devem cumprir às leis e exigências ambientais que surgem cada vez mais rigorosas.

Como em muitas minas as características geomecânicas das rochas tornam indispensáveis o desmonte de rochas, logo, sempre haverá propagação de vibração no terreno e assim a fiscalização dos órgãos públicos para o cumprimento dessas exigências está sendo intensificadas pela presença de estruturas geotécnicas como pilhas, diques e barragens próximos aos locais de detonação, principalmente após os episódios de rompimento de barragens dos últimos anos. Baseando-se nesses cenários, é imprescindível analisar e entender o comportamento dos desmontes, considerando os parâmetros geológicos e de plano de fogo, e assim aplicar conceitos técnico-científicos para o controle e previsão das vibrações transmitidas pelo terreno detonado com uso de explosivos.

Segundo Dinis da Gama (1998), apenas cerca de 5 a 15% da energia termoquímica liberada no desmonte de rochas é efetivamente aproveitada para fragmentar a rocha. Logo, a maior parte da energia contida nos explosivos é transferida ao ambiente circundante, susceptível de causar efeitos indesejáveis em estruturas geotécnicas, construções e comunidades próximas. Desses efeitos, cinco se destacam: as vibrações transmitidas aos maciços e às estruturas adjacentes, a pressão acústica (*airblast*), as projeções de rocha, as poeiras e a sobreruptura do maciço rochoso.

Atualmente, no contexto das minas do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, bem como em outras que possuem estruturas geotécnicas próximas aos locais onde se realizam detonações e comunidades vizinhas ao empreendimento mineiro, as vibrações constituem a causa mais comum das preocupações devido ao potencial dano nas estruturas, de acordo com Persson, Holmberg & Lee (1994), as tensões dinâmicas

causadas nos desmontes podem exceder a força de sustentação de uma estrutura, e em casos de uma detonação mal projetada, danifica estruturas a quilômetros de distância.

Diante dessa preocupação, esse trabalho apresenta um estudo de caso referente aos impactos das vibrações bem como o controle delas para a Mina Viga, pertencente à Vale S.A, localizada no Quadrilátero Ferrífero em Congonhas-MG, visando evitar danos e assegurar que instalações industriais, escritórios e estruturas geotécnicas não sejam impactadas.

2 OBJETIVOS

2.1. GERAIS

Aplicar técnicas para a realização de desmonte de rochas com explosivos de forma controlada no que diz respeito às vibrações e seus potenciais efeitos em estruturas geotécnicas, construções civis, bem como em comunidades.

2.2 ESPECÍFICOS

- Determinar as leis de atenuação de vibrações específicas por região, por padrão de plano de fogo e por direção em relação às estruturas geotécnicas, instalações industriais e escritórios administrativos.
- Determinar a carga máxima por espera que não cause danos em estruturas, bem como desconforto humano nas proximidades da mina considerando as premissas atuais de lavra.
- Estabelecer técnicas e boas práticas nos planos de fogo visando o controle das vibrações.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O PROCESSO DE DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS

3.1.1 Plano de fogo e seus elementos

Segundo Geraldi (2011), o plano de fogo é o planejamento do desmonte de rochas, onde é contemplado todo o plano de perfuração, qualidade e quantidade de explosivos, esquemas de ligação e iniciação dos furos que serão detonados.

A primeira operação realizada para que se tenha um desmonte de rochas é a perfuração, e tem como objetivo abrir furos no maciço rochoso, seguindo uma geometria adequada, para o alojamento das cargas de explosivos e acessórios de iniciação, e a detonação desses explosivos fornecerá a energia necessária para que o maciço seja fragmentado (JIMENO, 2003).

Existem alguns métodos de perfuração que são mais utilizados atualmente, baseados em sistemas mecânicos que podem ser por rotação ou percussão. De acordo com Alonso et. Al (2013), existe uma forte relação entre perfuração e detonação, e afirma que uma perfuração bem realizada proporciona um resultado satisfatório no processo de detonação.

A escolha do diâmetro dos furos para uma detonação, baseia-se no tamanho desejado do material fragmentado, no tipo carga explosiva a ser utilizada, entre outros. Os furos de grande diâmetro, geralmente são a escolha economicamente viável, por apresentar menor custo por tonelada desmontada, implica em menor quantidade de furos e consequentemente reduz o gasto com os acessórios de detonação. Nesses casos, as razões de carga tendem ser mais altas para que garantir o mesmo grau de fragmentação dos desmontes com furos de diâmetros menores.

Já os furos de menor diâmetro, tem como principal vantagem a melhor distribuição de energia oferecida pelos explosivos devido a menor concentração de carga. Resumidamente, os resultados de um desmonte de rochas podem variar em função do diâmetro de perfuração, ainda que use a mesma razão de carga (MORAIS, 2004).

Torres (2005), afirma que para que se tenha o diâmetro de perfuração ideal, devem ser levados em consideração a capacidade de produção in situ (Pmh), que aplicada nas equações (1) e (2) resultarão no valor adequado de diâmetro:

$$D = 79,4 * \ln Pmh - 350,6 \quad (1)$$

Para rochas com $\sigma_c \leq 120 \text{ MPa}$, ou

$$D = 57,4 * \ln Pmh - 174,0 \quad (2)$$

Para rochas com $\sigma_c > 120 \text{ MPa}$

D: Diâmetro de perfuração (mm)

Pmh: Capacidade de produção in situ (m³/h)

Além da perfuração, existem outros elementos importante dentro de um plano de fogo, como afastamento e espaçamento dos furos, tipos de malha, altura da bancada, e por fim os tipos de explosivos e acessórios juntamente com suas quantidades.

Segundo Herrmann (1968), afastamento é a distância entre a face livre e o furo. A escolha do valor de afastamento depende das propriedades da rocha, tipo de explosivo utilizado e diâmetro do furo. Ainda afirma que dos elementos de um plano de fogo, o afastamento é o mais importante, uma vez que valores muito diferentes do considerado ótimo, o desmonte pode ter consequências indesejáveis.

O valor de afastamento ideal pode ser calculado pela fórmula empírica expressa na equação (3) (SILVA, 2004):

$$B = 0,0123 \times \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times D_e \quad (3)$$

Em que B é o afastamento, ρ_e é a densidade do explosivo (g/cm³), ρ_r é a densidade da rocha (g/cm³) e D_e é o diâmetro do explosivo (mm).

Outro elemento é o espaçamento (S), ele representa a distância existente entre dois furos da mesma linha, sendo definido comumente em função do afastamento, variando de 1,1 a 1,5 vezes o valor de afastamento.

Oliveira (2017) afirma que os valores de afastamento e espaçamento influenciam diretamente na qualidade do resultado do desmonte, sendo que para espaçamento, se

tiver valores elevados podem reduzir a regularidade da distribuição granulométrica além de irregularidades no pé da bancada. Para valores muito baixos, podem ocasionar a formação de matacos por contato prematuro entre os furos.

O espaçamento também pode ser calculado através da fórmula empírica expressa na equação (4) (SILVA, 2004), porém existem várias formulas na literatura, devendo ser ajustada conforme caso em questão (tipo de rocha, altura de bancada, tipo de explosivo).

$$S = 0,23 \times (H + 2B) \quad (4)$$

Em que S é o espaçamento (m), H a altura da bancada (m) e B o afastamento (m).

Complementando o afastamento e espaçamento, tem-se as malhas de perfuração em diferentes tipos, cada uma com suas particularidades trazendo vantagens e desvantagens.

As malhas de perfuração podem ser estagiadas, retangulares, quadradas, triangulares ou alongadas (SILVA, 2004).

- Malha Estagiada

Nesse tipo tem-se uma melhor distribuição da carga explosiva, geralmente resulta em melhor fragmentação (Figura 1).

Figura 1- Malha de perfuração estagiada



Fonte: SILVA, 2004

- Malha Retangular/Quadrada

Para esse tipo de malha, tem-se uma distribuição de carga inferior a da estagiada, porém tem maior facilidade de perfuração. Na quadrada os valores de espaçamento e afastamento são iguais, e na retangular pode variar espaçamento ou afastamento (Figura 2 e 3).

Figura 2 -Malha de perfuração quadrada



Fonte: SILVA, 2004

Figura 3 - Malha de perfuração retangular



Fonte: SILVA, 2004

De acordo com Silva (2004), a determinação da distribuição dos furos é muito importante, em casos de malhas muito fechadas pode resultar em uma granulometria muito fina, e para malhas muito abertas pode resultar em grandes quantidades de blocos.

Outro elemento importante para os bons resultados do desmonte é altura da bancada, que está diretamente relacionada com a obtenção de face livre bem estabelecidas, gerando melhores resultados nos desmontes. A altura da bancada pode variar de 6 a 20 metros dependendo do porte da mina, em que essa altura é definida conforme os equipamentos de perfuração, carga e transporte disponíveis na operação.

Por fim, além das geometrias do plano de fogo, tem-se a escolha do explosivo juntamente com os acessórios de detonação.

Define-se como explosivos, compostos químicos que quando estimulados por uma fonte de energia sofrem uma decomposição brusca extremamente rápida, onde liberam elevadas quantidades de gases e pressão, capazes de provocar a ruptura de qualquer maciço rochoso (GERALDI, 2011).

