



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

DANIEL PRADO AZEVEDO

**Análise dos efeitos da detonação na estabilidade de talude em  
mina de ferro no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais**

Tucuruí – PA  
2022

DANIEL PRADO AZEVEDO

**Análise dos efeitos da detonação na estabilidade de talude em  
mina de ferro no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação do NDAE - PEBGA, da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Linha de pesquisa: Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo A. G. Marques.



DANIEL PRADO AZEVEDO

**Análise dos efeitos da detonação na estabilidade de talude em mina de ferro no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação do NDAE - PEBGA, da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

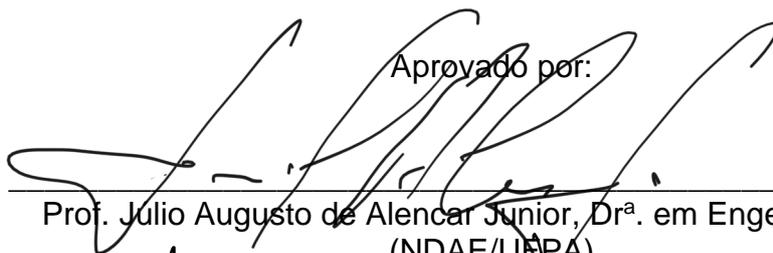
Linha de pesquisa: Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo A. G. Marques.

Tucuruí, 03 de agosto de 2022.

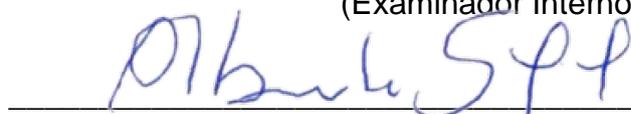
Aprovado por:



Prof. Julio Augusto de Alencar Junior, Dr<sup>a</sup>. em Engenharia Civil  
(NDAE/UFGA)  
(Orientador)



Prof. Aarão Ferreira Lima Neto, Dr. Estruturas e Construção civil  
(NDAE/UFGA)  
(Examinador Interno)



Prof. Alberto de Sampaio Ferraz J. Sayão, Dr. em Engenharia Geotécnica  
PUC RJ  
(Examinador Externo)

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

A994a Azevedo, Daniel Prado.  
Análise dos efeitos da detonação na estabilidade de talude em  
mina de ferro no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais / Daniel  
Prado Azevedo. — 2022.  
64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Júlio A. de Alencar Júnior  
Coorientador(a): Prof. Dr. Eduardo A. G. Marques  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2022.

1. Estruturas geotécnicas. 2. vibração. 3. análise de  
estabilidade de taludes. 4. detonação. I. Título.

CDD 624

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos apoiadores e incentivadores para que eu alcançasse esta conquista! Apoiadores foram todos aqueles que de certa forma contribuíram para este estudo, incentivadores foram todos aqueles que me ampararam desde que eu comecei a buscar o conhecimento até o alcance do título.

Ao professor e orientador Júlio Alencar pela orientação e ensinamentos

Ao professor Eduardo Marques, por me trazer para o mundo acadêmico novamente, pelo incentivo desde antes do início desta jornada, pelas correções, ideias, sugestões, paciência e ensinamentos.

Ao Rhuan Vidal, pela oportunidade de desenvolver um estudo de alto nível e à empresa Vale S.A. pelo apoio com um experimento tão atual, visando sempre a segurança das pessoas e estruturas. À Fabiana Cruz pelo apoio profissional.

Ao meu pai André Azevedo e mãe Dulcyrene Azevedo pelos ensinamentos e por sempre confiarem nas minhas escolhas e trajetória. Aos meus irmãos pelo companheirismo. Aos amigos pelo apoio pessoal.

À UFPA e ao PEBGA pela oportunidade de se obter conhecimento e este título tão importante para a minha carreira profissional e acadêmica.

Aos amigos de trabalho: Sérgio Augusto, Victor Timo, Dieggo Santos, Lucas Drumond, Alexandre Nunes e toda a equipe de geotecnia e hidrogeologia de do Complexo Vargem Grande por todo o apoio dado.

Aos professores Alberto Sayão e Aarão Neto pelo interesse e boa vontade em melhorar meu objeto de pesquisa e resultados.

Aos profissionais que trabalhei e me incentivaram, ensinaram e me fizeram ser uma melhor pessoa, um melhor geólogo, geotécnico e engenheiro com interesse pela mineração e detonação em rochas: Carlos Augusto de Brito Ribeiro, Daniel Mariano, Osvail Quaglio, Rafael da Cunha.

Ao Grupo Quaglio pela oportunidade de se obter conhecimento em vastas áreas da mineração, à Pimenta de Ávila pela oportunidade na geotecnia. À VMA Engenharia pelos conhecimentos transmitidos.

*"Se eu enxerguei mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes."*

*Isaac Newton.*

## RESUMO

As vibrações induzidas por detonação em frente de lavra são ondas finitas que podem abalar estruturas geotécnicas, taludes ou barragens na mineração. Para a presente pesquisa foram distribuídos sismógrafos pela extensão de um talude com aproximadamente duzentos metros de diferença de cota do fundo da cava até o topo, com o objetivo de analisar a velocidade e aceleração das partículas no momento da passagem de ondas, e suas consequências na estabilidade do maciço rochoso. Sabe-se que o caminhamento destas oscilações vibratórias faz com que as partículas se movimentem e depois retornem ao estado de equilíbrio, por isso, é importante estudar a intensidade das ondas que foram geradas na detonação e seus comportamentos nas litologias percorridas. Foi analisado um talude na mina objeto de estudo, propriedade da Vale S.A. composto em sua maioria de filitos e quartzitos, ora contínuos, ora descontínuos, pois há uma zona fraturada de orientação N/S que se estende desde o topo do talude até sua base. Nesse contexto há ao menos 3 direções de fraturas que atuam como zona de escape para a água subterrânea, constituindo um problema geotécnico de desagregação de material, resultando em uma grande erosão. As vibrações induzidas pelas detonações de explosivos em frente de lavra podem potencializar a condição de erosão ao se propagarem pela zona fraturada. Foi utilizada neste estudo a maior leitura sismográfica obtida entre os sismógrafos e realizada a avaliação da redução no fator de segurança de seções escolhidas, posteriormente, foi simulada uma vibração limite em que o talude se mantém estável usando-se o software slide. A avaliação dos resultados no talude analisado permitiu interpretar que os efeitos das vibrações nos taludes, reduziu entre 4,1% e 4,8% os valores dos fatores de segurança e mostra que quanto menor o fator de segurança do talude, maior esta interferência da vibração na estabilidade da estrutura pois tem uma diferença de 8% entre a seção de maior Fator de segurança para a de menor Fator de Segurança.

Palavras-chave: Estruturas geotécnicas, vibração, análise de estabilidade de taludes, detonação.

## ABSTRACT

The vibrations induced by blasting in mining are finite waves that can disrupt geotechnical structures. For the present research, seismographs were installed in various positions along a slope with approximately two hundred meters of difference in height from the bottom of the pit to the top, in order to analyze the speed and acceleration of the particles at the moment of the wave transmission and their consequences to the stability of rocky mass. It is known that the course of these vibratory oscillations causes the particles to move and then return to the equilibrium state. Therefore, it is important to study which waves were generated in the detonation and their behavior in the lithology covered. A slope in the selected mine, Vale S.A. property, was analyzed, which is composed mostly of phyllite and quartzite, sometimes continuous, sometimes discontinuous, as there is a fractured zone of N / S orientation that extends from the top of the slope to its base. In this context, there are at least 3 fracture directions that act as an escape zone for groundwater, constituting a geotechnical problem of material disaggregation, resulting in great erosion. The vibrations induced by the detonations of explosives in the mine can increase the erosion condition when they propagate through the fractured area. The highest seismographic reading obtained among the seismographs was used in this study and the evaluation of the reduction in the safety factor of selected sections was carried out. Later, the maximum value for vibration in which the slope remains stable is also calculated, on Slide2 software. The evaluation of the results on the slope Allowed the interpretation of the effects of vibrations on the slopes reduced between 4.1% and 4.8% the values of the safety factors and shows that the lower the slope safety factor, the greater this interference from the vibration in the stability of the structure. A difference equal to 8% was observed when comparing the section with the highest Safety Factor and the one with the lowest Safety Factor.

Keywords: geotechnical structures, vibration, slope stability analysis, blasting.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propagação de vibrações em diferentes meios.....	2
Figura 2 - Tipos de ondas sísmicas .....	14
Figura 3 - Sismógrafos.....	21
Figura 4 - Sismógrafo sendo ligado e testado durante instalação. ....	22
Figura 5 - Sensor do sismógrafo sendo instalado com gesso na interface com a rocha, aumentando assim a sua aderência ao material rochoso.....	22
Figura 6 - Mapa de arranjo dos sismógrafos instalados no talude norte.....	23
Figura 7 - Mapa com a localização das detonações realizadas na cava. ....	24
Figura 8 - Localização da cidade de Nova Lima no estado de Minas Gerais. ....	26
Figura 9 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero .....	27
Figura 10 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero .....	28
Figura 11 - Mapa regional do Sinclinal Moeda mostrando região onde se localiza a mina objeto de estudo.....	30
Figura 12 - Mapa geológico e de linhas de forma da mina objeto de estudo. ....	31
Figura 13 - (a) Quartzito Moeda; (b) Veios de quartzo em quartzito; (c) Quartzito Moeda; (d) Veios de quartzo em quartzito. ....	32
Figura 14 - (a) Filito sericítico; (b) Dobra em filito sericítico; (c) Filito dolomítico ; (d) Metachert. ....	34
Figura 15 - Imagem da superfície e geologia da mina objeto de estudo. Fonte: Imagens do software Leapfrog. ....	35
Figura 16 - Correlação entre o universo das Weak Rocks e do RMR em função da resistência a compressão uniaxial dos materiais .....	37
Figura 17 - Mapa geomecânico da cava.....	38
Figura 18 - Seção geomecânica interpretada .....	38
Figura 19 - Posição da detonação e proximidade do sismógrafo onde foi realizada a leitura .....	42
Figura 20 - Relação entre as velocidades e acelerações de partícula registradas .....	44

Figura 21 - Sismograma utilizado na conversão para que seja feita a simulação.....	46
Figura 22 - Imagem com a localização das seções no talude. ....	52
Figura 23 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 1 - FS=1.645. ....	54
Figura 24 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 1 - FS 1.578. ....	54
Figura 25 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 2 - FS=1.474. ....	55
Figura 26 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 2 - FS 1.410 .....	55
Figura 27 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 3. FS=1.259 .....	56
Figura 28 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 3 - FS 1.204 .....	56
Figura 29 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 3 - FS 1.004. ....	57

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Características das ondas sísmicas .....	14
Tabela 2 - Dados dos equipamentos utilizados nos ensaios. ....	23
Tabela 3 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência. ....	26
Tabela 4 - Tabela de parâmetros de resistência.....	41
Tabela 5 - Parâmetros utilizados nas avaliações.....	53

**LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS**

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de normas técnicas
<b>API</b>	Aceleração de partícula individual
<b>AT</b>	Aterro
<b>CG</b>	Canga laterítica
<b>FD</b>	Filito Dolomítico
<b>FFG</b>	Formação ferrífera goetítica
<b>FFT</b>	Frequências dominantes
<b>FFI</b>	Formação ferrífera intemperizada
<b>FL</b>	Filito
<b>Fm</b>	Formação
<b>Fr</b>	Fraturas
<b>FS</b>	Fator de segurança
<b>H</b>	Hematita
<b>Hz</b>	Hertz
<b>I</b>	Itabirito
<b>IA</b>	Itabirito aluminoso
<b>IAL</b>	Itabirito aluminoso
<b>IGO</b>	Itabirito Goetítico
<b>IL</b>	Itabirito limonítico
<b>IMN</b>	Itabirito Manganésífero
<b>LT</b>	Laterita
<b>N</b>	Norte
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NE</b>	Nordeste
<b>NW</b>	Noroeste
<b>PPA</b>	Peak particle acceleration – Aceleração de partícula de pico
<b>PPD</b>	Peak particle displacement – Deslocamento de partícula de pico
<b>PPV</b>	Peak particle velocity - Velocidade de partícula de pico
<b>QT</b>	Quartzito

<b>RMR</b>	Rock mass rating
<b>S</b>	Sul
<b>Sb</b>	Acamamento
<b>SE</b>	Sudeste
<b>Sn</b>	Primeira fase de deformação
<b>TTG</b>	Granodiorítica-tonalítica-trondhjemítica
<b>VPI</b>	Velocidade de partícula individual
<b>W</b>	Weathering - Intemperismo
<b>Zc</b>	Frequências de pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVO .....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
3.1	DETONAÇÃO .....	19
3.2	ESTUDOS PRÉVIOS PARA INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS.....	20
3.3	DEFINIÇÃO DO TIPO E POSICIONAMENTO DOS SISMÓGRAFOS.....	21
3.4	ACOMPANHAMENTO DOS TRABALHOS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS.....	23
3.5	ACOMPANHAMENTO DAS DETONAÇÕES .....	24
3.6	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS PELA EMPRESA EXECUTORA NOS ASPECTOS DE INTERESSE DESTE ESTUDO .....	25
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO e CARACTERIZAÇÃO .....</b>	<b>26</b>
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	26
4.2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	27
4.3	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	31
4.4	LITOTIPOS .....	31
4.4.1	Quartzitos .....	32
4.4.2	Filitos .....	32
4.4.3	Filito Sericítico .....	33
4.4.4	Filito Dolomítico .....	33
4.4.5	Itabiritos .....	34
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ..</b>	<b>36</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA .....	37
5.1.1	Quartzitos .....	38
5.1.2	Filito Sericítico .....	39
5.1.3	Filito Dolomítico .....	39
5.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA.....	40
<b>6</b>	<b>Dimensionamento da detonação.....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Resultados dos ensaios sismográficos.....</b>	<b>42</b>
<b>8</b>	<b>Análises de estabilidade: elaboração dos modelos e definição de parâmetros .....</b>	<b>45</b>
8.1	PARÂMETROS SISMOGRÁFICOS AVALIADOS .....	45
8.2	PARÂMETROS MÁXIMOS PERMITIDOS NA ESTRUTURA.....	47
8.3	SOFTWARES UTILIZADOS NA OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS FATORES DE SEGURANÇA .....	48
8.3.1	Leapfrog Geo 6.0.4 .....	48
8.3.2	Slide2 9.012.....	49
8.4	REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE ESTÁTICAS E DINÂMICAS (COM ABORDAGEM DETERMINÍSTICA.....	49

8.5	METODOLOGIA CONSTRUTIVA DAS SEÇÕES EM SOFTWARE SLIDE2	.50
8.6	ANÁLISE DE RESULTADOS	51
8.6.1	- Mapa das seções	51
8.6.2	Parâmetros das rochas	53
8.6.3	- Seção 1	54
8.6.4	- Seção 2	55
8.6.5	- Seção 3	56
8.6.6	- Seção 3 com simulação de vibração máxima	57
<b>9</b>	<b>conclusões</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>Sugestão de estudos futuros</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da atividade minerária como consequência direta do crescimento populacional, da demanda por infraestrutura e matéria prima, torna-se necessário a execução de lavras cada vez maiores, mais íngremes e profundas, desenvolvidas em períodos cada vez mais curtos, o que gera a necessidade de uma melhoria nos processos e mecanismos de gestão e controle ambiental, que suportem os novos patamares e exigências que regulam o setor mineral.

Sendo cada vez mais frequente a aproximação de atividades minerárias de centros urbanos, barragens de rejeito, áreas de proteção ambiental, cavidades e cavernas, cria-se então um contraste entre o máximo aproveitamento do bem mineral, a manutenção e criação das condições de bem-estar e preservação dos itens supracitados. Neste contexto, deve-se, então, com parâmetros de produção pré-definidos, fazer com que essas atividades aconteçam de forma mais adequada possível visando manter a produtividade com o mínimo impacto e riscos.

Ao buscar que essas lavras impactem o mínimo possível ao meio ambiente e às demais estruturas existentes nesses empreendimentos, vários ensaios são realizados para identificar as características geomecânicas dos maciços rochosos existentes na área de interesse. Dentre estas características pode-se citar as litologias existentes, sua geologia estrutural, o grau de intemperismo, as características das famílias de descontinuidades (falhas, fraturamentos, foliação, proximidade etc.) e seus parâmetros estáticos e dinâmicos, relacionados às suas reativações, captadas por análises sismográficas e microssísmicas, sejam esses sismos induzidos ou naturais.

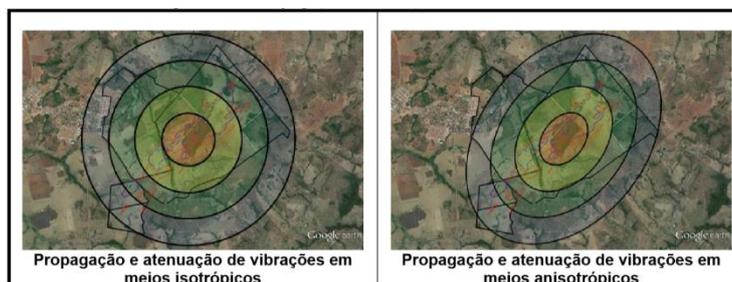
Em relação às estruturas geológicas, na maioria das vezes, quando estão próximas a cavas de exploração, a detonação de rochas e as vibrações causadas pelas mesmas podem ser um fator determinante para causar instabilidade de taludes. Neste caso, o procedimento correto para medição das vibrações é a sismografia, método normatizado no Brasil e exterior.

Associados também ao objetivo deste estudo podem ser utilizados os conhecimentos aprendidos em obras já executadas, em que foram analisadas

as influências que as vibrações induzidas pela detonação de rochas provocaram nos maciços, nas fundações e materiais utilizados na construção de estruturas ou entornos de locais com atividade de lavra. A crescente preocupação com a estabilidade destas estruturas resulta na necessidade de os estudos serem cada vez mais aprofundados e cuidadosos em relação à segurança, além da economia de gastos desnecessários com sua reestruturação e reconstrução.

A geologia local, a presença de descontinuidades, dentre outras características intrínsecas, como estruturas internas e composição, podem influenciar a atenuação da vibração pelo terreno, conforme mostra a Figura 1, e as ondas podem sofrer fenômenos de reflexão, refração, difração, além de ampliações e mudanças de características principalmente frequências, na passagem de um meio para o outro com características diferentes. Normalmente, os estudos de atenuação de vibração trabalham com os valores máximos e casos mais críticos e, portanto, mais conservadores, a favor da segurança.

Figura 1 - Propagação de vibrações em diferentes meios.



Fonte: VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020

Os estudos presentes neste trabalho têm caráter acadêmico e as informações utilizadas para simulações tem o intuito de se ilustrar melhor a metodologia de avaliações e análises da incidência de vibrações nos maciços rochosos e seus efeitos tendo em vista que não representam a situação atual das seções avaliadas e sim a situação de setembro de 2020.

## 1.1 Objetivo

O objeto do trabalho é estudar alguns dos efeitos das vibrações induzidas por detonações em um talude de rochas encaixantes de uma mina de minério de ferro na sua estabilidade global, além de testar a metodologia adotada e comparar os níveis fatores de segurança entre uma análise estática e uma pseudo-estática em um talude de maciço rochoso.

Teve-se neste experimento a estratégia de instalar-se sismógrafos no talude para que fossem realizadas as leituras durante um mês de todas as detonações ocorridas, e, com os resultados, se utilizar a maior leitura obtida nos sismógrafos para ser realizada a avaliação da redução no fator de segurança de seções escolhidas usando-se o software slide.

Foi realizada uma comparação do fator de segurança estático e do pseudo-estático, avaliando a diminuição destes fatores de segurança nas seções e a comparação dos os fatores de segurança entre as seções pseudo-estáticas escolhidas, concluindo o comportamento das vibrações em seções de fatores de segurança diferentes. Foi também realizada em caráter técnico e acadêmico um possível fator de segurança limite em que o talude se mantém estável.

Com o experimento, tem-se a intenção de avaliar e garantir segurança geotécnica para as estruturas adjacentes à detonação em lavra. Este estudo traz uma melhor determinação da vibração atual emitida pela detonação com a carga por espera de explosivos determinada e mostra os limites que se pode alcançar com tal atividade. Desta forma, pode-se estabelecer novos limites para a vibração para que não haja problemas geotécnicos, preservando ativos e vidas nas áreas de atividade da mineradora, além de podermos melhorar a qualidade do desmonte de rochas na atividade de lavra.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil passa por uma transformação em que as atividades de mineração estão cada vez mais próximas aos grandes centros urbanos, o que tem gerado conflitos e favorecido uma maior pressão por parte da sociedade, no sentido de obrigar os empreendedores a adotarem novas tecnologias e metodologias para conciliar as operações de mineração, com adequado desempenho, à prevenção e redução dos impactos ambientais gerados nas comunidades e estruturas circunvizinhas às operações (Silva, 2019).

A vibração do solo induzida por explosões dentro e ao redor das minas tornou-se um sério problema ambiental. Do ponto de vista da indústria de mineração, é uma questão crítica que precisa ser abordada adequadamente (D. Garai et al 2022).

KUMAR et al. (2016) cita que uma detonação gera choque e vibração no solo que podem causar danos às estruturas circundantes. Nas últimas décadas, os choques no solo induzidos por detonações e sua propagação em maciços rochosos vêm chamando cada vez mais atenção. Os efeitos da explosão incluem mudanças no comportamento das rochas com implicações na estabilidade e integridade das estruturas. As estruturas são projetadas e construídas para suportar cargas estáticas e dinâmicas, além de cuidar do assentamento das fundações dentro dos limites permitidos. Cargas dinâmicas incluem carga de terremoto, carga de máquina vibratória, carga de detonação etc. A carga de detonação em estruturas é causada por pedreiras, atividades de mineração, explosão acidental de explosivos subterrâneos, ataques terroristas, atividades de escavação etc. Existem complexidades na onda e no solo características de movimento, parâmetros de detonação e fatores do local.

Desde o século XX, problemas com vibrações relacionados ao desmonte de rochas com explosivos em lavra de minas a céu aberto vem sendo abordados por vários autores, uma vez que o efeito vibratório no terreno é um subproduto inevitável do processo de detonação (Silveira 2017).

Os desmontes e seus efeitos provocam mudanças no comportamento das rochas e, conseqüentemente, implicações na estabilidade e integridade

das estruturas, podendo inclusive ser gatilhos para o processo de liquefação de barragens de rejeito. Assim, estruturas devem ser projetadas e construídas para suportar cargas estáticas e dinâmicas, além de cuidar do assentamento de fundações dentro de limites preestabelecidos (KUMAR et al., 2016).

O processo de detonação causa efeitos deletérios em uma mina e afeta a estabilidade e o ritmo de produção se não for projetado e controlado adequadamente. A produtividade da mina garante detonações maiores, enquanto a geotecnia de mina exige a imposição de medidas de controle para reduzir as vibrações a um nível aceitável. A situação fica sombria nas minas, especialmente nas minas a céu aberto, atravessadas por inúmeras estruturas geológicas proeminentes, como falhas, cisalhamento etc. devido à inacessibilidade prestada a esses locais de falha devido aos danos causados pela detonação (Pramod Rajmeny, 2019).

“A causa desta situação é que apenas cerca de 5 a 15% da energia do explosivo é efetivamente aproveitada no processo de fragmentação da rocha. Consequentemente, a maior parte é transferida à região circunvizinha ao local de detonação sob a forma de efeitos colaterais, como por exemplo: as vibrações de terreno e a pressão acústica” (DINIS DA GAMA, 1998).

Os efeitos causados pela detonação podem causar danos às estruturas e incômodo humano, daí a necessidade de estudos científicos que contribuam para a minimização destes impactos causados pelas detonações (Silveira, 2017).

O processo de detonação é o fator principal na mineração, que exerce influência nos danos do maciço rochoso. Provoca deterioração da qualidade do maciço rochoso devido à vibração da detonação, penetração de fraturas pré-existentes por produtos gasosos dos explosivos e deslocamento relativo de blocos ou volumes discretos de rocha, fora do volume detonado (Pramod Rajmeny, 2019).

“O processo de detonação, quando não adequadamente projetado, pode gerar uma onda de choque com energia suficiente para gerar incômodos nas comunidades vizinhas além de funcionar como um gatilho para o início de um processo de instabilidade atribuído a outras causas, como recalque, dilatação térmica, insuficiência de material, erro de cálculo de projeto etc.” (BACCI et al. 2005 Apud Silva 2019).

O nível de vibração à distância depende da carga por espera, frequência de vibração, características da rocha (tipo, peso unitário, estratificação, inclinação das camadas), condições do furo de explosão, presença de água, propagação de ondas superficiais e corporais no solo e para em menor grau no método de iniciação. As diferenças de formação rochosa incluíram mudanças na espessura, mergulho das camadas, abertura das principais juntas e estratificação etc. As fraturas são desenvolvidas em rochas devido a tensões de tração e cisalhamento. Assim, os estudos de vibrações do solo induzidas por explosões em rochas tornaram-se importantes. Geralmente, as constantes do site são determinadas por experimentos de detonação (KUMAR et al., 2016).

Xiaoshuang Li (2022) cita que o processo de propagação da vibração de detonação sempre foi um problema difícil que afeta a estabilidade de altos taludes em minas a céu aberto. Durante o processo de produção da mina, o efeito de vibração de detonação não só ameaça a estabilidade do talude, mas também leva a acidentes de deslizamento locais ou em grande escala

No caso da mineração especificamente, este excesso de energia no processo pode causar a instabilidade de taludes, a desagregação do material ou até a liquefação dos rejeitos depositados em uma barragem, por exemplo.

O volume de minerais extraídos em grandes minas de superfície é alto. Então, geralmente, uma detonação por semana é feita nessas minas. A vibração do solo devido a cada detonação aumenta a probabilidade de instabilidade dos taludes da mina ao redor. Identificar as principais fraturas da rocha e estudar os blocos formados por essas discontinuidades é muito importante na investigação da estabilidade dos taludes da mina (H. Bassi 2020). Embora cada detonação cause pequenos deslocamentos no talude da mina, com detonações repetidas os movimentos se tornarão gradativamente significativos, o que pode levar à ruptura do talude. Ao decidir sobre um padrão de detonação, a carga de explosivo por espera deve ser selecionada com muito cuidado para que a onda de choque induzida pela detonação não cause deslocamento permanente nas encostas da mina. Mesmo assim, não deve ser esquecido o efeito de detonações repetidas no movimento das encostas da mina (H. Bassi 2020).

O grande desafio é realizar um plano de lavra que consiga controlar os impactos ambientais nos entornos, mas garantindo a fragmentação adequada, necessária para uma produção efetiva. Este plano de desmonte pode ser alcançado através de um entendimento e aplicação dos princípios físicos de propagação das ondas de choque provenientes dos desmontes de rocha com explosivos no maciço rochoso (DOWDING; AIMONE, 1992). O monitoramento de sucesso e o controle das detonações e seus efeitos nos entornos dependem do equilíbrio de dois fatores principais. Primeiro, o plano de fogo deve ser elaborado de forma a reduzir a carga por espera, e a sequência de detonação ser realizada de forma a reduzir os efeitos indesejados gerados nos entornos do empreendimento. Na sequência, a quantidade de explosivos por volume de rocha detonada e o sequenciamento do plano de fogo devem ser ajustados para garantir uma fragmentação adequada (DOWDING; AIMONE, 1992).

A detonação é um processo integrado da mineração que inevitavelmente, causa vibração no terreno, o que pode desestabilizar ainda mais os taludes (Byung-Hee Choi et al,2012). Para realizar desmontes de rocha com explosivos, vários parâmetros devem ser considerados de forma a executar um plano de detonação que atenda aos requisitos de qualidade de fragmentação para a produção, além de minimizar a possibilidade de geração de incômodos nas comunidades que circundam o empreendimento (Silva 2019) e não danificar estruturas nos entornos.

Segundo Kumar (2016):

“Uma detonação gera choque e vibração no solo que podem causar danos às estruturas dos entornos, os efeitos da explosão incluem mudança no comportamento da rocha, tendo implicações na estabilidade e integridade das estruturas. As estruturas são projetadas e construídas para suportar cargas estáticas e dinâmicas, além de cuidar do recalque das fundações dentro dos limites permitidos. Vários experimentos em locais específicos foram realizados para prever e controlar os efeitos da explosão. Os parâmetros associados à vibração são deslocamento, velocidade e aceleração com suas respectivas frequências”.

Segundo (GOMES, 2016):

“Um movimento oscilatório fica definido, quando se conhecem as seguintes características:

Características da partícula:

- Deslocamento;
- Velocidade;
- Aceleração e
- Duração da vibração da partícula.
- Características da onda:
- Velocidade de Propagação;
- Comprimento de onda da vibração;
- Frequência de Propagação; e
- Atenuação da onda em função do meio de propagação.”

Assim a influência mais importante para a alteração da característica da onda é a dissipação da sua energia, levando à redução exponencial da amplitude de vibração provocada pela perda da energia com o aumento da distância entre o ponto de monitoramento e a frente desmontada (SISKIND, 2000).

A geologia local e a geomecânica das rochas têm uma grande influência na propagação das vibrações e a sua importância aumenta à medida que a distância do desmonte aumenta. A heterogeneidade das propriedades geomecânicas, assim como a existência de diferentes litologias, leva à diversificação das características de propagação. Diferentes tipos de solos e rochas filtram certas vibrações com determinadas frequências, tipicamente entre 5 e 100 Hertz (GOMES, 2016).