Segundo Gregory (1973), existem dois tipos de explosivos, os deflagrantes e detonantes. Os deflagrantes são aqueles explosivos lentos, com velocidade inferior a 2000 m/s, e atualmente é rara sua utilização, um bom exemplo é a pólvora negra. Já os

detonantes são os explosivos de alta velocidade, em que sua reação acontece em uma velocidade acima de 2000 m/s, além de propagar uma onda constante capaz de fragmentar e triturar.

Existe ainda uma subdivisão dentro desses explosivos de alta velocidade, relacionando suas características e aplicação, são eles os explosivos primários e secundários, sendo que os primários possuem alta capacidade energética e sensibilidade, sendo utilizados como iniciadores dos secundários, e os secundários realizam o trabalho de arranque.

De acordo com Jimeno (2003), os explosivos mais usados são ANFOS e emulsões. Os ANFOS são compostos de nitrato de amônia e óleo combustível, e são indicados para furos sem presença de água. As emulsões apresentam características otimizadas em relação aos outros explosivos, principalmente relacionada a resistência à água, possuem facilidade de manuseio.

Escolhido o tipo de explosivo, é necessário escolher os acessórios de detonação, que são responsáveis pela iniciação dos explosivos, ou seja, proporcionarão a carga energética necessária para a detonação, os mais utilizados são:

- Estopim: cordão de pólvora revestido de algodão, utilizado para iniciar a espoleta simples.
- Espoleta Simples: estojo de alumínio contendo carga sensível a iniciação térmica
- Espoleta Elétrica: parecida com a espoleta simples, porém utiliza a energia elétrica como fonte de energia para iniciação.
- Boosters: carga explosiva destinada a iniciar explosivos de baixa sensibilidade como o ANFO e emulsões bombeadas.
- Espoleta eletrônica: cápsula geralmente de cobre ou alumínio contendo carga de azida de chumbo e Tetra Nitrato de Penta Eritritol. Contém ponte de fio de alta resistência (inflamador) e um circuito eletrônico que contém um microchip inteligente e dois capacitores eletrônicos - um para assegurar a autonomia do detonador e o segundo para iniciar o inflamador. É utilizada para iniciar altos explosivos comerciais sensíveis à espoleta, e na detonação de boosters.

- Cordel Detonante: cordão com alta capacidade de transmissão de energia, sensível a iniciação por espoleta simples ou elétrica.
- Retardos: utilizados para gerar um intervalo de tempo entre as detonações.

Importante destacar que na Mina Viga, pertencente à Vale S.A utiliza-se 100% a tecnologia de iniciação e detonadores eletrônicos desde o ano de 2020. Sendo o caso mais comum, a utilização de escorva com espoleta eletrônica mais booster para a iniciação de emulsão bombeada e ANFO

3.1.2 Mecanismos de ruptura de rochas por explosivos

Existem basicamente quatro eventos que ocorrem durante e após a detonação de uma carga confinada, a detonação, a propagação de ondas de choque, expansão de gases e o movimento de massa (ATLAS POWDER COMPANY, 1987).

A detonação é a fase inicial do processo de fragmentação, os elementos que compõem os explosivos são instantaneamente convertidos em gases com alta pressão e temperatura. Em seguida, tem-se a propagação das ondas de choque que ocorrem imediatamente após a detonação, e essa propagação acontece através do maciço rochoso, nada mais é que a rápida expansão dos gases que gerarão impactos nas paredes dos furos. Segundo Langefors (1973), as primeiras fissuras na rocha aparecem em frações de mili-segundos após a detonação e a geometria da dispersão da onda depende de fatores como localização do ponto inicial, velocidade de detonação e da onda de choque no maciço. Quando a onda encontra uma descontinuidade, uma parte da energia é disseminada através dela e outra parte refletida, dependendo do contraste entre as impedâncias do meio. No momento em que essa onda encontra a face livre, toda sua energia é refletida como tração, onde geram as fraturas.

O próximo evento é a expansão dos gases que acontece através das fraturas e descontinuidades, que combinado com o esforço propagado ao maciço na detonação são responsáveis pelo movimento da massa, ou seja, pelo deslocamento do material fraturado.

Por fim, tem-se o movimento de massa, nesse estágio a maior parte da fragmentação já ocorreu, mas ainda sim algum grau de fragmentação ocorre durante a colisão do material.

3.1.3 Interação explosivos x maciço rochoso

Alguns autores desenvolveram modelos e explicaram a interação existente entre o explosivo e o maciço rochoso, considerando curvas de pressão x volume para a explosão dos gases desde o início da explosão até alcançar a face livre, ou quando a pressão dos gases cai abaixo da pressão atmosférica ou ainda quando a temperatura dos gases cai abaixo da temperatura ambiente (SCOTT *et al.*, 1996).

De acordo com Sarma (1994), quando um explosivo detona são gerados produtos gasosos e altas pressões e temperatura. Esses gases impactam a parede do furo e transmitem a onda de choque para rocha próxima, a tensão resultante dessa interação comprime e fragmenta a rocha em torno do furo.

Os modelos gerados identificam algumas propriedades do maciço rochoso que são fundamentais no resultado do desmonte, são elas: rigidez da rocha, resistência a compressão dinâmica, parâmetros de atenuação do maciço rochoso, resistência a tração dinâmica da rocha, orientação e descontinuidade no maciço e a densidade da rocha, e a partir disso, criaram a correlação desses parâmetros para que seja considerado na escolha do explosivo, na sua distribuição e como será iniciada a detonação.

De acordo com Hagan (1977), algumas dessas correlações são:

- a ausência de fraturas ou descontinuidades aumenta o esforço da detonação requerido para atingir um determinado grau de fragmentação. No entanto, vale destacar que blocos de rocha podem estar pré-formados por descontinuidades e caso não seja contemplado com furação e carga explosiva, há grandes chances de apenas se deslocar formando os chamados “matacos”, gerando necessidade de desmonte secundário.
- rochas resistentes requerem maior energia de choque para criar novas fraturas primárias.
- rochas macias ou plásticas tendem a absorver a energia de choque e requerem mais energia de deslocamento para criar uma pilha com material mais solto ou frouxo.
- rochas com altas densidades requerem mais energia para afrouxar e deslocar o material, do que rochas de baixa densidade.

3.2. EFEITOS INDESEJÁVEIS DA DETONAÇÃO

Existem alguns efeitos decorrentes das detonações que estão associados a como a energia liberada pelos explosivos é dissipada. Nem toda energia gerada é transformada em trabalho útil, uma parte dessa energia se dissipa como vibração e sobrepressão atmosférica, trazendo alguns impactos como ultralancamentos, ruído e pressão acústica, overbreak e as próprias vibrações que podem afetar estruturas próximas ou não ao raio de detonação.

- Ultralancamento

O ultralancamento é definido como “arremesso de fragmentos de rocha decorrente do desmonte com uso de explosivos, além da área de operação” (ABNT, 2015).

Segundo Ferreira *et al.* (2006), os eventos de ultralancamento representam grande perigo, principalmente pela possibilidade de gerar vítimas fatais ou sérios danos materiais. As principais causas desse fenômeno: faturamento, cavidades, plano de fogo impróprio, exagero na razão de carga, tamponamento ineficaz, ou afastamento subdimensionado (SILVA, 2004).

- Ruído e sobrepressão atmosférica

Define-se sobrepressão atmosférica como a propagação de uma onda elástica que percorre a atmosfera. Segundo Eston (1998), considera-se ruído uma faixa de sobrepressão com frequência acima de 20 Hz e abaixo de 20.000 Hz. Em um desmonte, a liberação de gases através de fraturas, detonação de explosivos não confinados e refração das ondas sísmicas através da atmosfera são as principais causas para geração de sobrepressão, podendo gerar incômodos à vizinhança ou até mesmo danos em estruturas.

O limite nacional de sobrepressão admitido pela ABNT NBR 9653:2018 é de um máximo de 134dB(L), considerando o ambiente externo ao empreendimento mineiro no que tange a avaliação de danos estruturas. Já a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) DD-052 de 2015, recomenda-se como limite máximo 128 dB(L) no que tange à avaliação do desconforto humano.

- Overbreak

Alguns autores definem como Overbreak, a subtração entre o volume real pelo volume planejado, ou seja, fragmentação ou deslocamento de um material que não estava considerado no desmonte, aquele além da última linha de perfuração, além disso pode trazer problemas de aderência ao plano e riscos geotécnicos para a bancada.

- Vibrações

As vibrações são movimentos sísmicos provenientes da resposta do maciço rochoso as perturbações causadas pelas propagações das ondas sísmicas nesse caso liberadas pela detonação das cargas explosivas.

Segundo Persson, Holmberg e Lee (1994), o movimento da onda de choque se propaga de maneira radial iniciando no ponto de detonação, e é atenuada com a distância que a onda se propaga, com as características do maciço e intensidade das ondas, que são resultados da quantidade de energia transmitida ao maciço.

3.3. VIBRAÇÕES

Dentro os efeitos indesejados do desmonte de rochas, daremos ênfase nas vibrações, principalmente por ser um subproduto inevitável da detonação que além de gerar desconforto nas populações vizinhas, tem grande potencial de dano às estruturas próximas, tantos residenciais quanto industriais.

Sanches (1995), afirma que esse problema vem sendo estudado há algumas décadas, buscando a correlação empírica entre a energia de vibração e suas probabilidades de danos, considerando a quantidade de carga detonada, distância entre pontos de desmonte e estruturas e limites máximos de vibração admissíveis.