É bem conhecido que variações na geologia local dos maciços rochosos influenciarão a transmissão da vibração da detonação. Por exemplo, a vibração dentro de um maciço rochoso articulado dependerá do número e espaçamento das juntas, bem como das orientações das juntas. Como outro exemplo, a vibração dentro de qualquer rocha que exiba uma anisotropia de velocidade sísmica dependerá do grau de variação de velocidade em determinadas direções (D.P. Blair, 2020)

As relações empíricas utilizadas para calcular parâmetros de vibração induzida pela detonação, como velocidade de partícula de pico (PPV) e deslocamento de partícula de pico (PPD), são comumente usados para estimativa de cargas de explosão no projeto. No entanto, essas relações não são capazes de considerar a variação nos parâmetros da rocha e a incerteza das condições in situ. Os parâmetros de vibração induzida por explosão, por exemplo, PPV, dependem de vários fatores, como distância escalada, frequência de vibração, características da rocha (tipo, peso unitário, estratificação, inclinação das camadas, juntas etc.), presença de lençol freático, propagação da superfície e do corpo ondas no solo etc (KUMAR et al., 2016).

No caso de uma detonação padronizada devemos estudar parâmetros das rochas que podem influenciar nos resultados destas vibrações indesejadas: Na maioria dos casos a presença de litologias diferentes e heterogeneidade no solo atenuará a propagação da vibração do solo. No entanto, sob certas condições, pode ocorrer amplificação, o que pode aumentar o risco de acidentes Um dos exemplos mais claros é, no caso de solos estratificados, a ocorrência de amplificação das vibrações quando ocorre uma diminuição da espessura dos estratos (GOMES, 2016).

Um parâmetro que deve ser analisado quando se faz um estudo desse âmbito é considerar o nível d'água das estruturas estudadas. Charlie et al. (1996) fazem a análise dos aumentos da poro-pressão no solo e nas rochas a partir de explosões subterrâneas, mostrando a influência que a água tem na estabilidade das estruturas.

As características do maciço rochoso também variam muito de um lugar para outro em uma mesma mina e mesma formação. Conseqüentemente, os parâmetros do projeto de detonação e as características dos explosivos precisam ser considerados com base nas propriedades da massa rochosa, a saber: resistência, densidade, porosidade, velocidade de onda longitudinal, resposta tensão-deformação e presença de descontinuidades estruturais (ÁLVAREZ-VIGIL et al., 2012).

Segundo ÁLVAREZ-VIGIL et al. (2012), a intensidade e a frequência das vibrações induzidas no maciço rochoso, provocadas por desmonte de rocha com explosivos, dependem de muitos fatores:

“Um grupo que define as características do ambiente.

a. O tipo de rocha e massa de rocha (classificação de massa rochosa, RMR), já que cada terreno tem uma velocidade de transmissão e frequência dominantes que favorecem a propagação de ondas para essa frequência.

b. A presença de famílias de descontinuidades e suas características (essencialmente, abertura, preenchimento e água) também afetam a transmissão.

c. A distância a ser percorrida pela onda (entre a fonte e o ponto de controle), pois as ondas sofrem atenuação com a distância percorrida.

d. A presença de descontinuidades significativas (falhas), estruturas geológicas especiais tais como dobras, impulsos e níveis que podem atuar como isoladores (por exemplo, argilas).”

H. Bazzi (2020), em um estudo semelhante, fez um experimento em um talude de cava contendo uma falha, este foi examinado sob carregamento sísmico causado por sucessivas detonações com intensidade variável. Alguns pontos de referência foram selecionados acima/abaixo da superfície da falha e seus movimentos registrados durante a análise. Os resultados mostram que os pontos acima da superfície da falha têm o maior deslocamento, enquanto abaixo da superfície da falha ocorrem apenas movimentos mínimos (insignificantes) indicando que zonas fraturadas são mais susceptíveis à reativação destas falhas e movimentações de massa. H. Bazzi (2020) avaliou também, a intensidade da explosão tem o maior impacto nos movimentos nos pontos superiores, mas abaixo da superfície da falha, o efeito da intensidade da explosão foi mínimo. Normalmente, cada explosão causa apenas pequenos deslocamentos nos taludes da mina, mas o efeito desestabilizador das repetidas explosões semanais é significativo, conforme confirmado no presente estudo. Uma análise de sensibilidade provou uma relação direta entre a rigidez de cisalhamento e o ângulo de atrito da superfície da falha e os movimentos dos pontos de referência superiores. Da mesma forma, na presença de pressão de água subterrânea, os movimentos induzidos por detonação aumentam acentuadamente.

As consequências de sustentar níveis excessivos de danos no maciço rochoso são insidiosas para qualquer operação de mineração e estão relacionadas à diminuição da segurança e produtividade. Pois, a otimização

das operações da mina garante explosões maiores, no entanto, a presença de falhas geológicas exige a restrição do tamanho da explosão e, se não for tratada adequadamente, apresenta sérios riscos à segurança. Este último deve-se à instabilidade estrutural, resultando em aumento do custo de suporte e diminuição da produtividade. Consequentemente, o controle aprimorado sobre os danos causados pela explosão na escavação de mineração tornou-se um imperativo econômico (Pramod Rajmeny, 2019).

Xiaoshuang Li (2022) avaliou 4 fatores em seu estudo de estabilidade de taludes numa mina de fosfato na china, são eles: Modelos geológicos e geomecânicos, a frequência do talude, características de amortecimento e a distribuição dinâmica da aceleração após a detonação. Ele chega a citar também que estes fatores e métodos de análise não exploram e analisam sistematicamente os taludes adjacentes e os efeitos da vibração nestas encostas. Há uma grande dificuldade de se manter a estabilidade de taludes adjacentes com detonações de alta magnitude, portanto, a detonação em minas a céu aberto, irá precisar de certas limitações para não prejudicar a integridade dos taludes.

Surge uma outra questão quando a estrutura particular já está danificada e, portanto, enfraquecida e/ou sua resistência é degradada. Nesse caso, uma nova abordagem de monitoramento para a verificação da resposta da estrutura à passagem de uma onda de choque induzida no maciço é usada (STOJADINOVIC et al., 2011). Nesta abordagem estuda-se a resposta da estrutura à passagem de onda de choque com base no acompanhamento da evolução das trincas e danos quando a onda de choque passa pela estrutura, sendo assim possível determinar a causalidade com base na magnitude dessa resposta (STOJADINOVIC et al., 2011). A existência de causalidade é comprovada por medições diretas da resposta das trincas às vibrações do terreno induzidas pela detonação. A resposta das trincas é definida como qualquer deformação permanente ou alteração nas dimensões das trincas (geralmente largura da trinca). As medições devem ser realizadas colocando medidores de deslocamento nas trincas estruturais, evitando trincas superficiais e cosméticas. A razão para isso é a diferença nas respostas dos danos estruturais e cosméticos aos fatores relacionados à detonação (STOJADINOVIC et al., 2011).

Um dos parâmetros que deve ser monitorado segundo a NBR 9653 (ABNT, 2018) para a análise dos efeitos provocados por detonações é a velocidade de vibração de partícula de pico. É reconhecido como um parâmetro bastante significativo no que tange à avaliação de danos causados às estruturas (Koppe et al, 2001 apud França 2011).

Kumar (2016) ainda cita:

“Os parâmetros de vibração induzida pela detonação, por exemplo, PPV (Peak Particle Velocity – Velocidade pico da partícula, valor que representa o maior valor medido para velocidade de partícula naquele ponto de medição), dependem de vários fatores como distância escalonada, frequência de vibração, características da rocha (tipo, peso unitário, camadas, inclinação das camadas, juntas etc.), presença de lençol freático, propagação da superfície e do corpo ondas no solo etc. Portanto, é necessário desenvolver um modelo empírico adequado para PPV. Na literatura, modelos empíricos para predição de PPV para rochas em locais específicos estão disponíveis e não podem ser generalizados para uso em outros locais. Isso se torna importante à medida que as complexidades do local da rocha aumentam. Modelos PPV considerando efeitos de descontinuidades rochosas, tipos de rochas, formação rochosa, juntas de rochas e sua orientação, presença de lençol freático, interface solo-rocha etc., também estão disponíveis na literatura. Mas o efeito das propriedades da rocha no sismógrafo de engenharia no modelo PPV ainda não foi estudado”

Há, portanto, a necessidade de se fazer estudos in loco, pois existem parâmetros geológicos, geoestruturais e geotécnicos desconhecidos no subsolo de todas as regiões que podem influenciar o comportamento de propagação das ondas, de maneira a prover a melhor qualidade de informação possível sobre essas características em profundidade, na área de estudo.

Reil, 1998 (apud França, 2011) indica que os três principais fatores relacionados à vibração nos entornos são:

- Velocidade de vibração máxima de partícula de pico e vibração máxima (VR),
- Duração da vibração no solo, e
- Frequência de vibração.

Em geral, os efeitos da vibração são mais perceptíveis em locais próximos às detonações, ou seja, quanto mais próximo uma construção estiver, maior será o impacto sofrido. Segundo Sarsby (2000) os fatores que contribuem para a atenuação das vibrações com a distância são: a expansão geométrica das ondas, a progressiva separação das três componentes, longitudinal, vertical e transversal que provém das diferentes velocidades de propagação, a presença de descontinuidades nos maciços (causando reflexões, refrações, difrações e dispersões) e o atrito interno dinâmico característico das rochas. A atenuação das vibrações acontece com o distanciamento da fonte da vibração, e apresenta uma menor intensidade (amplitude) de vibração em pontos mais distantes da detonação

Existem alguns casos e situações específicas em que as ondas nem sempre se atenuam com a distância. Por exemplo, em meios fraturados, dependendo de sua geometria, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras refletidas, chegando a medir valores maiores de vibração em pontos mais afastados (AZEVEDO; PATRÍCIO, 2003).

“A dinâmica de rochas é um ramo da mecânica de rochas que estuda o carregamento dinâmico, a deformação e o fraturamento em relação ao tempo (ZHAO 2011). Dessa forma, seu conhecimento é muito útil no estudo da propagação de ondas geradas pelo desmonte de rochas com explosivos, pois o fenômeno da detonação ocorre liberando um pico de energia muito rapidamente no maciço rochoso e após isto não apresenta grandes oscilações, no entanto causa significativas deformações e faturamento no maciço rochoso.”

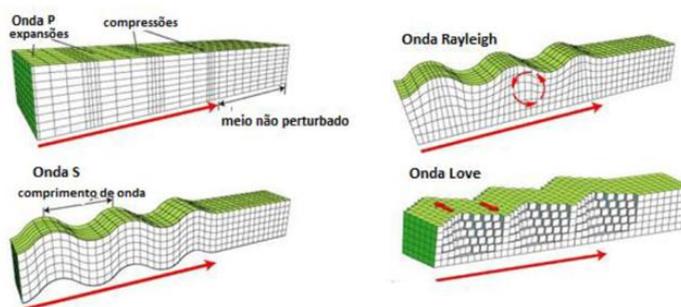
As ondas sísmicas causadoras de vibração podem ser classificadas em dois principais grupos: as volumétricas e as superficiais. As volumétricas propagam-se no interior do maciço e são classificadas em: ondas P, também conhecidas como primárias, longitudinais ou de compressão e em ondas S, também chamadas de secundárias, transversais ou de corte. Já as superficiais, como o próprio nome diz, propagam-se na superfície do terreno e são classificadas em Rayleigh e Love. Estas ondas sísmicas apresentam várias particularidades (Tabela 1) e seus respectivos efeitos no terreno podem ser representados esquematicamente segundo a Figura 2.

Tabela 1 - Características das ondas sísmicas

Ondas	Tipo	Movimento provocado nas partículas do terreno	Velocidade
P	Volumétricas	Compressão e tração na própria direção de propagação da onda	Possuem as maiores velocidades de todas as ondas
S	Volumétricas	Movimentos perpendiculares à direção de propagação da onda	Inferior às ondas P
Rayleigh	Superficiais	Movimentos elíptico retrógrado	Inferior às ondas S
Love	Superficiais	Movimentos transversais horizontais à direção de propagação da onda	Superior às ondas Rayleigh

Fonte - (Canedo 2013)

Figura 2 - Tipos de ondas sísmicas



Fonte - (SCIENCELEARN, 2016)

Outros efeitos que contribuem para a perda da energia da onda de choque induzida no maciço são as perdas de energia por absorção e dispersão, em que diferentes componentes de frequência viajam em diferentes velocidades de propagação, e há formação de ondas de superfície. Os parâmetros com a maior influência na redução da amplitude de vibração e das ondas de choque induzidas no maciço devido à realização de desmonte de rocha com explosivos são a distância e a carga de explosivos por espera. A frequência da onda de choque induzida no maciço também é influenciada pela distância e geologia (SISKIND et al., 2005).

Para curtas distâncias, até cerca de 300 m entre o ponto de monitoramento e o ponto do desmonte, as ondas de choque que se propagam no maciço são dominadas por ondas com frequências relativamente altas. A distância exata em que as ondas de choque de frequência alta são dominantes, depende de quão “influente” é o maciço. A tecnologia atual de iniciação das detonações ou desmonte por explosivo permite um controle das características das amplitudes de vibração e da frequência dominante de vibração das ondas de choque induzidas no maciço, esse controle somente é efetivo em pontos de monitoramento próximo ao ponto de detonação. Novos

iniciadores precisos podem melhorar o controle da frequência de vibração e a maiores distâncias (SISKIND et al., 2005).

Para distâncias superiores a algumas centenas de metros, as ondas de superfície tendem a dominar e compor a onda de choque induzida no maciço. As ondas de superfície são tipos particulares de ondas sísmicas de baixa frequência (SISKIND et al., 2005).

O fenômeno de superposição de ondas pode ocorrer quando dois ou mais furos planejados para serem detonados em sequência são iniciados com intervalos muito próximos. Esse fenômeno é mais evidente quando se realiza grandes desmontes, em que o posicionamento dos furos, aliados ao tempo de saída entre os furos, é muito próximo (KLEN, 2010).

Segundo Silva (2019), o fenômeno de superposição de ondas não é somente influenciado pelos tempos de iniciação das cargas explosivas, sendo também influenciados por:

- Velocidade de propagação da vibração pelo terreno;
- Tempo de atenuação da vibração pelo terreno;
- Distância do ponto de monitoramento ao local do desmonte;
- Geometria da carga;
- Velocidade de detonação; e
- Confinamento da carga.

França (2011) cita que os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações do terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência da velocidade de vibração de partícula de pico. Como cada tipo de estrutura apresenta uma frequência natural de vibração, pode-se estabelecer um limite de velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s) aceitável. Sendo assim, os estudos de análise sismográfica são importantes para se determinar este limite de vibração aceitável para estruturas.