Dentre esses fatores que podem influenciar o nível de vibração, alguns podem ser modificados e outros apesar de ter grande influência, não podem ser modificados. Seguem alguns fatores:

- Carga máxima por espera: esse é um dos fatores controláveis e modificáveis, se trata da carga de explosivo a ser detonada em determinado instante, a partir da sequência de iniciação da detonação.

- Distância: pode ou não ser modificado, é definida como a distância em metros entre o ponto do desmonte e o ponto de monitoramento (ponto de interesse).
- Plano de fogo: pode ser modificado conforme a necessidade, se trata das geometrias propostas para detonação (afastamento, espaçamento, nº de furos, etc.)
- Geologia local: não pode ser modificada, apesar de ser um fator com forte influência no nível de propagação da vibração. Considera-se a mineralogia e litologia local, bem como a presença ou não de falhas, fraturas ou dobras no maciço rochoso.

As ondas propagadas têm sua energia reduzida em todo seu deslocamento, iniciando em sua fonte, isso se dá pela distância percorrida e a absorção pelo meio. Essa taxa de redução depende de alguns fatores como a amplitude da onda, o fator de transmissibilidade da rocha, velocidade de propagação no meio, entre outros que serão abordados posteriormente.

Segundo Bernardo (2004), as principais características das ondas são:

- Período (s): tempo necessário para completar um ciclo.
- Deslocamento de partícula (mm): distância percorrida por uma partícula, a partir de sua posição de repouso
- Velocidade de vibração (mm/s): deslocamento das partículas, causado pela passagem da onda, por unidade de tempo.
- Aceleração (mm/s^2): taxa em que se altera a velocidade das partículas, por unidade de tempo.
- Frequência (Hz): número de vibrações ou oscilações por segundo, medida na unidade de Hertz (Hz).
- Comprimento de onda (mm): comprimento de um ciclo completo.
- Velocidade de partícula de pico (mm/s): máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante determinado intervalo de tempo.

Persson, Holmberg e Lee (1994), afirmam que o pico da velocidade das partículas (PPV) é considerado como parâmetro confiável para as vibrações causadas pelo desmonte de rocha, assumindo que a energia total da movimentação gerada em torno de uma detonação varia de acordo com a carga de explosivo detonada e a distância do ponto da detonação.

O PPV pode ser encontrado a partir da equação (5)

$$PPV = \beta(SD)^\alpha \quad (5)$$

Onde,

PPV: velocidade de pico da partícula (mm/s)

β e α : constantes específicas da geologia do terreno

SD: distância escalonada ($m/Kg^{1/2}$) – para vibração (divisão da distância pela carga máxima por espera)

Segundo a norma NBR 9653 (2018), a velocidade de vibração de pico não deve ultrapassar 15 mm/s em uma frequência de 4Hz, para que não haja dano estrutural em construções além do empreendimento mineiro.

Para CETESB, a velocidade de vibração resultante em um dado instante não deve ultrapassar 4,2 mm/s fora dos limites do empreendimento, considerando o incômodo humano relacionado ao desmonte de rocha.

Além das referências brasileiras, existem outras normas internacionais que apresentam diferentes limites de velocidade levando em conta a frequência, além das características das estruturas, dentre elas estão a DIN 4150 (norma alemã), BS 5228, BS 6472, BS 7385, sendo essas normas inglesas, NP 2074 (norma portuguesa).

Segundo Bacci (2003), a NBR é considerada deficiente quando comparada às normas internacionais por não considerar diferentes litologias nem estruturas específicas, por isso, uma boa parte dos estudos utilizam os valores estabelecidos pela CETESB por limitar mais rigorosamente os níveis de vibração.

Para identificar se as atividades estão dentro dos valores estabelecidos pelas normas, é necessário a realização de medidas através de sismógrafos. Normalmente são utilizados sismógrafos de engenharia para medições sismográficas. Os geofones são

responsáveis pelo registro das ondas sísmicas e os sismógrafos, por medir a intensidade das vibrações e podem medir a sobrepressão atmosférica. Logo, esses equipamentos têm sua utilização em conjunto, já que um complementa o outro, gerando gráficos com a descrição do comportamento das ondas.

De acordo com Moura e Neto (2016), é considerado processo crítico nos testes de sismografia a instalação dos equipamentos, pois podem influenciar diretamente nos resultados das medições. Garantir a adequada fixação sobre a superfície garante que a vibração medida é proveniente dessa mesma superfície, evitando a interferência de outras movimentações nas proximidades.

Dentre os materiais utilizados para fixar os geofones estão as fitas adesivas, epóxi, gesso, parafusos, dentre outros, escolhidos conforme as características do local de acoplamento.

Geralmente os equipamentos são acompanhados de alguns softwares responsáveis por gerar gráficos de relação entre velocidade de frequência das partículas além de relatórios com medidas de velocidade vertical, transversal e longitudinal, velocidade resultante e níveis de pressão acústica (sobrepressão atmosférica).

A partir da consolidação de todos os dados obtidos, e geração de um banco de dados contendo informações de vibrações, plano de fogo, parâmetros geológicos, pontos de monitoramento com suas respectivas distâncias da fonte, é possível determinar leis de atenuação para as vibrações e assim prever a atenuação das ondas de determinado local.

3.3.1 Técnicas para o controle de vibrações induzidas pelas detonações

Com a necessidade cada vez maior de prever o comportamento das vibrações e a tentativa de mitigar os impactos causados por elas, alguns métodos foram desenvolvidos ao longo de anos de estudo e trazem como resultados equações que podem auxiliar a estimar a velocidade das ondas e a partir disso avaliar os possíveis danos as estruturas.

Conforme citado anteriormente, a velocidade resultante é uma das formas de avaliação das vibrações induzidas pelas detonações na área de desmonte de rochas e essa velocidade é determinada a partir da soma vetorial dos maiores valores de cada

componente (longitudinal, vertical e transversal) em um determinado intervalo de tempo, como pode ser visto na equação (6):

$$vp = \sqrt{vl^2 + vv^2 + vt^2} \quad (6)$$

Onde:

vp: velocidade de vibração da partícula, PVS – *peak vector sum* (mm/s)

vl: velocidade de vibração da partícula na direção da propagação da detonação (longitudinal) (mm/s)

vv: velocidade de vibração da partícula na direção vertical (mm/s)

vt: velocidade de vibração da partícula na direção transversal (mm/s)

Em uma outra abordagem, Wiss (1981), sugeriu um outro modelo de equação o qual considera a distância como variável principal que é influenciada pelo coeficiente K que relaciona o valor de V para uma unidade de distância e por um coeficiente de atenuação n .

$$V = kD^{-n} \quad (7)$$

A determinação dos valores de k e n vem através de processos estatísticos, a partir de um banco de dados com medições de velocidades de vibração e distâncias correspondentes.

Outras discussões trouxeram mais um modelo de atenuação, Leconte (1967) propôs uma equação com base em um primeiro modelo apresentado por Morris (1950), em que considera a carga máxima por espera, distância, características geológicas e a soma vetorial das velocidades, que pode ser descrita pela equação (8):

$$vp = K * (Q^{1/2}/D) \quad (8)$$

em que:

vp: soma vetorial das velocidades de partícula (mm/s)

K: constante característica da rocha

Q: carga máxima por espera (kg)

D: distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento (m)

Dentre as equações propostas para descrever o comportamento das ondas sísmicas geradas por desmonte de rocha, uma muito utilizada no meio científico é a comumente atribuída a Johnson (1971). equação (9), que traz a forma geral das leis de atenuação de vibração.

$$v = \alpha Q^b D^c \quad (9)$$

onde,

v: velocidade de vibração máxima resultante (mm/s)

Q: carga máxima por espera (kg)

D: distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento (m)

α, b, c : constantes da litologia local e particularidades da detonação

Obs: Também pode ser utilizado a medida PPV (peak particle velocity – velocidade de vibração da partícula de pico em alguma das componentes ortogonais ao geofone: vertical, longitudinal, transversal) ao invés de PVS. No entanto como PVS é maior que PPV, muitas vezes utiliza-se o PVS para simulações e dimensionamentos com intuito de uma análise conservadora, a favor da segurança.

4 METODOLOGIA

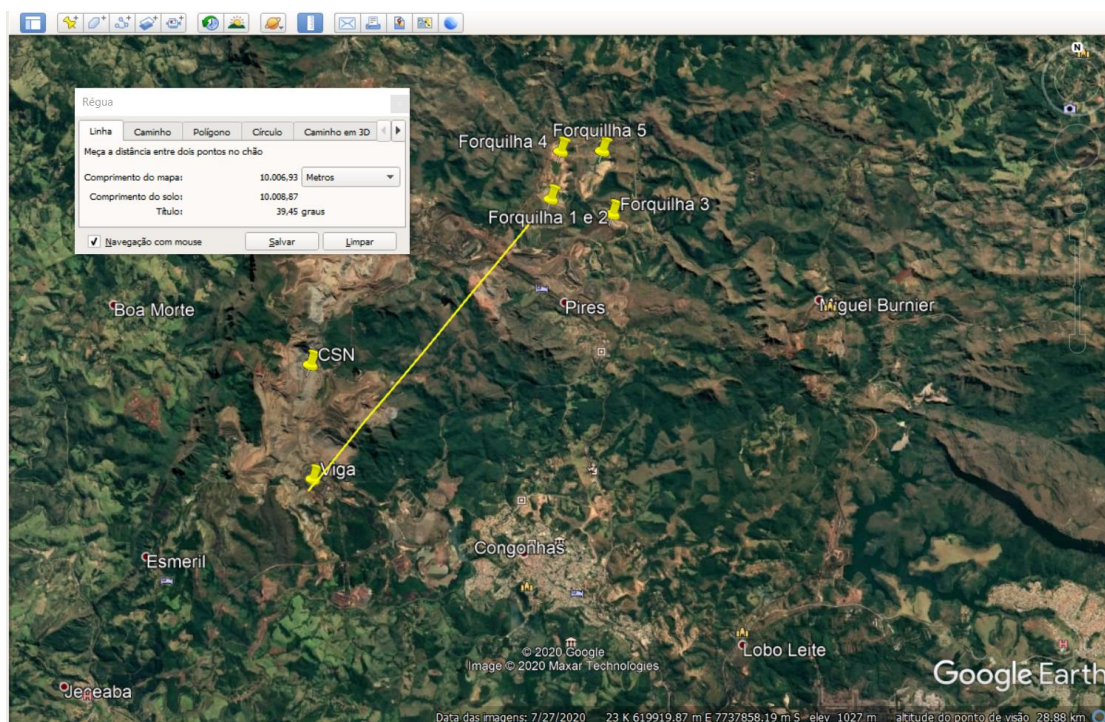
4.1. ESTUDO DE CASO NA MINA DE VIGA

4.1.1 Contextualização

Em agosto de 2020 a Vale S.A recebeu um Ofício da ANM-Agência Nacional de Mineração no qual devido à existência de barragens de mineração em nível 3 nas imediações de Viga, solicitava-se além de base de dados de detonação e monitoramento sísmico, limitar a carga máxima por espera de explosivo em sessenta por cento do utilizado nos últimos seis meses referentes a partir da data do ofício, dado à preocupação com a indução de vibrações nas referidas estruturas geotécnicas.

No caso em questão, as barragens mais próximas com nível 3 de emergência da Mina Viga, são as Forquilha 1 e 3 da Mina Fábrica. No entanto, a menor distância entre a mina e as estruturas são mais de 10 km como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Distância da Mina Viga em relação às barragens nível 3 de emergência, Forquilha 1 e 3.

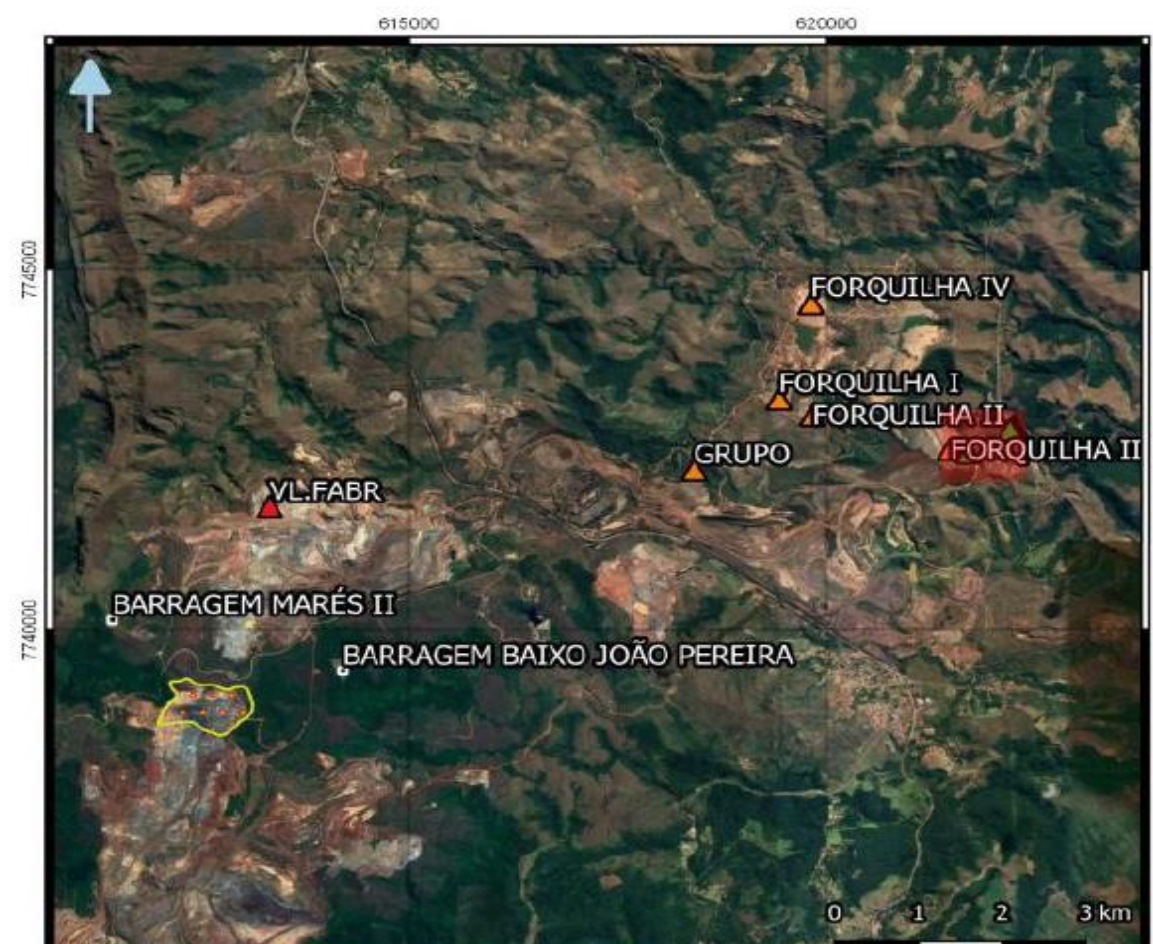


Fonte: Google Earth, 2021

No ano de 2020, a empresa TETRATECH® realizou um estudo da caracterização das vibrações induzidas pelas detonações da empresa CSN em algumas

estruturas geotécnicas da Mina Fábrica, incluindo as barragens: Forquilhas I, II, III e IV, Marés II e Baixo João Pereira (Figura 5). Como retorno a esse trabalho a empresa Rizzo International emitiu a Carta R10 de 30 de julho de 2020, onde reafirma o limite máximo admissível de PVS igual a 0,2 mm/s para as estruturas citadas.

Figura 5 - Região das detonações da CSN (polígono amarelo) e localização das estruturas geotécnicas.



Fonte: TETRATECH, 2020.

O estudo encontrou a lei de atenuação de vibrações conforme equação (10) para o contexto das detonações da empresa CSN próximas às referidas em estruturas na Mina Fábrica, ou seja, na mesma região onde se encontra a Mina Viga e as barragens nível 3 de emergência, com características geológicas e topográficas muito semelhantes. Logo, tal lei de atenuação de vibrações pode ser interpretada como um modelo útil de previsão inicial de vibrações para o caso de Viga, na ausência de estudos mais detalhados no local.

$$PVS = \frac{5,9 \cdot 10^4 \cdot Q^{0,7}}{D^{2,12}} \quad (10)$$

Diante do exposto, duas frentes de atuação foram traçadas:

- Resposta à ANM: apresentação da base dados referente aos dados de detonação e sísmica solicitada e simulação dos níveis de vibrações induzidas pelo desmonte de rocha com explosivos para os valores de carga máxima por espera nas barragens de Forquilhas 1 e 3 com base em modelo científico de atenuação já estabelecido para o contexto das minas de ferro da região na qual a Mina Viga, ex-Ferrous Resources do Brasil está situada, região do Quadrilátero Ferrífero
- Estudo completo de vibrações induzidas pelo desmonte de rochas com explosivos em parceria com o ITV – Instituto Tecnológico Vale contemplando padrões de plano de fogo por regiões e possíveis diferenças direcionais em estruturas muito mais próximas que as situadas em Fábrica, no sentido do Dique de Bichento IIIA, instalações da CSN e suas barragens.

4.1.2 Localização e geologia-geomecânica local

A Mina Viga está localizada no município de Congonhas em Minas Gerais, fazendo divisa com a mina Casa de Pedra da CSN e conforme mostrado na Figura 6 a área de lavra da mina está próxima do escritório administrativo da CSN e observa-se estruturas geotécnicas também no entorno, a saber: Dique de contenção de sedimentos Bichento (a oeste na figura) a cerca de 1,5 km de distância das áreas de detonação e duas barragens à leste das áreas de desmonte em distancias aproximadas de 3,5 km e acima de 4 km

.