Sobre a atenuação de ondas e representação empírica, o espalhamento geométrico, amortecimento das ondas pelo material e atenuação aparente são as três principais causas da atenuação da vibração. O espalhamento geométrico descreve a diminuição da amplitude da onda com a distância devido a um aumento no tamanho da frente de onda. O

amortecimento de material descreve as perdas intrínsecas de material devido à natureza friccional/viscosa. A atenuação aparente é causada por reflexão, refração e/ou transmissão na interface do material, bem como pela presença de descontinuidades etc. (W.M. Yan et al, 2013).

Para que os níveis de vibração atingidos durante as detonações sejam controlados e/ou atenuados, é necessário o monitoramento sismográfico. As informações sismológicas coletadas, processadas e apresentadas neste trabalho foram conjugadas a informações geológicas e pedológicas. Todas essas informações, também, se fizeram importantes para o planejamento dos locais em que se fariam as medições, somadas às queixas dos moradores e informações pedológicas, para posterior entendimento e correlação com a equação matemática de atenuação a ser obtida (França 2011). A vibração induzida do solo pode causar danos estruturais, deslizamento de encostas e sério descontentamento nos moradores locais (Yonggang Gou et al, 2020),

Em muitos ambientes de mineração é desejável controlar a vibração da explosão, principalmente em regiões próximas às paredes finais das cavas a céu aberto. As principais variáveis que controlam a vibração da explosão em material realista são as distâncias envolvidas, os volumes de carga em cada furo, os tempos de retardo entre cada furo e a geologia local e suas variações. Um estudo de vibrações realizado corretamente permite a seleção de sequências de retardos apropriadas para minimizar as vibrações da detonação dentro da geologia local e, portanto, é claramente relevante para a estabilidade de taludes da cava (D.P. Blair, 2020).

R. Rodríguez *et al.* (2021) cita que é necessário correlacionar a carga explosiva e a distância da edificação para cada tipo de maciço rochoso para controlar a vibração produzida. Esta informação é muito útil para projetar os recursos de detonação, especialmente a carga máxima por espera. Em alguns casos, essa restrição pode afetar o comprimento dos furos, seu diâmetro e qualquer outra variável. Todos esses fatores podem ter um grande impacto no preço do projeto de detonação devido aos estudos específicos necessários.

A caracterização e determinação da equação ou lei de atenuação das ondas de choque é obtida com a utilização de matrizes de sismógrafos, ou

alguns sismógrafos e vários desmontes. Desta forma pode-se determinar o valor de velocidade de partícula de pico (PPV) para várias distâncias da detonação (SISKIND *et al.*, 1980).

Vale ressaltar que as velocidades de vibração registradas pelos sismógrafos são as velocidades de vibração das partículas do terreno, diferentemente da velocidade de propagação de ondas P. Isto é, as ondas P se propagam no terreno em uma velocidade muito superior à velocidade de vibração que as mesmas causam nas partículas do terreno após uma detonação (Silveira, 2017).

Verificou-se que a tendência de atenuação do PPV varia com a mudança das condições geológicas. Numa mesma localidade, a estimativa de PPV pode ser bastante diferente em diferentes posições/direções. Assim, recomenda-se que os empreiteiros de detonação forneçam fórmulas de previsão de atenuação PPV baseadas em direção e atualizem as fórmulas em diferentes estágios de escavação, pois variações no perfil geológico (à medida que a escavação é realizada sequencialmente) podem alterar significativamente a atenuação PPV (Jayasinghe *et al.* 2019).

As vibrações do solo não são apenas características de um local específico, mas também dependem das condições de desempenho da detonação. As leis de atenuação de vibração do solo, ou leis de transmissividade, estabelecem uma relação entre a carga explosiva máxima por espera, distância até a detonação e velocidade de vibração, com o objetivo de prever os efeitos da detonação em função das variáveis a serem testadas (R. Rodríguez *et al.* 2021)

O objetivo de um projeto de detonação é quebrar a rocha com o mínimo de quebra e danos à rocha circundante, respeitando os critérios de vibração provocada pela detonação. Fragmentação do material, vibrações do terreno e estruturas próximas, portanto, suas estabilidades são definitivamente os principais fatores a serem considerados (W.M. Yan *et al.* 2013).

Como esperado pela lei de propagação, observa-se que, quanto maior a carga máxima por espera, maior é a vibração de partículas do terreno. A relação inversa ocorre para a distância: quanto maior a distância, menor é a vibração de partículas do terreno (Silveira, 2017).

Assim como no estudo de P. Sun *et al.* (2021) os dados obtidos foram realizados em coletas de dados das detonações da mina. Em uma aplicação específica de engenharia, propõe-se que o tipo de frequência dominante mais adequado seja cuidadosamente selecionado, comparando sua utilidade e aplicabilidade. Para obter leis de atenuação autênticas da frequência dominante, apenas ondas sísmicas diretas coletadas por sistemas de monitoramento de vibração de detonação foram selecionadas para análise de regressão das leis de atenuação. A frequência dominante de vibração de detonação é determinada principalmente pelo peso da carga, velocidade de onda longitudinal, densidade da rocha e distância da fonte de detonação ao ponto de monitoramento.

Com um limite de PPV predefinido baseado geralmente na prática/diretriz local, a quantidade de carga explosiva por atraso pode ser projetada desde que os coeficientes de ajuste sejam conhecidos (W.M. Yan *et al.* 2013).

A carga sísmica é equivalente a forças invariavelmente horizontais e verticais, e o problema de estabilidade sísmica de taludes é simplificado em um problema estático no método pseudo-estático. Portanto, o fator de segurança de taludes sob carga sísmica pode ser calculado com o método do equilíbrio limite (Mingwei Guo *et al.* 2011).

Até o momento, não há bom senso no país e no exterior para avaliações de estabilidade dinâmica de taludes. Na prática, existem principalmente dois índices de estimativa, ou seja, o fator de segurança e a deformação cumulativa. O fator de segurança tem sido amplamente utilizado para estimar a estabilidade dinâmica de taludes (Mingwei Guo *et al.* 2011).

sendo assim o estudo mostra o interesse em não interferir com os entornos, portanto, a grande importância no controle de estabilidade de taludes da cava e na preservação com os ativos de terceiros e da empresa.

### **3 METODOLOGIA**

Para a realização deste trabalho, a organização das atividades foi executada de forma que um embasamento teórico sobre o tema pudesse ser adquirido previamente, realizando-se assim uma revisão bibliográfica onde fossem abordados os assuntos referentes à pesquisa.

Foi executada uma busca também por materiais que descrevem a geologia regional e local da área de estudo, enriquecendo assim o conteúdo do objeto de estudo, com o contexto geológico e os litotipos do local.

Após entender melhor a área de estudo, suas rochas e parâmetros, foram realizados os estudos sismográficos, definindo-se os locais de instalação dos sismógrafos e coletaram-se as leituras durante as detonações. Com base nos relatórios destes estudos contendo as informações das detonações e as curvas de atenuação mais adequadas para o local, serão então realizadas análises de estabilidade estáticas e pseudo-estáticas em seções específicas.

#### **3.1 Detonação**

A detonação em frente de lavra é necessária para a fragmentação do material, a vibração é inevitável, portanto, são realizados estudos no intuito de reduzir esta variável sem que haja diminuições na fragmentação.

Realiza-se uma avaliação de quanto explosivo está sendo utilizado, malha de perfuração, tempo de retardo entre furos, tamponamento, direção de descontinuidades entre outras variáveis de cada frente de lavra.

Para que seja realizada uma detonação controlada, realiza-se um estudo de furo assinatura, onde são instalados sismógrafos em linha em relação a uma perfuração onde é realizada uma detonação com quantidade de explosivo medida num padrão determinado anteriormente.

Este estudo de furo assinatura vai determinar algumas características dos maciços rochosos envolvidos na região estudada, determinando assim as frequências, velocidades de onda e acelerações de onda naqueles materiais

por onde as ondas passam, seja estes materiais: rochas, solo, aterros e estruturas civis.

O estudo de furo assinatura já havia sido realizado para outras estruturas contidas nos entornos da cava de mineração estudada.

A partir deste experimento, são emitidos sismogramas e são realizadas análises de equação de onda, que determinam assim a melhor forma de se realizar esta detonação no intuito de controlar a vibração, determinando as temporizações adequadas e quantidade de explosivo a ser utilizado.

É determinada também a carga máxima por espera, que é a quantidade de explosivo máxima por tempo que pode ser utilizada no local estudado de acordo com a distância da estrutura que pode ser abalada com a detonação e sua consequente vibração induzida.

### **3.2 Estudos prévios para instalação dos sismógrafos**

Inicialmente, ressalta-se que todos os procedimentos atendem às normas da ABNT NBR 9653:2018, para que este experimento seja válido e fidedigno aos dados reais, foram medidos os dados com sismógrafos calibrados, dentro da validade de calibração e seguindo à risca desde a instalação destes equipamentos até o tratamento de dados.

O monitoramento destas vibrações foi realizado por um conjunto de sismógrafos que foram instalados por toda a extensão do talude.

Os ensaios foram realizados após estudos preliminares de relatórios, mapas e trabalhos de campo. Foram então escolhidos de forma criteriosa os locais de instalação dos geofones de acordo com a posição das detonações e de acordo com as zonas de fraqueza do talude.

Foram instalados os sismógrafos em uma malha e os ensaios realizados durante o mês de setembro de 2020.

Após conhecer a área e avaliar os fatores geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geomecânicos, estruturais, geomorfológicos e topográficos; e informações sobre os fatores que potencialmente contribuem para todo esse processo de detonação e suas eventuais consequências na estabilidade do talude e no aumento de vulnerabilidade a processos erosivos,

foi definido pela equipe de geotecnia e sismografia da mineradora o número de instrumentos a serem instalados (sismógrafos com geofones triaxiais) e o seu arranjo.

### 3.3 Definição do tipo e posicionamento dos sismógrafos.

A Figura 3 apresenta os sismógrafos. Estes equipamentos possuem um canal triortogonal para registro de vibrações pelo terreno e um canal para medida de pressões acústicas provenientes de detonações. Pode ser acionado por um evento de magnitude selecionável pelo operador, ficando instalado aguardando sua inicialização por longos períodos.

Figura 3 - Sismógrafos.



Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

O sismógrafo apresenta, inicialmente, os resultados em um display que mostra as configurações (Figura 4) e a máxima velocidade de partícula registrada em um canal quando ocorre o evento. Através de comunicação com microcomputadores tipo PC e softwares específicos, obtém-se automaticamente os valores máximos de deslocamento, velocidade e aceleração de partícula em cada canal, medidos pelo sensor evidenciado pela Figura 5.

Figura 4 - Sismógrafo sendo ligado e testado durante instalação.



Fonte: Acervo Pessoal.

Figura 5 - Sensor do sismógrafo sendo instalado com gesso na interface com a rocha, aumentando assim a sua aderência ao material rochoso.



Fonte: Acervo Pessoal

A Tabela 2 apresenta os dados dos equipamentos utilizados durante os estudos.

Tabela 2 - Dados dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Código do sismógrafo	Descrição	Número certificado	Próxima calibração
BE 17257	Minimate Plus	BG16241VMA07/01/2020 e BH12284VMA07/01/2020	07/01/2021
BE 17259	Minimate Plus	BG16242VMA08/06/2020 e BH12285VMA08/06/2020	08/06/2021
BE 19876	Minimate Plus	BG19005VMA07/01/2020 e BH13691VMA07/01/2020	07/01/2021
BE10422	Minimate Plus	BG9649VMA11/12/2019 e BH8338VMA11/12/2019	11/12/2020
UM 15765	Micromate	UM157952019927-1	27/09/2020
UM15795	Micromate	UM157952019927-1	27/09/2020
UM 15796	Micromate	UM157962019927-1	27/09/2020
UM15797	Micromate	UM157972019927-1	27/09/2020
UM 15798	Micromate	UM157982019927-1	27/09/2020
UM 15799	Micromate	UM157992019927-1	27/09/2020
UM 15800	Micromate	UM158002019927-1	27/09/2020

Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

### 3.4 Acompanhamento dos trabalhos de instalação dos sismógrafos

Foram instalados 10 sismógrafos no talude norte, no intuito de quantificar as vibrações que incidem sobre a estrutura geotécnica e são transmitidas pelo maciço rochoso.

A disposição destes sismógrafos foi pensada para que pudessem registrar medidas que fossem as mais representativas, de acordo com o posicionamento das detonações que ocorreram no mês de setembro de 2020, pois os sensores dos sismógrafos eram fixos (Figura 6).

Figura 6 - Mapa de arranjo dos sismógrafos instalados no talude norte.



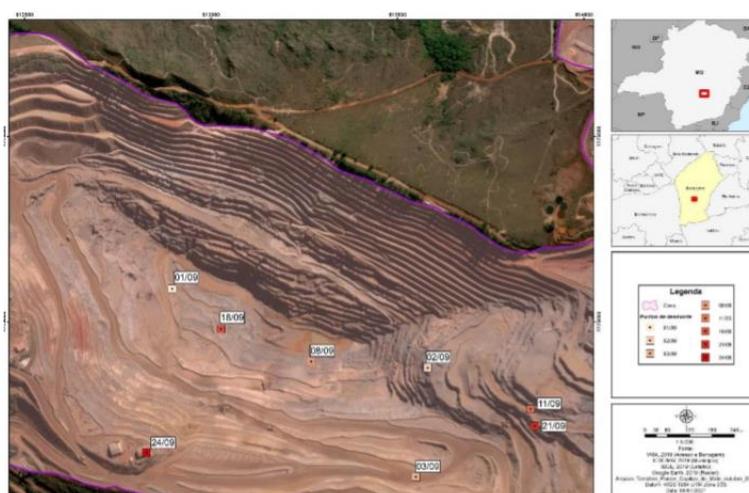
Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

### 3.5 Acompanhamento das detonações

O método de desmorte que gera a vibração induzida foi o tradicional, normalmente praticado na mina, com emulsão explosiva bombeada, altura de bancada de 10 metros, diâmetro do furo de 8 polegadas e temporização definida de acordo com o modelo de blocos a ser desmontado, ou seja, dependente da composição e competência da rocha no local do desmorte.

Durante o estudo foram realizados 8 desmortes de rocha (Figura 7), o que permitiu que fossem realizados estudos preliminares referentes à atenuação de vibrações para cada desmorte. Para melhor desenvolvimento do trabalho, foi alinhado com as equipes envolvidas as datas (01/09/2020 a 24/09/2020) e locais dos desmortes. Para maior acurácia das informações que auxiliam na análise primária (que é a distância escalonada) foi utilizado GPS para o levantamento das coordenadas geográficas de todos os pontos de medições e dos locais de desmortes. Os sismógrafos foram programados previamente para funcionarem de segunda a sexta, com intervalos de operação estabelecidos entre 10:30h até 16:30h pois os horários de detonação ocorrem geralmente entre 11:00h e 13:00h, mas quando ocorrem atrasos, podem ocorrer até as 16:00h, portanto foi definido um intervalo de 30 minutos anterior e posterior aos prováveis horários de detonação.