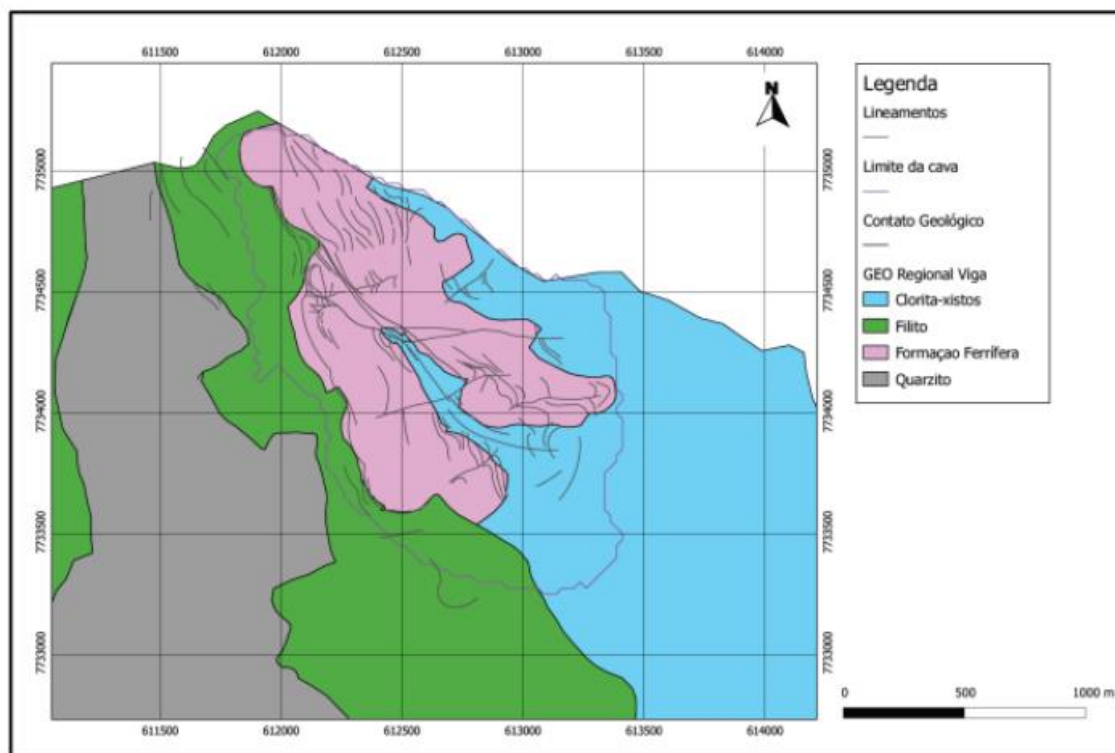
Figura 6 - Localização da mina Viga, escritórios e barramentos da CSN.



Fonte: ITV, 2020.

No que tange à geologia local, observa-se na região da cava uma formação ferrífera composta principalmente por itabiritos silicosos e encaixantes de xistos e filito e um pouco mais afastado os quartzitos (Figura 7)

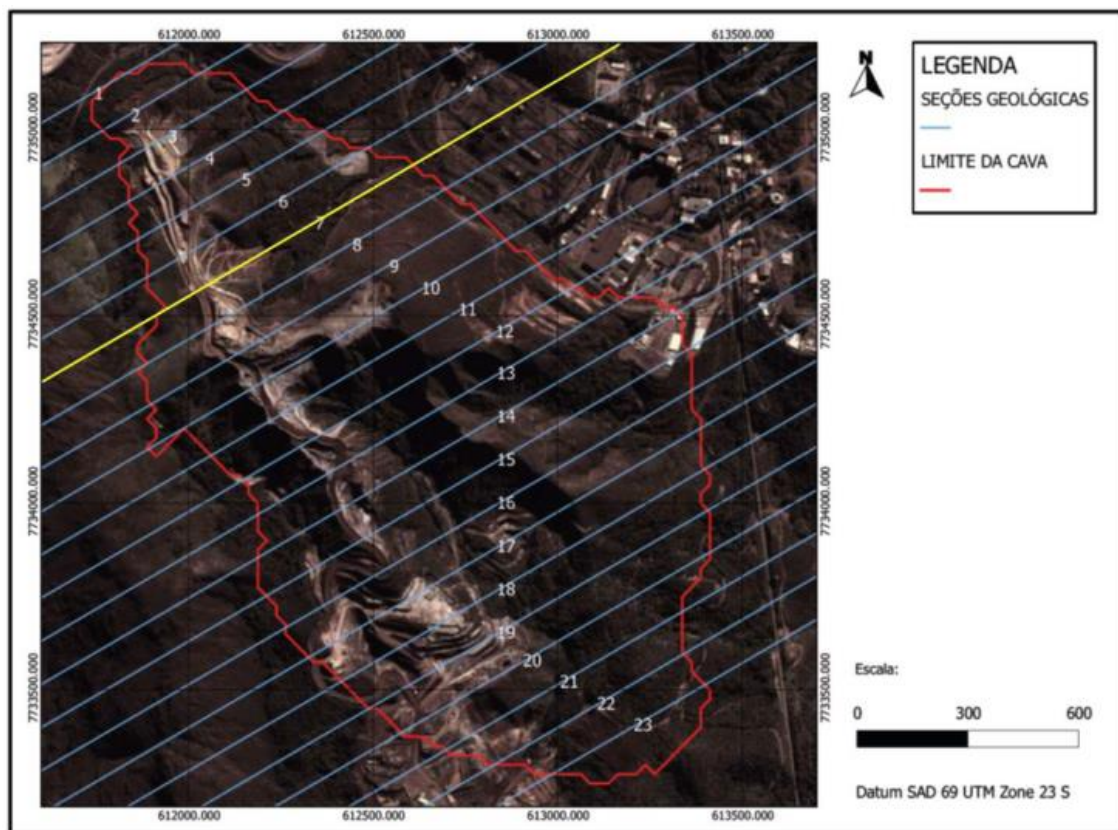
Figura 7 - Geologia local da mina Viga



Fonte: WALM, 2011

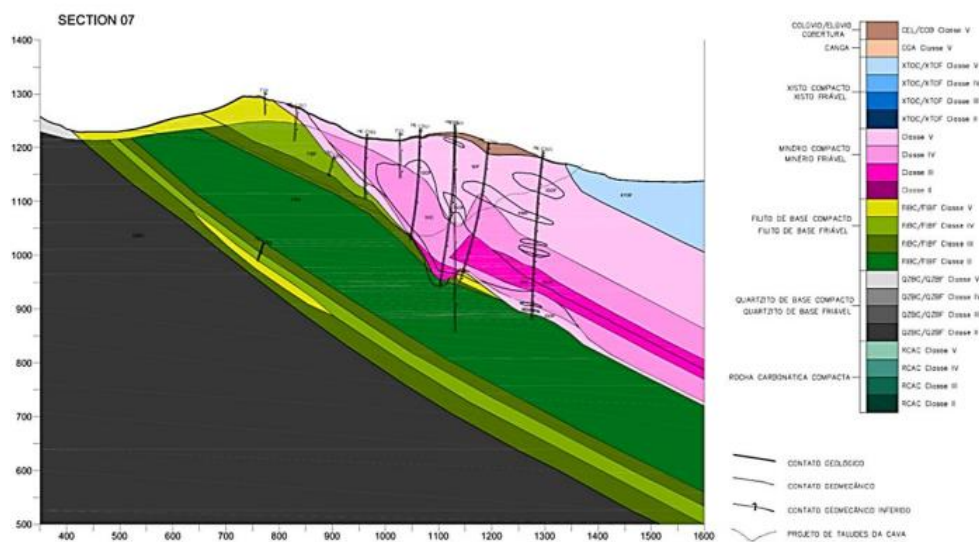
Ao analisar uma seção geológico-geomecânica na área de lavra de Viga, observa-se uma variação de camadas de rochas compactas e friáveis dentro das litologias supracitadas (Figuras 8 e 9).

Figura 8 - Secções de estudo geológico da minha Viga



Fonte: WALM, 2011

Figura 9 - Geologia mina Viga SE-NW



Fonte: WALM, 2011

Logo, verifica-se uma geologia complexa com a onda gerada pela detonação possivelmente percorrendo várias camadas distintas a depender do local onde os furos com explosivos forem detonados e da direção observada para as várias estruturas geotécnicas, daí a importância de se realizar monitoramentos sismográficos em várias direções e realizar detonações nas diferentes áreas da mina.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. Resposta técnica à ANM

Simulação de vibrações induzidas pelas detonações em Viga, utilizando a lei de atenuação já estabelecida para a região/contexto geológico semelhante (equação 10), com base nos valores de carga máxima por espera praticados nos últimos 6 meses e na distância mínima dos desmontes em Viga até as barragens em nível 3 de emergência mais próximas e por fim comparação com o limite máximo de vibração admissível de PVS igual a 0,2mm/s reafirmado na Carta R10 de 30 de julho de 2020 da *Rizzo International*.

4.2.2. Estudo técnico-científico de caracterização de vibrações com o ITV

A metodologia utilizada pelo ITV (ITV, 2020) se deu a partir dos seguintes passos:

- Reconhecimento dos limites de lavra atuais e futuros da Mina de Viga bem como das características geológico-geotécnicas e topográficas que ocorrem entre as áreas de detonação e as estruturas geotécnicas e administrativa da CSN mediante modelos topográficos, geológicos e geotécnicos disponíveis, bem como visitas em campo;
- Planejamento e realização de uma campanha de monitoramento das vibrações causadas pelas detonações com seis sismógrafos de engenharia pertencentes ao Instituto Tecnológico Vale, da marca Instantel do modelo Micromate (Figura 9), com geofone triaxial. A instalação dos geofones obedeceu as indicações exigidas pela norma técnica NBR 9653:2018 no que diz respeito à instalação e método de fixamento no terreno, registrando as vibrações pico (PPV) nas três direções (transversal, vertical e longitudinal) e a resultante (PVS), frequência e cargas máximas explosiva por espera (Q) que deram origem às vibrações registradas. Cálculo da distância (D) entre a fonte de vibração e o ponto monitorado

mediante alocação dos pontos com coordenadas UTM (Universal Transversia Mercator) com o uso de GPS Mobile Topographer. Tal alocação de sismógrafos foi escolhida de modo a verificar como a onda sísmica de vibração se atenuava nas diferentes direções e atingia as estruturas. As fontes de vibração foram 13 detonações de produção utilizando emulsão IBEMUX e ANFO ANFOMAX da marca Enaex. Os desmontes monitorados durante a campanha abrangeram parâmetros variados dos planos de fogo conforme Tabela 1. Para os desmontes forma utilizados sistemas eletrônicos de detonação, através da utilização dos acessórios: Brinel Coluna 09 mts 300 ms, Cabo DVT, DVT OP detonador eletrônico 20 m e reforçador booster 450 g, também da marca Enaex.