Figura 7 - Mapa com a localização das detonações realizadas na cava.



Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

### **3.6 Avaliação dos resultados apresentados pela empresa executora nos aspectos de interesse deste estudo**

Após realizado o experimento os sismógrafos foram transportados para o laboratório, onde foi realizada a coleta, pré-análise e interpretação dos dados. Seguindo a metodologia partiu-se para análises mais apuradas dos ensaios, a partir das quais foram definidas equações de regressões e determinação dos coeficientes de transmissibilidade de ondas e análise de frequências. Em sequência foram realizadas as curvas de atenuação e análises de correlação com as variáveis não controladas, como geomorfologia, geologia, hidrologia e dados geotécnicos (VMA, 2020).

Com estas análises é possível interpretar se as ondas induzidas (sejam elas de corpo ou superfície) também podem ser agentes causadoras de danos na estrutura do talude norte. Para entender o tipo de onda que é mais relevante é realizada uma averiguação da assinatura de onda e equações com atenuações de corpo e superfície. Além de se determinar as influências das ondas no talude é possível melhorar o processo de desmonte e gerar curvas prognósticas que permitem determinar a carga de explosivo dentro da temporização x vibração com o zoneamento da lavra (VMA, 2020).

Para o item de velocidade de partícula calcula-se ainda para cada máximo a frequência (em hertz) medida de zero a pico e o instante de ocorrência (em milissegundos) a partir do início de seu acionamento.

Obtém-se ainda a resultante vetorial da velocidade de partícula, analisada em incrementos de tempo de um milissegundo, apresentando-se o valor máximo em todo o evento, bem como seu instante de ocorrência. A forma da onda é também impressa sob o comando do usuário. Com o uso de programas adicionais, interpreta-se o espectro de frequência através de análise de “Fast Fourier Transform”, bem como se executam estudos sobre a precisão de acessórios utilizados, e ainda, realizam-se comparações e interpretações com normas e regulamentações de diferentes procedências. Esse equipamento contém memória interna para registrar, analisar e arquivar o resultado de até 400 eventos de 1 segundo de duração.

Foram utilizados resultados de intensidade de PPV – “Peak Particle Velocity” registrados no monitoramento sismográfico executado. Os valores

obtidos nos ensaios tiveram intensidades variadas e foram tratados por métodos estatísticos para elaboração de um modelamento envolvendo uma equação prognóstica matemática de carga x distância.

Os ensaios quando realizados pela empresa VMA têm como referência a norma ABNT NBR 9653, atualmente em sua versão de 2018 e procedimentos internos diversos (Tabela 3).

Tabela 3 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência.

Faixa de Frequência	Limites de velocidade de vibração de partícula de pico
4 a 15 (Hz)	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 (mm/s)
15 a 40 (Hz)	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 (mm/s)
Acima de 40 (Hz)	50 (mm/s)

Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

NOTA 1Hz corresponde a uma oscilação por segundo

Fonte - Norma ABNT NBR 9653, 2018

## 4 ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO

### 4.1 Localização

A área de estudo está localizada em mina de uma mina de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero de propriedade da empresa Vale situada no município de Nova Lima, M.G (Figura 8).



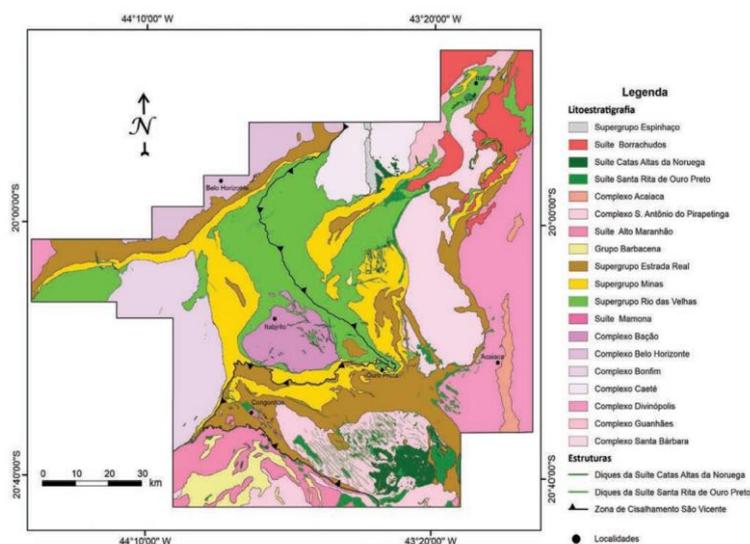
Figura 8 - Localização da cidade de Nova Lima no estado de Minas Gerais.

## 4.2 Contexto geológico regional

O Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969), província metalogenética localizada na região centro-sul de Minas Gerais e a sul de Belo Horizonte, ocupa uma área de pouco mais de 7000 km<sup>2</sup>. Sua porção oeste se encontra inserida nos domínios do Cráton São Francisco (Almeida 1967, in Alkmim & Marshak 1998), enquanto a porção leste, envolvida na deformação brasiliana, na Faixa Araçuaí. Sua morfologia é marcada pelos afloramentos das formações ferríferas bandadas e, em menor proporção, quartzitos, que ocupam os topos das serras, enquanto as regiões dominadas por xistos, filitos e os terrenos granito-gnáissicos ocupam os baixos topográficos de modo geral, em função da menor resistência à erosão que essas rochas apresentam em relação às formações ferríferas e aos quartzitos. O mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero está representado na Figura 9.

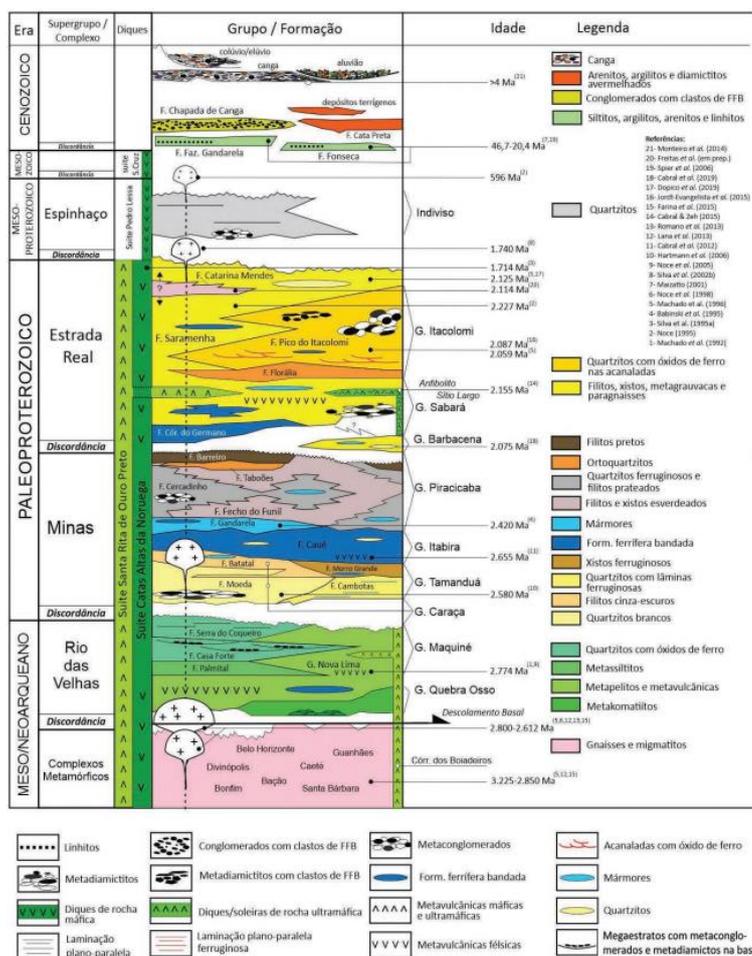
A estratigrafia regional do Quadrilátero Ferrífero (Figura 10) pode ser representada por três grandes conjuntos litológicos: os complexos granito-gnáissicos, a sequência greenstone belt, representada pelo Supergrupo Rio das Velhas e pelos sedimentos do Supergrupo Minas. Sobreposto a todo esse pacote ainda se encontram os Grupos Sabará e Itacolomi, além de coberturas terciárias como colúvios e lateritas.

Figura 9 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero



Fonte - (Endo *et al.* 2019a)

Figura 10 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero



Fonte - (Endo *et al.* 2019b)

O embasamento do Quadrilátero Ferrífero é composto por complexos granito-gnáissicos e migmatitos de composição granodiorítica-tonalítica-trondhjemítica (TTG), com idades de cristalização arqueanas variando entre 3,2 a 2,7 Ga (Teixeira *et al.* 2000; Lana *et al.* 2013), representados pelos Complexos Santa Barbara, Belo Horizonte, Bonfim, Bação e Caeté. A exceção do Complexo Bação, os demais ocupam áreas no entorno às delimitadas pelas rochas supracrustais.

O Supergrupo Rio das Velhas constitui uma sequência arqueana do tipo greenstone belt. Em sua base encontra-se o Grupo Nova Lima, que é composto por rochas metavulcanossedimentares como lavas komatiíticas e toleíticas, rochas vulcanoclásticas, além de rochas sedimentares marinhas e químicas. Sobreposto ao Grupo Nova Lima encontra-se o Grupo Maquiné, que é dividido na Formação Palmital (O'Rourke, 1957 apud Dorr, 1969) em sua base, composta por quartzitos sericíticos e filitos quartzíticos, e na

de Formação Casa Forte (Gair, 1962 apud Dorr, 1969) em seu topo, composta de quartzitos sericíticos e filitos quartzíticos com intercalações de conglomerados.

Sobreposto à sequência greenstone belt se encontram as rochas do Supergrupo Minas. Essas rochas representam uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica (Machado *et al.* 1989; Babinski *et al.* 1991), e são divididas em três Grupos. Em sua base tem-se o Grupo Caraça, dividido na Formação Moeda, basal, que é representada por metaconglomerados, filitos e quartzitos de grão fino a grosso, e a Formação Batatal no topo, constituída principalmente por filito sericítico e, subordinadamente, por metachert, formação ferrífera e filito grafitoso (Dorr, 1969). Sobreposto ao Grupo Caraça aparece o Grupo Itabira, dividido em Formação Cauê na base, composta por itabirito silicoso, itabirito dolomítico, itabirito anfibolítico e pequenas lentes de xistos, filitos e margas, e Formação Gandarela no topo, representada por rochas metassedimentares carbonáticas, margas, filito dolomítico, dolomito ferruginoso e filito (Dorr, 1969). No topo do Supergrupo Minas, ocorrendo em discordância erosiva ou contato gradacional com as rochas do Grupo Itabira encontra-se o Grupo Piracicaba. Sua formação basal é a Formação Cercadinho, constituída de quartzitos, quartzitos ferruginosos, filitos ferruginosos, filitos dolomíticos e dolomitos. Sobreposto a Formação Cercadinho encontra-se a Formação Fecho do Funil, composta por filitos dolomíticos ou não, e dolomitos impuros e apresentando contato gradacional com a sobreposta Formação Taboões, constituída por ortoquartzitos. No topo do Grupo Piracicaba tem-se a Formação Barreiro, que é uma sequência de xistos e filitos grafitosos ou não.

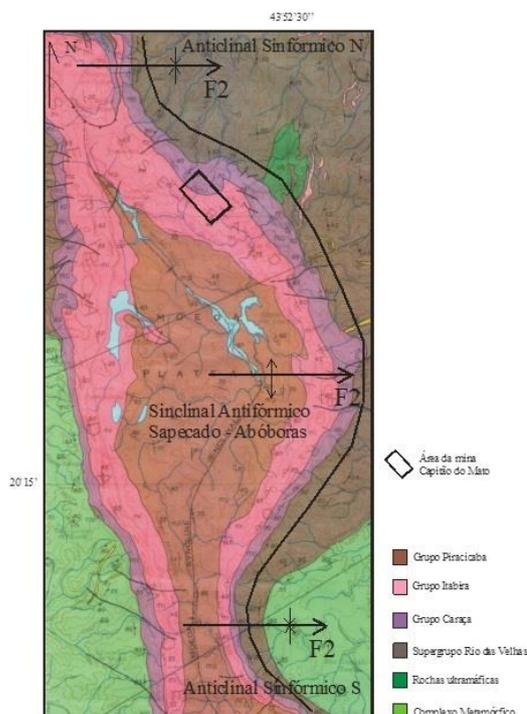
O Grupo Sabará ocorre sobreposto ao Supergrupo Minas por uma discordância erosiva (Dorr, 1969). Sua base é representada pela Formação Saramenha, que é caracterizada por intercalações de metadiamicritos, metapelitos, metarritmitos, metarenitos, xistos e filitos negros. Em seu topo se encontra a Formação Estrada Real, composta predominantemente por metarenitos sericíticos que gradam para metaconglomerados polimíticos, ambos intercalados com camadas métricas a decamétricas de metadiamicritos (Almeida *et al.* 2005).

No topo da estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero se encontra o Grupo Itacolomi, composto por rochas sedimentares clásticas, como quartzitos, filitos e xistos. Sua ocorrência se dá principalmente na serra do Itacolomi, localizada na região de Ouro Preto, na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero.

O Sinclinal Moeda (Figura 11) é uma estrutura regional de direção N-S que ocupa a borda oeste do Quadrilátero Ferrífero. Possui extensão aproximada de 40km desde sua conexão a norte com a Serra do Curral até sua conexão a sul com o flanco norte do Sinclinal Dom Bosco (Dorr, 1969).

Tal estrutura compreende rochas de todas as unidades do Supergrupo Minas (Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba) e o Grupo Itacolomi, de modo que as rochas se tornam mais jovens a medida que se avança para o interior do Sinclinal. O flanco leste se encontra em contato com a sequência greenstone belt do Supergrupo Rio das Velhas em toda sua extensão, ao passo que no flanco oeste esse contato se limita apenas a região norte, de modo que a parte restante se encontra em contato com o Complexo Granito-Gnáissico Bonfim.

Figura 11 - Mapa regional do Sinclinal Moeda mostrando região onde se localiza a mina objeto de estudo

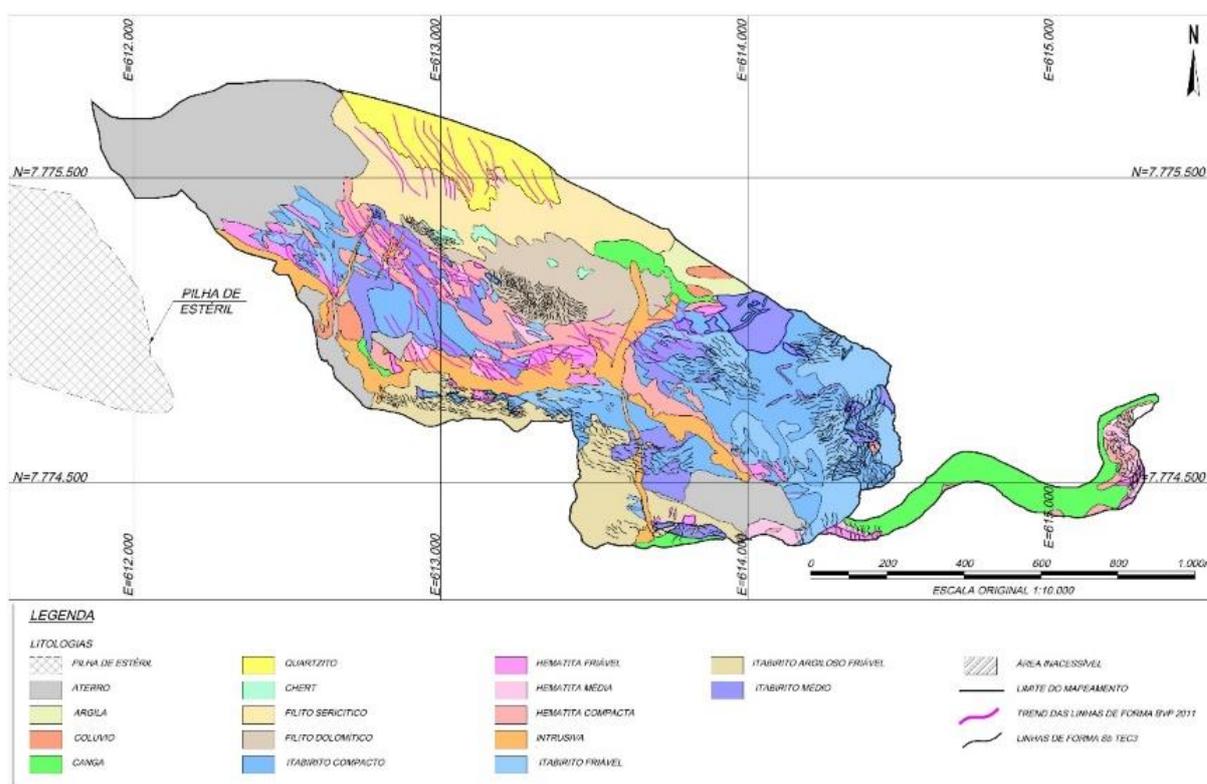


Fonte - (Dorr, 1969 in Ferreira Filho *et al.* 2005).

### 4.3 Caracterização geológica

A seguir serão apresentadas as descrições das rochas e das estruturas encontradas durante o mapeamento, bem como o agrupamento dos domínios litoestruturais propostos para a mina objeto de estudo (Figura 12)

Figura 12 - Mapa geológico e de linhas de forma da mina objeto de estudo.



Fonte – Tech3/Vale 2019

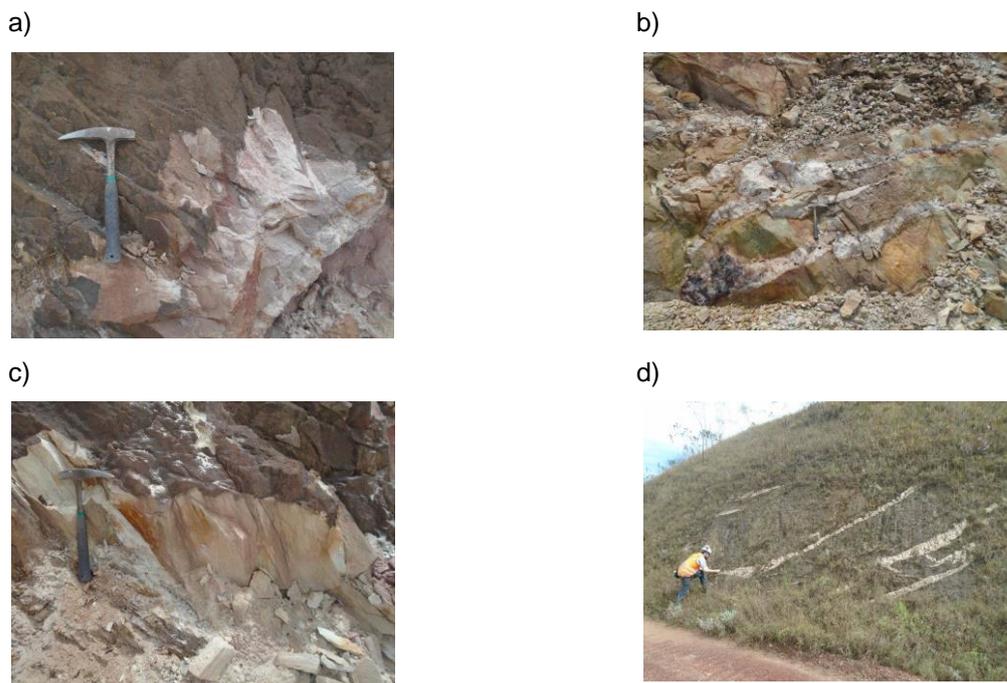
### 4.4 Litotipos

Os litotipos e descrições das rochas objeto do estudo foram realizadas pela empresa Tech3 no ano de 2019 e são apresentadas neste estudo por estarem em estudos anteriores no banco de dados da Vale S.A.. Pôde-se obter informações da estrutura de acordo com sua composição litológica e geomecânica.

#### 4.4.1 QUARTZITOS

Os quartzitos, pertencentes à Formação Moeda, encontrados ocupam uma porção expressiva da parte mais elevada da parede norte da cava. São em sua maioria friáveis, apesar de aparecerem, localmente, compactos. O acamamento Sb, identificado como uma estrutura primária marcada por níveis de variação granulométrica, segue o trend geral da cava NW-SE apresentando altos ângulos de mergulho para NE, na maior parte das vezes. A granulometria observada varia de fina a média, podendo ser identificados alguns níveis microconglomeráticos (Figura 13a e Figura 13c). Inúmeros e espessos veios de quartzo são encontrados em meio aos quartzitos, como mostrado nas Figura 13b e Figura 13d.

Figura 13 - (a) Quartzito Moeda; (b) Veios de quartzo em quartzito; (c) Quartzito Moeda; (d) Veios de quartzo em quartzito.



Fonte – Tech3/Vale

#### 4.4.2 FILITOS

Os filitos, pertencentes à Formação Batatal, assim como os quartzitos também são encontrados na parede norte da cava e ocupam uma área ainda mais expressiva do que aquela ocupada pelos quartzitos. Do mesmo modo,

eles também apresentam trend geral NW-SE, com mergulhos de alto ângulo. Eles podem ser divididos entre filitos sericíticos e filitos dolomíticos, de acordo com a mineralogia dominante em cada um dos litotipos. Associado aos filitos podem ser observadas lentes de metachert (Figura 14d).

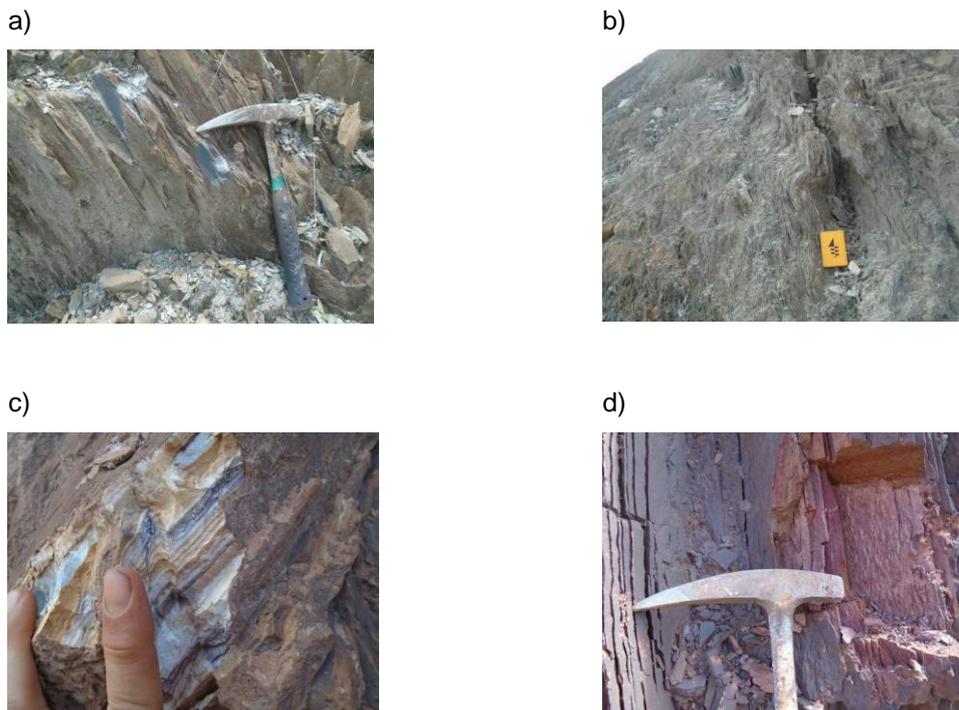
#### 4.4.3 FILITO SERICÍTICO

O filito sericítico, rico em sericita e de coloração predominantemente cinza, tem na maior parte das vezes o bandamento pouco definido, marcado por uma discreta variação de cores que se alternam entre tons de cinza e cinza azulado a esverdeado (Figura 14a). filitos sericíticos, podem apresentar bandamentos com cor amarelada ou esbranquiçada formados por argilominerais, micas, areias quartzíticas, ora compactos e ora friáveis com lentes de metacherts fraturados, Tal estrutura é difícil de ser observado em campo. Ele também apresenta uma xistosidade bem desenvolvida, oriunda da orientação dos seus minerais placóides (Figura 14b).

#### 4.4.4 FILITO DOLOMÍTICO

O filito dolomítico, por outro lado, apresenta um bandamento sedimentar de fácil identificação (Figura 14c). Apesar de sua denominação é, em superfície, livre de carbonatos e constituído por bandas milimétricas a centimétricas de material argiloso a siltoso, intercalado com níveis ferrosos apresentando contato gradacional com as formações ferríferas. Os filitos apresentam também uma clivagem de crenulação ortogonal ao bandamento, com um trend N-S e alto ângulo de mergulho para E. O filito dolomítico se encontra, de modo geral, mais intemperizado do que o sericítico, podendo ser identificadas porções de saprolito em meio ao corpo rochoso.

Figura 14 - (a) Filito sericítico; (b) Dobra em filito sericítico; (c) Filito dolomítico ; (d) Metachert.



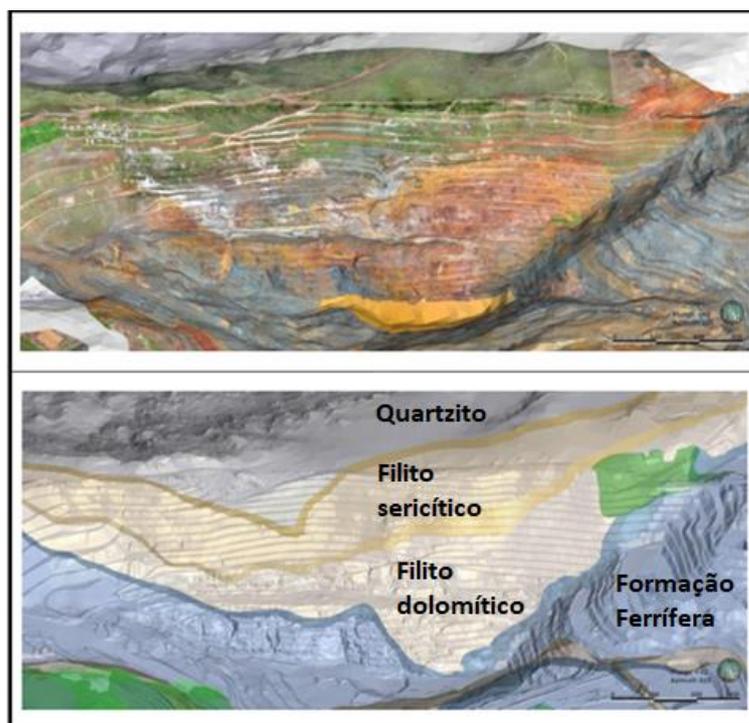
Fonte Tech3/Vale

#### 4.4.5 ITABIRITOS

Nas paredes da cava aflora a formação ferrífera (itabirito) da Formação Cauê em sua maior extensão. Os itabiritos podem ser agrupados de acordo com sua resistência, ocorrendo litotipos friáveis, médios e compactos. De modo geral, tais litotipos ocorrem se alternando ao longo da cava, apresentando contato tanto pelo bandamento como de forma aleatória. Nem sempre foi possível discriminar todos os corpos no mapa em função da escala. A atitude geral dessas rochas segue um trend NW-SE, embora na extremidade leste de da cava, na região da charneira, o bandamento apresente uma clara inflexão para N-S.

No maciço rochoso que compõe a Cava são encontradas rochas do Supergrupo Minas, no topo; quartzitos da Formação Moeda, na porção intermediária e filitos dolomíticos e filitos sericíticos da Formação Batatal como rocha encaixante do minério de formação ferrífera, localizado na base do talude e pertencentes à Formação Cauê (Figura 15).

Figura 15 - Imagem da superfície e geologia da mina objeto de estudo. Fonte: Imagens do software Leapfrog.



Fonte – Print do modelo 3D do software Leapfrog

Nos filitos da Fm. Batatal, ocorrem erosões de grande porte, indicando uma zona de fraqueza, possivelmente provocada por fraturas geológicas e famílias de descontinuidades constatadas em campo e o seu consequente intemperismo que, associados aos efeitos resultantes de uma maior presença de água, com origem em chuvas e enxurradas e águas subterrâneas provocam o processo erosivo, que pode ser catalisado por outros fatores como a desagregação (fraturamento) do material provocada pelas vibrações.

Avaliaram-se os fatores geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, geomecânicos, estruturais, geomorfológicos e topográficos e informações

sobre os fatores que potencialmente contribuem para todo esse processo de detonação e suas eventuais consequências na estabilidade do talude.

## 5 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA E CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO

Os maciços presentes na mina foram classificados de acordo com suas características geomecânicas, baseadas no RMR (BIENIAWSKY, 1989), em distintas classes:

- Classe de maciço V (maciço muito pobre): apresenta baixa resistência, sendo completamente alterado e fraturado. Caracterizado geotecnicamente como muito pobre.
- Classe de maciço IV (maciço pobre): caracterizado por possuir rocha muito alterada e intensamente fraturada.
- Classe de maciço III (maciço mediano): apresenta resistência moderada a alta, sendo caracterizado por alteração baixa a média, constituído de maciço rochoso.