Tabela 1 - Parâmetros de plano de fogo monitorado

Parâmetro	Média	Min	Mediana	Max	Moda
H (m)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
D (mm)	146.05	146.05	146.05	146.05	146.05
Nº de furos	211	150	200	317	200
Afastamento (m)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
Espaçamento (m)	4.50	4.00	4.50	5.00	5.00
Tampão (m)	2.89	2.00	2.50	4.00	2.50
Qmax/ret (kg)	47.36	29.00	47.50	65.00	60.00

Fonte: ITV, 2020

Tratamento estatístico dos dados, retirada de *outliers* através de métodos estatísticos e métodos manuais como a plotagem de gráficos das variáveis individualizadas.

- Determinação da lei de atenuação das vibrações para as distintas direções preferenciais das detonações às estruturas geotécnicas de interesse, utilizando técnicas de regressão múltipla com o uso do software LABFit® para a equação (9), citada na revisão bibliográfica.
- Elaboração da curva de isovalores de vibrações, caso julgar necessário para uma melhor visualização da atenuação das vibrações, recalculadas com a equação (9) para uma dada carga máxima por espera através do uso do software Surfer® com o método de interpolação krigagem, tendo em consideração a fonte de vibração (detonações na mina) e as estruturas a se proteger.
- Cálculo da carga explosiva máxima por espera (Q) condicionado pela distância mínima entre as estruturas a se proteger e a mina, e pela velocidade de vibração

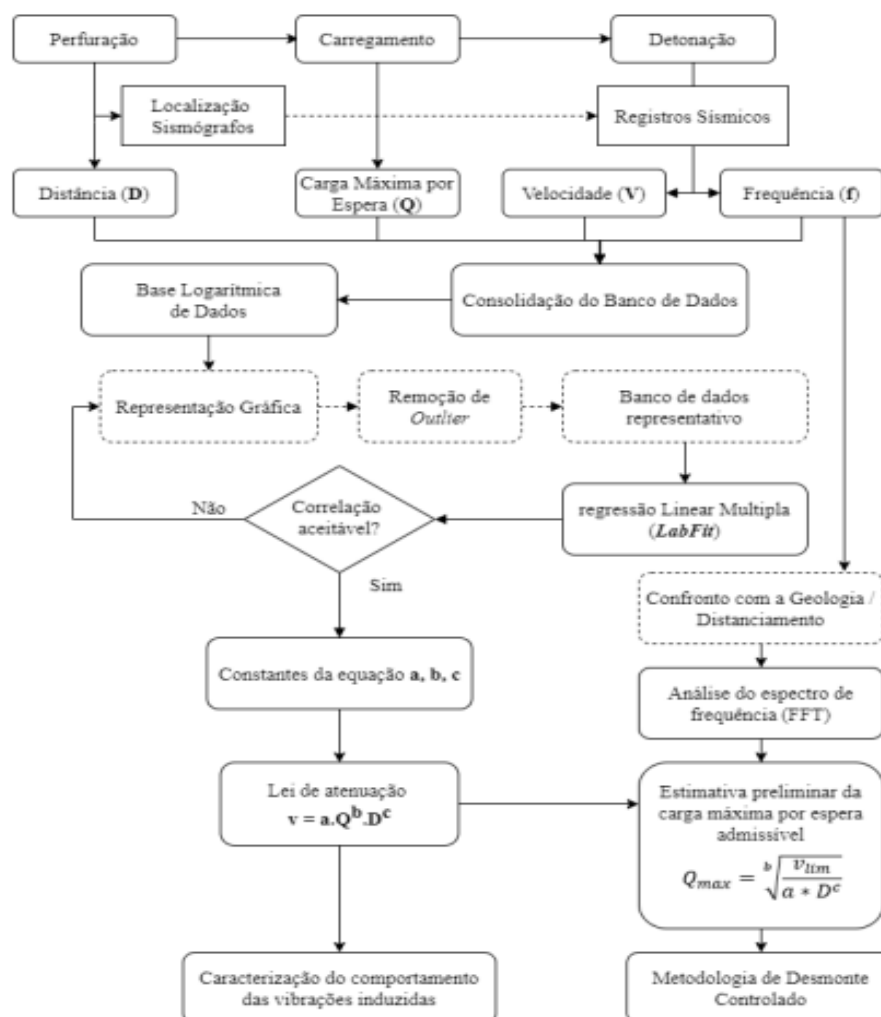
admissível (v_{lim}) considerada pelos padrões/normas em vigor para danos estruturais e incômodo humano ou nível de vibração máximo admitido estabelecido mediante o estudo a partir da equação (9), equação (9 a), considerada pelos padrões/normas em vigor para danos estruturais e incômodo humano ou nível de vibração máximo admitido estabelecido mediante o estudo.

$$Q_{max} = (v_{lim} \cdot a^{-1} \cdot D^{-c})^b \quad (9 a)$$

- Recomendações de técnicas a serem aplicadas no desmonte de rochas com explosivos para controle das vibrações induzidas considerando cada caso de interesse.

A Figura 10 mostra um fluxograma simplificado da metodologia deste trabalho.

Figura 10 - Metodologia utilizada nos trabalhos do ITV-MI para trabalhos de controle de vibrações.



5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESPOSTA TÉCNICA À ANM

Com base nos valores mínimos, médios e máximos de carga máxima por espera praticados nos últimos 6 meses e na distância entre as detonações da Mina Viga e as barragens Forquilhas 1 e 3 (10 km), calculou-se mediante a lei de atenuação (equação 3) o nível de vibrações, em termos de PVS, que as detonações em Viga poderiam induzir como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - PVS previstos com bases nas cargas máximas de explosivos por espera aplicados para uma distância de 10 km entre a mina Viga e as barragens nível 3 de emergência.

Descrição	Carga máxima por espera (kg)	PVS (mm/s)
Mínimo	12	0,0011125
Média	58,57	0,003375
Máxima	76	0,0040497

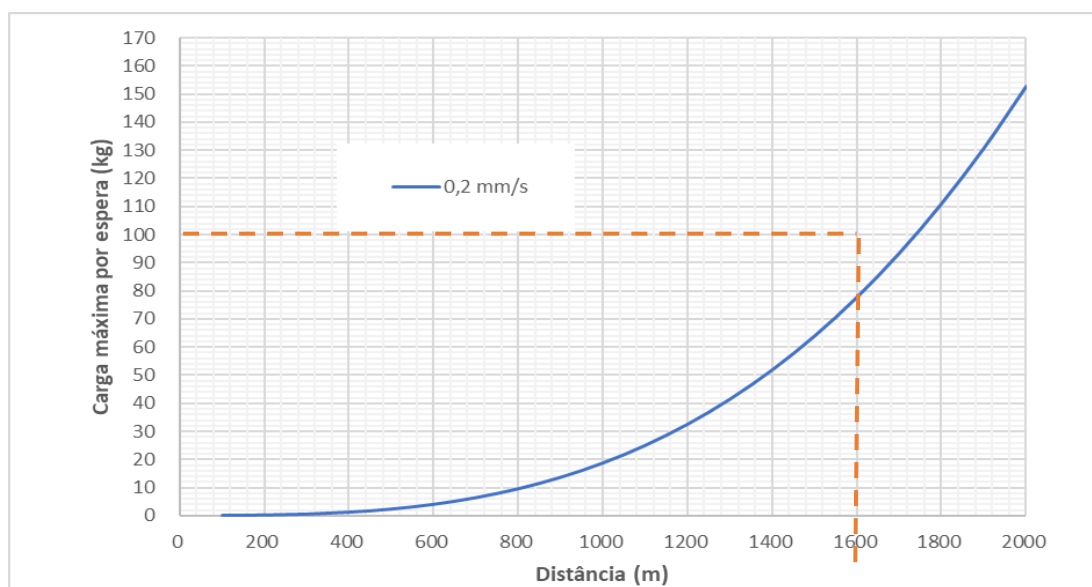
Nota: *Para estruturas administrativas foi considerado o limite máximo de vibração admissível estabelecido pela NBR 9653:2018.

**Para estruturas geotécnicas foi considerado o o limite máximo de vibração admissível estabelecido pela Carta R10 da Rizzo

Fonte: Elaboração própria

Já a Figura 11 mostra a simulação da carga máxima por espera em função da distância para atingir o nível de vibração PVS igual 0,2mm/s, calculada com base na lei de atenuação (equação 10).

Figura 11- Carga máxima por espera em função da distância para atingir um nível de vibração PVS igual a 0,2 mm/s.



Fonte: Elaboração própria

Verificam-se baixos valores de PVS a uma distância de 10 km, inferiores a 0,0041 mm/s, com as cargas máximas por espera praticadas atualmente em Viga, mesmo no caso do valor máximo praticado nos últimos seis meses. Ademais, observa-se que pela simulação o valor de PVS igual a 0,2mm/s é atingido numa distância de 1600 m das detonações em Viga para esse máximo valor de carga máxima por espera, igual a 76kg, praticado nos últimos 6 meses.