A classificação do maciço rochoso foi elaborada seguindo os critérios do RMR (Rock Mass Rating) sugeridos por Bieniawski (1989) e critérios definidos pela VALE.

Essa premissa consiste na existência de dois universos de classificação: Universo Weak Rock e Universo RMR, os quais são distinguidos exclusivamente em função da resistência (R) à compressão uniaxial dos materiais. O Universo Weak Rock é composto pelas rochas brandas (majoritariamente os litotipos friáveis) e é dividido em Extremely Weak (R0), Very Weak (R1-) e Weak (R1+ e R2-). O Universo RMR respeita a classificação de Bieniawski (1989) (Figura 16). Ressalta-se que para este trabalho não foram levantadas em campo as nuances positivas (+) e negativas (-) das resistências R1 e R2, uma vez que estas premissas foram estabelecidas após o levantamento de campo. Desta forma, os materiais identificados com resistência R1 e R2 que não tiveram parâmetros das descontinuidades levantados, foram classificados como Weak Rock. Onde foi possível levantar parâmetros das descontinuidades, estes foram utilizados

para o cálculo do RMR segundo os critérios de Bieniawski (1989). As cangas lateríticas foram classificadas individualmente como Classe Canga, assim como os colúvios e solos, agrupados todos como Solos Lateríticos.

Figura 16 - Correlação entre o universo das Weak Rocks e do RMR em função da resistência a compressão uniaxial dos materiais



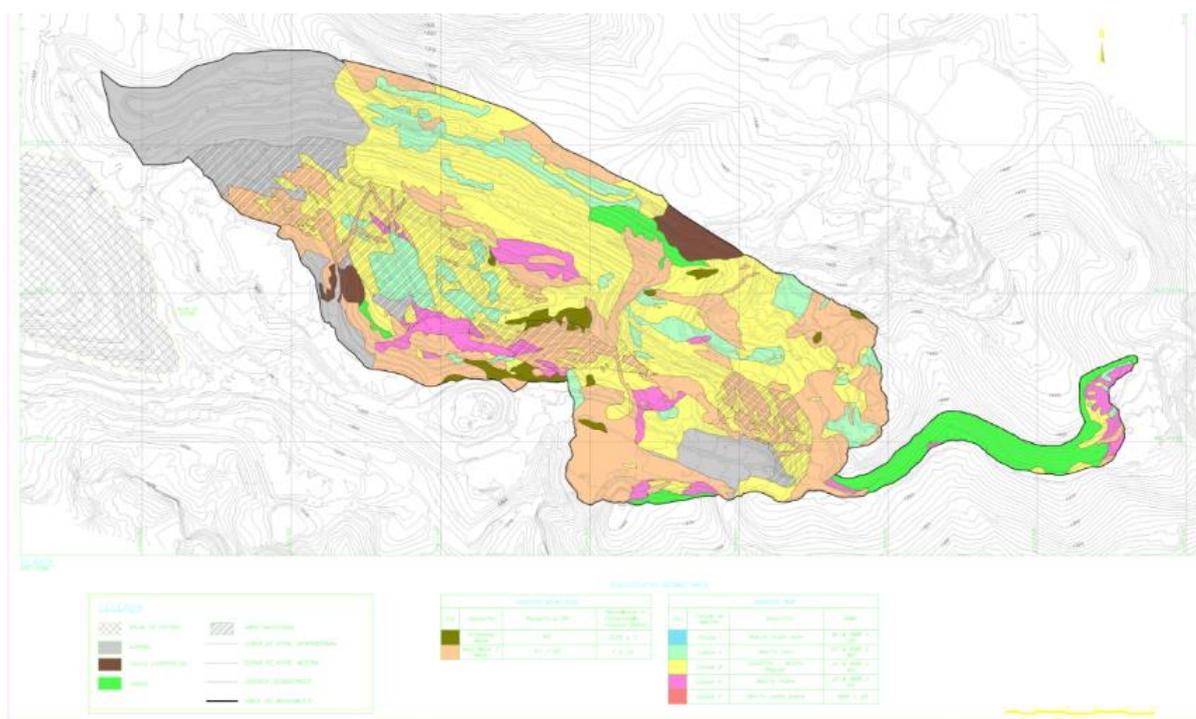
Fonte - (VALE, 2018).

## 5.1 Caracterização geomecânica

Os critérios de classificação e caracterização geomecânica foram realizados pela empresa Tech3 e em 2018 foi divulgado o relatório com mapa (Figura 17), em seção de perfil (Figura 18) e descrições destas litologias. Abaixo estão citadas as litologias objeto do estudo.

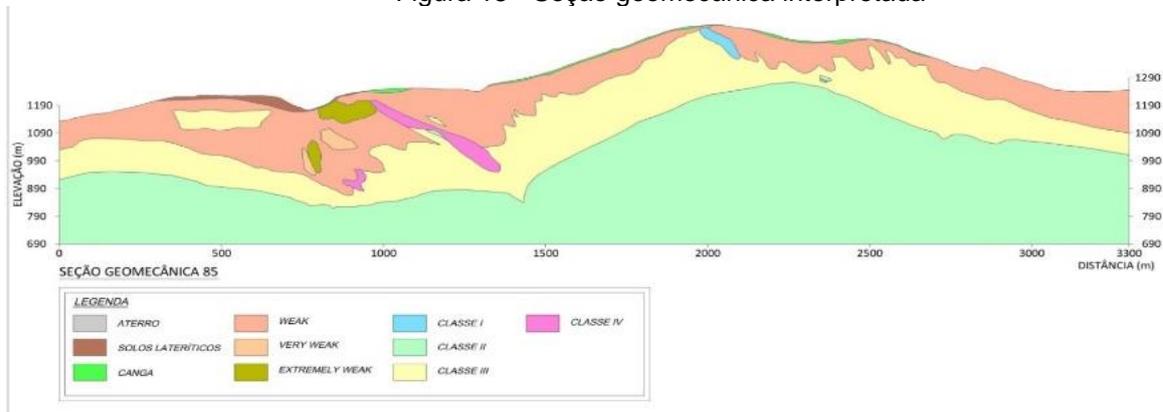
As rochas locais apresentam Fraturas (Fr), Foliação paralela ao acamamento (Sb), Foliação gerada pela primeira fase de deformação (Sn), e as foliações referentes às fases de deformação posteriores (Sn+1 e Sn+2).

Figura 17 - Mapa geomecânico da cava.



Fonte Tech3/Vale

Figura 18 - Seção geomecânica interpretada



Fonte: Tech3/Vale (2019).

### 5.1.1 QUARTZITOS

O atual estudo levantou pouco volume de dados na região dos quartzitos. No entanto, os resultados indicam que a grande maioria deles apresenta resistência branda (R2), apesar de também ocorrer em menores proporções quartzitos resistentes (R4) e muito resistentes (R5). O grau de intemperismo dominante é o moderadamente alterado (W3) e o RQD de tal litologia é, na grande maior parte das vezes, menor que 25%.

As discontinuidades avaliadas nos quartzitos foram Sn e Fr. Sn apresenta persistência muito grande (>20m), sem abertura ou preenchimento, variadas faixas de rugosidade e alteração da parede moderadamente alta (W3). Fr, por sua vez, apresenta persistência variando entre muito pequena (<1m) e pequena (1 a 3m), abertura oscilando entre moderadamente largas (1 a 5 mm) a nula, rugosidades apresentando valores de JRC entre 6-8 e 12-14, não apresentam preenchimento e paredes entre moderadamente alterada (W3) e levemente alterada (W2).

### 5.1.2 FILITO SERICÍTICO

Os filitos sericíticos encontrados apresentam grau de resistência branda (R2) como predominante, bem como grau de intemperismo moderado (W3). A maior parte das rochas avaliadas apresentam RQD menor do que 25%.

As discontinuidades identificadas nos filitos sericíticos são Sb, Sn e Sn+2. Sb apresenta persistência muito grande (>20 m), aberturas largas (>5 mm), ausência de preenchimento, variadas faixas de rugosidade e alteração da parede variando entre muito alterada (W4) a levemente alterada (W2). O Sn nos filitos sericíticos se caracteriza por persistência predominantemente muito grande (>20m), aberturas entre moderadamente largas (1 a 5mm) a nulas, variadas faixas de rugosidade, ausência de preenchimento e paredes moderadamente (W3) a levemente alteradas (W2). Já Sn+2 apresenta persistência média (3 a 10m), sem abertura ou preenchimento e paredes moderadamente alteradas (W3).

### 5.1.3 FILITO DOLOMÍTICO

Os filitos dolomíticos, apesar de apresentarem diversas faixas de resistência mostram uma predominância de branda (R2) e, principalmente, muito branda (R1). O grau de intemperismo majoritário é decomposto (W5), e todos os filitos avaliados apresentam RQD menor que 25%.

Quatro discontinuidades foram identificadas nos filitos dolomíticos. Sb e Sn apresentam persistência muito grande (>20m), ausência de

preenchimento, paredes com valores de JRC nas faixas 0-2 e 4-6, e intensamente alteradas (W4) a decompostas (W5). Já Fr e Sn+2 possuem persistência muito pequena (<1m) e ausência de preenchimento. Fr não apresenta abertura, e possui paredes com grau de alteração moderado (W3), enquanto a abertura de Sn+2 varia de entre nula e fechada (<0,1mm) e paredes com alteração moderada (W3).

## 5.2 Definição dos Parâmetros de Resistência

Os parâmetros geotécnicos foram atribuídos considerando os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e Hoek Brown a depender do comportamento do litotipo. Os litotipos friáveis (extremely weak, very weak e weak) apresentam o comportamento, em escala global, controlado pela resistência ao cisalhamento da matriz da rocha e possuem baixo grau de anisotropia. Alguns litotipos compactos apresentam comportamento geomecânico fortemente marcado pela presença de descontinuidades como o bandamento. Nestes casos foi incorporada a anisotropia de resistência no modelo geomecânico analisado. Os litotipos médios possuem um comportamento anisotrópico de resistência na matriz rochosa.

Os parâmetros de resistência foram baseados nos dados disponíveis na auditoria de reservas realizada pela TEC3 em nome da Vale em 2018 e em mapeamentos geotécnicos realizados na própria mina e publicado em 2019. Para os litotipos que não possuem ensaios, utilizou-se os parâmetros de resistência de minas próximas, por haver similaridade entre os litotipos e contexto tectono-estrutural.

Os parâmetros de resistência utilizados nos critérios de Mohr-Coulomb, Hoek Brown e Barton-Bandis foram obtidos a partir de ensaios existentes no banco de dados da empresa Vale e são apresentados na Tabela 4.



Figura 19 - Posição da detonação e proximidade do sismógrafo onde foi realizada a leitura



Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

A figura mostra o sismógrafo número 7 mais distante do que o de número 10, porém, pela razão de estar em cota semelhante à da detonação (aproximadamente cota 1300m), a vibração tem uma transmissão mais efetiva até a localização do de número 7.

Este evento teve um fogo programado com:

- 440 furos;
- Altura da bancada de 14 metros;
- Diâmetro de furo de 8”;
- Malha de 4 metros de afastamento e 5 metros de espaçamento;
- Furos realizados sem inclinação, ou seja, 90° em relação à praça;
- Volume médio de explosivo por furo foi de 215 kg de emulsão bombeada e 95 kg de nitrato (aproximadamente 310 kg por furo).

Salienta-se que este fogo já havia sido dimensionado de acordo com os estudos de furo assinatura e curvas de atenuação anteriores ao experimento atual .

## 7 RESULTADOS DOS ENSAIOS SISMOGRÁFICOS

Aparentemente, as vibrações registradas nas detonações realizadas pela VMA tiveram características normais, quando comparadas com eventos de outras regiões em área semelhantes.

Quanto às frequências das velocidades individuais pode-se dizer:

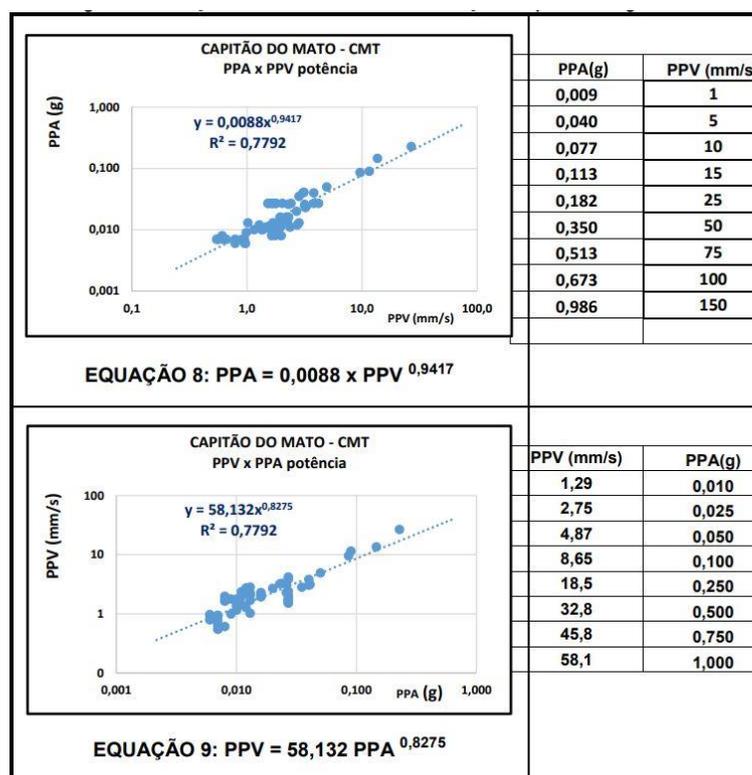
a) As frequências de pico (ZC) das vibrações pelo terreno para as distâncias dos pontos ensaiados estiveram classificadas na sua totalidade na faixa de baixa frequência, o que representou 100% dos valores inferiores a 40 Hz.

b) Analogamente, as frequências dominantes (FFT) das vibrações pelo terreno para as distâncias dos mesmos pontos ensaiados também estiveram classificadas na sua totalidade na faixa de baixa frequência, o que representou 100% dos valores inferiores a 40 Hz.

Temos que  $V_{pi}$  é a velocidade de partícula individual e  $A_{pi}$  é o deslocamento de uma partícula. Utiliza-se a relação com a PPV (Peak Particle Velocity) e PPA (Peak Particle Acceleration) para encontrar as relações que nos indicará os valores a serem utilizados no estudo. Para taludes de mina em rocha existem alguns trabalhos que recomendam valores variáveis em termos de velocidade de partícula (PPV /  $V_{pi}$ ) e, em outras situações, são realizados estudos de estabilidade mais específicos, com a utilização de acelerações de partícula (PPA /  $A_{pi}$ ) que atingem o local alvo do estudo. Nos estudos efetuados também foram analisados os resultados obtidos sob a forma de aceleração de partícula (PPA /  $A_{pi}$ ), em unidade de “g” (aceleração da gravidade).