Cabe aqui ressaltar mais uma vez que apesar do modelo utilizado não ser construído específico para o caso de Viga, o modelo utilizado foi desenvolvido para as detonações e contexto geológico da Mina de Fábrica, região essa também relativamente próxima à Viga e onde de fato estão situadas as barragens Forquilhas I e III. Logo, o modelo pode ser considerado como uma resposta útil para estimativa da ordem de grandeza das vibrações induzidas pelas detonações de Viga que, porventura, chegariam nas referidas barragens sobretudo a uma grande distância (10km) tratando-se do contexto de vibrações induzidas pelas detonações.

Como no caso de Viga há estruturas administrativas e estruturas geotécnicas da empresa vizinha, CSN, muito mais próximas da área de lavra atual de Viga do que as barragens situadas em Fábrica estão foi de suma importância realizar um estudo mais detalhado em Viga, logo Instituto Tecnológico Vale foi acionado e com sua expertise e recursos desenvolveu um estudo detalhado para o desmonte de rocha com explosivos de forma controlada.

5.2. ESTUDO DETALHADO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELAS DETONAÇÕES COM O ITV

5.2.1. Leis de atenuação de vibrações

Após a coleta dos registros sismográficos fruto da campanha de monitoramento nos meses de agosto de 2020 a outubro de 2020 (Figura 12), os dados foram processados e assim obteve-se as leis de atenuação de vibração para as diferentes direções preferenciais e estruturas de interesse.

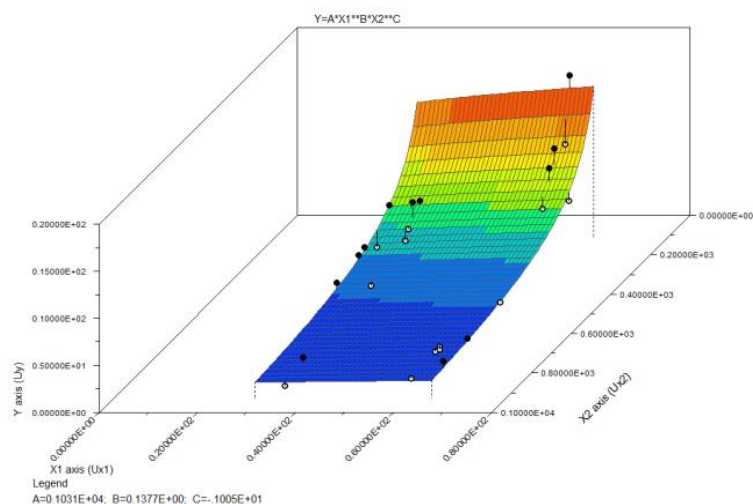
Figura 12 - Alocação de sismógrafos (em verde) e detonações monitoradas (em vermelho).



Fonte: adaptado de ITV, 2020.

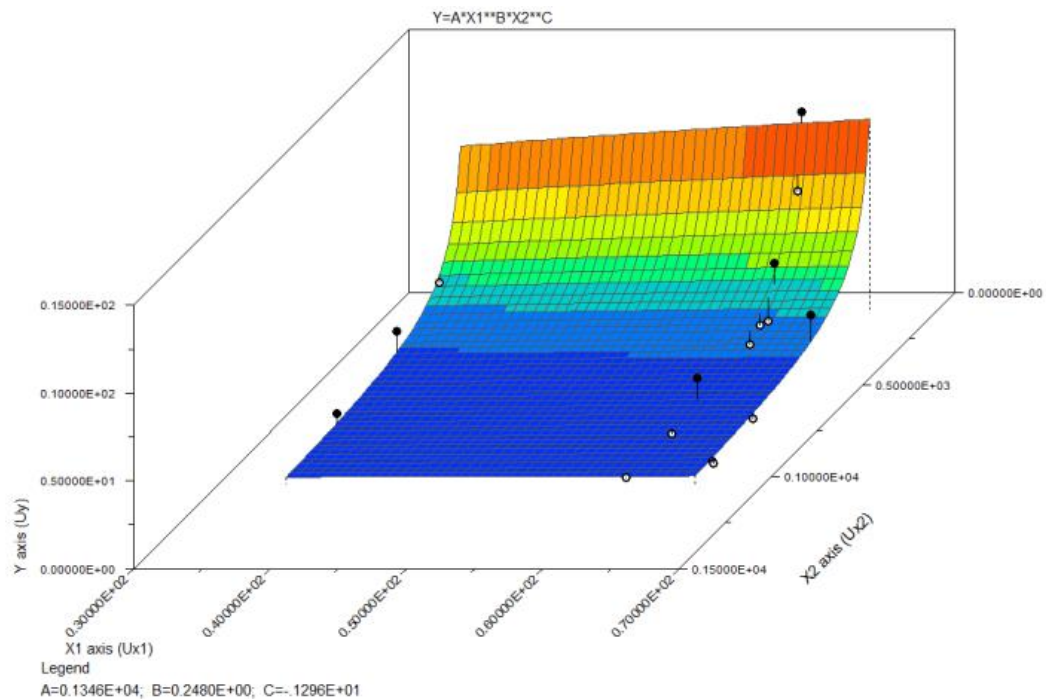
A partir de análises de regressão múltipla no software LABFit® (Figuras 13 e 14) foram obtidas duas leis de atenuação para duas diferentes direções, a saber: , entre Viga e o prédio administrativo da CSN (Equação 11) e em direção a Dique de Bichento IIIA (Equação 12). Em ambos os casos, foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) acima 0,9, o que prova a boa previsibilidade de vibrações a partir dos modelos (ITV, 2020)

Figura 13 - Gráfico PVS x D x Q obtido via LabFit® para a campanha de monitoramento na mina Viga, sentido CSN.



Fonte: ITV, 2020

Figura 14 - Gráfico PVS x D x Q obtido via LabFit® para a campanha de monitoramento na mina Viga, sentido Dique do Bichento IIIA (pilha norte).



Fonte: ITV, 2020.

$$PVS = 1031Q^{0,14} \cdot D^{-1,01} \quad R^2 = 0,92 \quad (11)$$

$$PVS = 1346Q^{0,25} \cdot D^{-1,30} \quad R^2 = 0,91 \quad (12)$$

Adicionalmente, baseado em sete eventos monitorados no sentido mina de Viga e Barramento localizado no sentido Sudeste (comunidade de Congonhas), foi obtida uma lei de Atenuação (equação 13). Vale ressaltar que pode ser realizado um estudo mais detalhado no local da barragem para verificar os níveis de vibração na estrutura, porém verifica-se que até mesmo na menor distância da mina até a barragem, mais de 3km (Figura 15), os valores de vibração seriam muito baixos para as cargas máxima por espera comumente praticados em Viga.

Figura 15 - Distância entre o limite da cava da mina de Viga e o Barramento.



Fonte: ITV, 202

$$PVS = 1451Q^{0,48} \cdot D^{-1,25} \quad (13)$$

Comparando-se os valores de a, b e c obtidos pela regressão com os valores da Tabela 3 nota-se que apresentam boa semelhança com a literatura, visto que a rocha predominante no terreno em questão são Filitos (direção Dique do Bichento IIIA) e Clorita-xistos (em direção a CSN e Barramento) além do material ferrífero (ITV, 2020).

Tabela 3- Parâmetros empíricos típicos para diferentes litologias.

Litologia	Fonte	a	b	c
Basalto	Dinis da Gama (1997)	2000	0,7	-1,9
Calcário em geral	Dinis da Gama (1997)	580	0,6	-1,4
Calcário pisolítico	VISA Consultores (1999)	500	0,42	-1,2
Granito, gnaiss, pegmatito	Holmberg (1982)	700	0,7	-1,5
Hematita	Dinis da Gama C (1997)	380	0,73	-1,87
Xisto com veios de quartzo	Navarro Torres VF <i>et al</i> (2005)	472	0,40	-1,9
Itabiritos (Mina de Fazendão)	Navarro Torres V.F. <i>et al.</i> (2016)	900	0,27	-1,29
Siltitos (Mina de Moatize)	Navarro Torres V.F., Chaves L. <i>et al.</i> (2019)	854	0,39	-1,25
Bitotita-granada Xisto (Mina do Salobo)	Navarro Torres V.F., Ferreira F. <i>et al.</i> (2020)	1359.3	0.63	-1.5

Fonte: ITV, 2020.

5.2.2. Aplicação do estudo para definição da carga máxima por espera

De posse das leis de atenuação obtidas pelo ITV para cada direção preferencial em relação às estruturas administrativas e geotécnicas, calculou-se a carga máxima por espera para as distâncias mínimas das áreas de lavra dos planos de 2021 e 2022 até nas estruturas de interesse (Tabela 4). Para fins de alinhamento com os órgãos externos, os limites máximos admissíveis adotados para as estruturas geotécnicas foram aqueles estipulados pela auditora do Ministério Público, Rizzo International, para o casos similares com os da Mina de Fábrica. Já para a estrutura administrativa da CSN foi considerado a norma NBR 9653:2018 para uma frequência associada de 4Hz, visto que as frequências dominantes dos registros sismográficos de Viga estavam dentro da faixa de 4 a 6 Hz (ITV, 2020). Foi ainda dimensionado como PVS, visto que o dimensionamento pleo PVS é a favor da segurança, ou seja, conservador, já que o PVS é sempre maior que o PPV.

Tabela 4 - Dimensionamento de carga máxima por espera para os diferentes estruturas

Equação utilizada/Local avaliado	PVS máx. admissível (mm/s)	Distância mínima (m)	Carga máxima por espera (kg)
- (11)/Prédios adm. CSN	15	300	55000
(12)/Dique Bichento	1,5	700	900
(13)/Barragem Sudeste CSN	1,5	3000	680

Fonte: O autor

Logo, observa-se que a carga máxima por espera atualmente praticada em Viga, 60kg ou mesmo um máximo praticado no passado de 76kg atendem a todos critérios de avaliação de danos em estruturas atuais. Quanto ao desconforto humano, sobretudo quanto às pessoas que trabalham nos prédios administrativos da CSN atualmente, não foi adotado um limite de vibração admissível, porém tem-se trabalhado na temporização e no limite da quantidade de furos, mantendo ou reduzindo um pouco a carga máxima por espera nas situações de detonação um pouco mais próxima dos prédios. Isto porque segundo MCKenzie (2012) e a ISEE a percepção e desconforto humano estão diretamente relacionados ao PPV, frequência associada e também ao tempo de duração do evento, isto é, a temporização entre o furos e linhas e a quantidade de furos para perfazer o tempo total de duração do evento, observando também a velocidade de ondas P do terreno. O uso detonadores eletrônicos na Vale é mandatório e todos os desmontes são monitorados com pelo menos um sismógrafo de engenharia na divisa com a CSN e quando necessário faz-se o monitoramento na direção do Dique Bichento. Os registros sismográficos tem mostrado uma boa compatibilidade com as leis de atenuação estabelecidas pelo ITV a exemplo do Anexo A, referente a um registro sismográfico de PVS igual a 5,6mm/s para um previsto de 5,75mm/s em um desmonte de carga máxima de 60kg a 300m de distância. A comunicação com a CSN é constante, o relacionamento é bom e sempre é analisado quaisquer relatos de desconforto humano, confrontando com os parâmetros de plano de fogo com os registros sismográficos.

Quanto à comunidade de Congonhas situada há mais de 4km de distância da atual zona de lavra de Viga foi mostrado no relatório do ITV (2020): “Desmonte com

controle de vibrações na lavra da Mina de Viga” que as possíveis vibrações induzidas pelo desmonte em Viga seriam imperceptíveis.

Outros parâmetros de plano de fogo que tem influência nas vibrações como: a temporização, sequência de saída, uso de decks para carga escalonada, quando necessário, também foram contemplados no relatório do ITV (2020), já prevendo situações futuras de limite de lavra final e avanços mais próximos da CSN e do Dique Bichento. Temporizações vem sendo testadas conforme regiões da mina e objetivos e restrições do desmonte.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de técnicas para a previsão e controle de vibrações no desmonte de rochas com explosivos na Mina Viga tem se mostrado efetiva, as leis de atenuação foram detalhadas para cada direção e estrutura de interesse e em geral os registros sismográficos estão compatíveis com as leis de atenuação determinadas pelo ITV.

As cargas máximas por espera dimensionadas segundo as leis de atenuação obtidas são coerentes com o atual praticado em Viga, em geral 60kg por espera, nos cenários atuais de lavra e limites de vibração admissíveis definidos pelos órgãos externos em contexto semelhante para estruturas geotécnicas bem como pela norma nacional de avaliação de dano em estruturas civis. Logo, foi verificado que a carga máxima por espera praticado garante a segurança das estruturas e ainda visa minimizar o desconforto humano em populações próximas às áreas de detonação.

O uso obrigatório de detonadores eletrônicos em todas as detonações, bem como todas as recomendações técnicas do ITV incluindo temporização, uso de decks quando necessário garante a segurança das estruturas e a sustentabilidade das operações tanto no cenário atual quanto para os cenários futuros de lavra. Logo, a equipe de perfuração e desmonte deve estar atenta às mudanças de cenários ao longo do tempo, avanços de plano de lavra e recorrer e aplicar aos estudos desenvolvidos pelo ITV e se necessário solicitar apoio e atualização de estudo para particularidades que porventura possam surgir.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, J. B.; GÓMEZ, J. C.; HERBERT, J. H. **Perforación y Voladura de Rocas en Minería**. Politécnica, Madrid: Politécnica 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- Atlas Powder Company. **Explosives and rock blasting**. 1987. Dallas, Texas, USA, 662
- BAKHTIN, Mikhail Mikhailovtch. **Estética da criação verbal**. Tradução de Maria Emsantina Galvão G. Pereira. 2 ed. São Paulo: Martins Fontes, 1997. (Coleção Ensino Superior).
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil, 1988**. Brasília, Senado Federal, Centro Gráfico, 1988.
- CARDOSO, A. C. D. **O espaço alternativo de vida e forma urbana nas baixadas de Belém**. Belém: Editora da Universidade Federal do Pará, 2007.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) – **Projeto de norma D7.013: Mineração por explosivos**. São Paulo. 1992. 7 p.
- DEMETERCO, Solange Menezes da Silva. **Doces lembranças: cadernos de receitas e comensalidade**. Curitiba 1900-1950. 190 f. Dissertação (Mestrado em História) – Setor de Ciências Humanas, Letras e Artes da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1998.
- ESTON, S.M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações**. 1988. 125 p. + apêndices (Tese de Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- GERALDI, J.L.P. **O ABC das escavações de rocha**. Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 2011.
- GOOGLE. *Internet*. Disponível em: <https://earth.google.com/web>. Acesso em 03/09/2020
- Gregory, C.E. **Explosives for north american engineers**. Trans Tech Publications, Cleveland, Ohio, USA. 1973. 276 p.
- GUIMARÃES, J. T. F. et al. Mineralogical and geochemical influences on sediment color of Amazon wetlands analyzed by visible spectrophotometry. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 43, p. 331-342, 2013.
- HAGAN, T.N. **The Effects of rock properties on Blasting Results**. Ch. 4, AMF Inc. Drilling and Blasting Technology. Adelaide, 1977.

HERRMANN, C. **Manual de Perfuração de Rocha**. 2ª edição. São Paulo: Editora Polígono, 1968. 411p.

JIMENO, C. L. et. al. **Manual de Perforación y Voladura de Rocas**. Instituto Geológico y Minero de España. 2003. 778p.

Langefors, U. and Kihlström, B. **The Modern Technique of Rock Blasting**. John Wiley and Sons, New York, Second Edition, 1973. 405 p.

MARINELLI, Luciana. **Webedia compra Tudo Gostoso por R\$49 milhões**. Valor Econômico, São Paulo, 21 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/4189298/webedia-compra-tudogostoso-por-r-49-milhoes>>. Acesso em: 5 out. 2017.

MCKENZIE, C. **Seed Wave Modelling Applications for Fragmentation, Damage, and Environmental Impact Control**. ISEE 2012.10p.

MORAIS, J. L. **Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 224p.

MOURA, Marcelo; NETTO, Luiz Ferraz. **O SISMÓGRAFO**. Disponível em: <http://www.ciencias.seed.pr.gov.br/modules/links/uploads/21/21459383sismografo.pdf>. Acesso em: 15 de dezembro de 2016.

PACHECO, F. H. **Sistema parede de concreto**: Elaboração de listas de verificação para aprimorar a execução dos serviços. 2012. 76 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PERSSON, Per-Anders; HOLMBERG, Roger; LEE, Jaimin. **Rock Blasting and Explosives Engineering**. Boca Raton, Florida: CCR Press, 531 p., 1994;

RAIMUNDO, Glaucione; GOMES, Denisia M.; SANTOS, Janaína G.; SILVA, Rosemar S.; **A geografia dos sabores: Uma abordagem a rica culinária de Minas Gerais**. In: WORKSHOP DE GEOGRAFIA CULTURAL: Da cultura material ao simbolismo cultural, 2, 2015, Alfenas. **Anais...** Alfenas (MG): Unifal, 2015. Disponível em: <<http://www.unifal-mg.edu.br/geografia/sites/default/files/sabores1-17.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2017.

RIZZO INTERNATIONAL. **Blast Criteria tailings dams and sediment/water retention dams Fábrica Mine**. Project no. 19-6029 Revision 2 .18 September 2020. 41p.

ROMANO, G. Imagens da juventude na era moderna. In: LEVI, G.; SCHMIDT, J. (Org.). **História dos jovens 2**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. p. 7-16.

SABADINI, A. A. Z. P.; SAMPAIO, M. I. C.; KOLLER, S. H. (Org.). **Publicar em psicologia: um enfoque para a revista científica**. São Paulo: Associação Brasileira de

Editores Científicos de Psicologia; Instituto de Psicologia da Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.ip.usp.br/biblioteca/pubcursos/publicar_psicologia_1edicao_2009_WEB_COR_13%20jul%202009.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2010.

SANCHES, L.E. Curso “**Formación en aspectos geológicos de protección ambiental**”. IG Unicamp. Campinas, SP. 1995. p. 179-211.

SARMA, R.S. **Models for Assessing the Blasting Performance of Explosives**. PhD Thesis. The University of Queensland, Austrália, 1994;

SCOTT, A. **Blastability and Blast Design. Rock Fragmentation by Blasting**. Rotterdam: Balkema, 1996. p 27- 36.

SILVA, V. C. **Apostila do Curso MIN 112: Operações Mineiras**. Ouro Preto, 2004. 91p

APÊNDICE A – REGISTRO SISMOGRÁFICO