De acordo com a VMA engenharia, apresenta-se na Figura 20, uma relação entre velocidades de partícula registradas PPV/ $V_{pi}$  versus a correspondente aceleração de partícula PPA/ $A_{pi}$  para cada ponto ensaiado, com valores fornecidos nas 08 (oito) detonações do total de 70 (setenta) conjunto de pontos registrados.

Figura 20 - Relação entre as velocidades e acelerações de partícula registradas



Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

Os sismógrafos foram induzidos a uma série de 80 (oitenta) registros de instrumentações individuais. Desse total, 09 (nove) tiveram valores inferiores aos mínimos programados para acionamento automático dos instrumentos, sendo 03 (três) inferiores a  $PPV/V_{pi} < 0,13$  mm/s e 06 (seis) inferiores a  $PPV/V_{pi} < 0,51$  mm/s. Portanto, ocorreram 71 (setenta e um) conjuntos de pontos que associam a intensidade de vibração registrada com a Distância (em metros) e a Carga Máxima por Espera (em kg).

É importante citar que de acordo com a ABNT NBR 9653:2018 o limite de vibrações em comunidades vizinhas pode atingir no máximo 15 mm/s e o sismógrafo 1, localizado mais a norte do talude e que se encontra mais próximo à comunidade mais próxima teve uma leitura máxima de 2,223 mm/s no dia 18/09/2020 e no evento analisado teve uma velocidade registrada de 1.955 mm/s, mostrando que a empresa cumpre as normas, não perturbando as vizinhanças.

## 8 ANÁLISES DE ESTABILIDADE: ELABORAÇÃO DOS MODELOS E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

### 8.1 Parâmetros sismográficos avaliados

O cálculo do valor pseudo-estático das seções de estabilidade no software slide deve ser calculados com o valor da aceleração na unidade de medida de valor referente à força gravitacional. Desta forma, observa-se o valor de PPV máximo medido nas detonações e utiliza-se o valor de frequência o valor de PPA máximo deste ensaio dentre todos os ensaios realizados. Portanto, utilizou-se o valor do sismógrafo mais próximo (ponto 07) da maior detonação histórica da lavra realizado no dia 02/09/2020.

Uma maneira de calcular com o software slide2, é transformar a onda longitudinal para 1 Hz, denominada essa transformação como frequência equivalente, tal como se faz quando quer se obter dados similares para solos ou maciços rochosos em cálculos de permeabilidade de onda para obtenção de rede de fluxos neste software.

Esta ação tem a função de transformar o dado inserido no software que é feito para realizar o cálculo de sismo natural, em uma ordem de grandeza que traga para a realidade a simulação do sismo induzido no software, medindo assim um valor mais fidedigno ao que foi sensível à estrutura no dia do experimento realizado.

A fórmula utilizada é a seguinte:

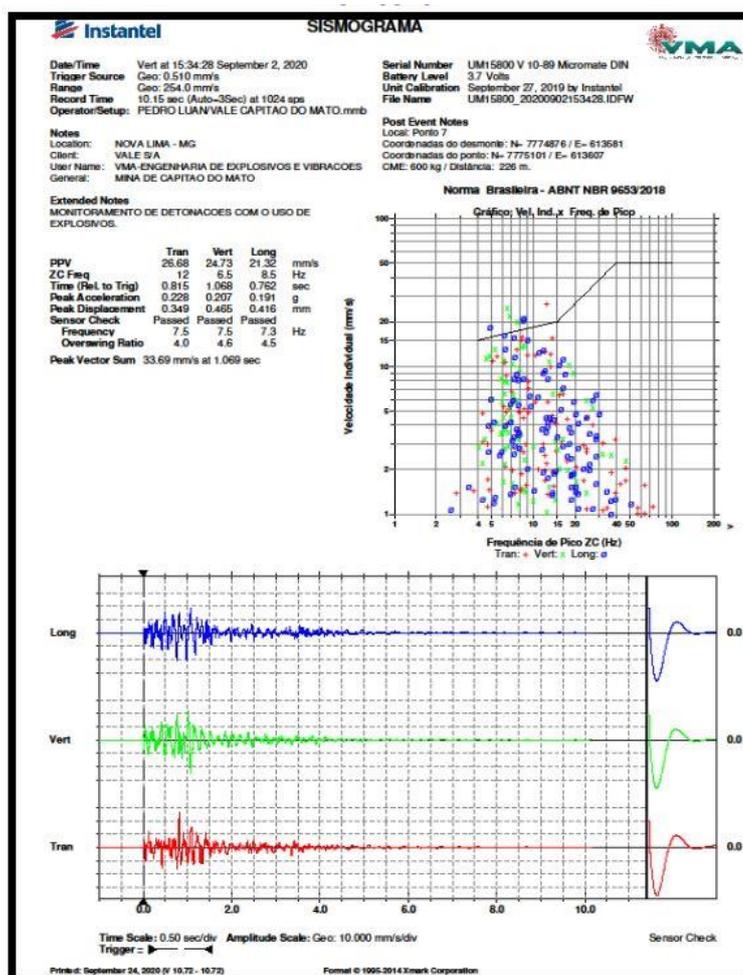
$$a_{eq} = \frac{1}{f'} a'_f$$

Esta equação equivale a nada mais que:

-Dividir 1Hz que é a frequência natural imputada no software slide2 pela frequência medida, multiplicada pelo valor da aceleração registrada no sismógrafo.

Desta forma, utiliza-se o sismograma de maior valor medido, fazendo assim uma análise mais conservadora possível da situação que pode ocorrer na lavra. Imputa-se, portanto, os dados do sismograma da Figura 21.

Figura 21 - Sismograma utilizado na conversão para que seja feita a simulação



Fonte - VMA – Engenharia de explosivos e vibrações, 2020.

O modelo geológico da mina foi fornecido pelo setor de geociências da Vale, e é gerado no software Leapfrog Geo a partir de dados de furos de sondagem e mapeamento de superfície, em que as posições dos furos são projetadas no espaço, assim como os dados de litologia, também com suas posições no espaço.

Os parâmetros das rochas que utilizados para as análises de estabilidade foram obtidos em ensaios triaxiais, em blocos de rocha ou blocos de amostra indeformada retirados das litologias referenciadas nos modelos geológicos. Assim, pode-se associar o modelo geológico 3D às litologias e às classes geomecânicas dos maciços, e obter os parâmetros de cada material com comportamento mecânico semelhante.

Desta forma, observa-se que o PPV medido foi de 26,68 mm/s, então, aplicando-se a equação citada anteriormente, divide-se 1Hz por 12Hz e multiplica-se por 0,228G, obtendo-se assim o valor a ser imputado no software para cálculo da estabilidade pseudo-estática no valor de 0,019G

## **8.2 Parâmetros máximos permitidos na estrutura**

Foram realizados os estudos de análise de estabilidade pseudo-estáticos considerando os dados obtidos. Após constatados os valores medidos, por interpretação, após várias análises no software Slide2, foi encontrado um valor limite para que fosse conservada a estrutura, mantendo a sua estabilidade, este valor limite encontrado foi de 0,1g.

Caso valores acima de 0,1g atinjam a seção crítica do talude, há uma tendência de abalo da estrutura ou até um rompimento de escala global. Porém estes valores têm que ultrapassar mais do que 5 vezes os valores registrados

Com os resultados obtidos de vibração em pontos críticos, foram calculados então, por meio do software Slide2, os valores de fator de segurança em seções consideradas críticas e representativas da geometria do talude, obtendo-se assim o fator de segurança estático e o fator de segurança durante a dissipação de energia provocada pelas detonações. Essa abordagem permitiu avaliar a instabilidade que pode ser induzida pelas ondas geradas durante as detonações, quando são utilizadas as equações de atenuação e quando não são utilizadas as equações de atenuação.

### 8.3 Softwares utilizados na obtenção e análise dos fatores de segurança

Para a obtenção das seções a serem analisadas, foram utilizados os softwares Leapfrog geo da Sequent na versão 6.0.4 e na sequência o software Slide2 da Rocscience na versão 9.012.

#### 8.3.1 LEAPFROG GEO 6.0.4

O Leapfrog Geo é um software inovador que vem revolucionando a modelagem geológica 3D oferecendo funcionalidades práticas e amigáveis, o que faz o usuário otimizar a produtividade aplicando a Modelagem Implícita.

No software Leapfrog pode-se gerar modelos 3D representando virtualmente as reservas, superfícies e topografias, trazendo assim uma forma de interpretar melhor as ações futuras no mundo da mineração. Um modelo geológico 3D representa uma visão espacial da estrutura do solo de fundação na área observada. Ele é utilizado como base para a criação de um projeto geotécnico e proporciona uma visualização mais clara e detalhada das condições geológicas e geotécnicas do local.

O Leapfrog ajuda a visualizar e entender seus dados para que você possa comunicar os riscos com as partes interessadas de todos os níveis técnicos – e tomar melhores decisões em projetos de mineração, geologia, geotecnia, se expandindo para projetos de engenharia civil e ambientais.

Assim, são extraídas seções geológicas em que podem-se ter uma interface com os modelos geomecânicos para um melhor entendimento da geologia local, parâmetros geotécnicos das rochas e assim exportam-se estas seções para o software de análise do fator de segurança. Trazendo assim uma representação dos fatores de segurança na geometria da topografia real ou de uma topografia futura planejada.

No caso específico deste estudo, são utilizados para confecção das seções de estabilidade, o modelo geológico da mina, o nível d'água medido pelos instrumentos na época do estudo e as superfícies topográficas medidas em setembro de 2020.

### 8.3.2 SLIDE2 9.012

Foi utilizado o software Slide2 na execução das avaliações de estabilidade pelo método de fator de segurança das estruturas selecionadas

Rocscience Slide é o software mais abrangente e completo de análise de estabilidade das encostas. Rocscience Slide analisa elementos finitos, águas subterrâneas e infiltração, levantamento rápido, sensibilidade, análise probabilística e projeto de apoio.

Todos os tipos de solos, rochas, encostas, aterros, barragens de terra e muros de contenção podem ser analisados. O software permite que se crie e edite modelos complexos com muita facilidade.

O software ainda permite interação com outros softwares como o Leapfrog, que foi utilizado, Autocad, Datamine entre outros.

O software tem também capacidades de análise probabilística extensas – você pode atribuir distribuições estatísticas para quase quaisquer parâmetros de entrada, incluindo as propriedades dos materiais, propriedades de apoio, cargas e localização do lençol freático. A probabilidade de falha index / fiabilidade é calculada, e fornece uma medida objetiva do risco de falha associada a um projeto de inclinação. A análise de sensibilidade permite determinar o efeito das variáveis individuais sobre o fator de segurança do talude.

Neste estudo, foram utilizadas as seções do software Leapfrog com as rochas presentes nestas seções, nível d'água medidos nos instrumentos de nível d'água e pelo setor de hidrogeologia da mina em questão, foram inseridos os parâmetros cedidos pela empresa vale e calculados os fatores de segurança.

## **8.4 Realização das análises de estabilidade estáticas e dinâmicas (com abordagem determinística**

As análises de estabilidade foram realizadas no software Slide 2, em que foram considerados o modelo geológico, a posição do nível d'água, a geometria das superfícies a se analisar e os parâmetros de cada classe do maciço para as seções retiradas do modelo 3D.

Foram definidas sessões críticas do talude, em que o fator de segurança fosse determinante para a segurança geotécnica da cava em estudo. O valor do FS das análises pseudo-estáticas das mesmas seções foi comparado com os valores de FS das análises considerando as vibrações resultantes das detonações, calculadas pelas equações de onda e definindo as velocidades e acelerações de partícula, de modo que pudesse ser realizada uma análise conservadora, para efeito de se preservar a segurança. Pretende-se então poder comparar os resultados e avaliar como a vibração resultante do desmonte pode afetar a estabilidade do talude e qual a variação do FS considerando-se a vibração medida e a vibração máxima aceitável pela estrutura na sua seção mais crítica.

## **8.5 Metodologia construtiva das seções em software slide2**

A metodologia construtiva das seções em análise realizadas tomando como base o modelo de blocos geológico da cava para localizar a posição geográfica das litologias.

O modelo de blocos foi construído com dados dos furos de sondagem realizados para a pesquisa mineral da região, em campanhas anuais de pesquisa. A atualização do modelo é feita conforme as campanhas avançam.

O modelo utilizado para a realização das análises era o utilizado na data da realização do experimento (09/2020) em que foram utilizados os sismógrafos para ter-se uma representação mais fidedigna ao modelo e situação da época, assim como a superfície topográfica do local na data do estudo.

Posteriormente foram realizadas seções no software Leapfrog, versão 6.0.4. Foram traçadas seções verticais em regiões que apresentam problemas geotécnicos, consideradas críticas, com níveis d'água que desfavorecem o equilíbrio-limite do talude. Neste sentido, procurou-se representar a situação mais crítica, avaliando o pior cenário para a análise.

O modelo de análise de estabilidade foi construído dentro do Slide2. Neste, foram, ainda, estabelecidas as características das seções a serem analisadas - unidades de medida do modelo, a direção da possível ruptura do talude, unidades de permeabilidade e unidades de tempo.

Importa-se a imagem da seção e estabelece-se a escala da seção a ser avaliada.

Foram construídos os limites externos da geometria das seções, e posteriormente, traçados os contatos das rochas. Definidos os limites das rochas, atribuíram-se os parâmetros de cada litologia, obtidos em amostragens e análises laboratoriais das rochas. Há uma atualização anual destas amostragens, trazendo assim valores representativos de coesão, ângulo de atrito etc.,

As análises foram realizadas considerando-se a metodologia de Morgensten-Price para determinação dos fatores de segurança estático do talude.

Para a interpretação do valor de fator de segurança pseudo-estático, utilizou-se o valor de 0,019 g de aceleração, este valor foi encontrado de forma iterativa, de tal forma que o talude ficasse intacto. Este valor é um pouco superior aos valores máximos obtidos no experimento e foi inserido no campo de aceleração horizontal.

Computam-se os dados novamente e obtém-se as análises de estabilidade pseudo estáticas.

## **8.6 Análise de resultados**

### **8.6.1 - MAPA DAS SEÇÕES**

As seções foram selecionadas de forma criteriosa em regiões onde podem ocorrer problemas geotécnicos como tendências a tombamentos flexurais e erosões ou tendências de erosão, em função da composição mineralógica e do comportamento geomecânico, da posição dos níveis d'água que podem comprometer o talude, da presença de famílias de descontinuidades, zonas de dobramentos e fraturadas e da grande ocorrência de famílias de descontinuidade com distâncias próximas com tendências maiores a rupturas.

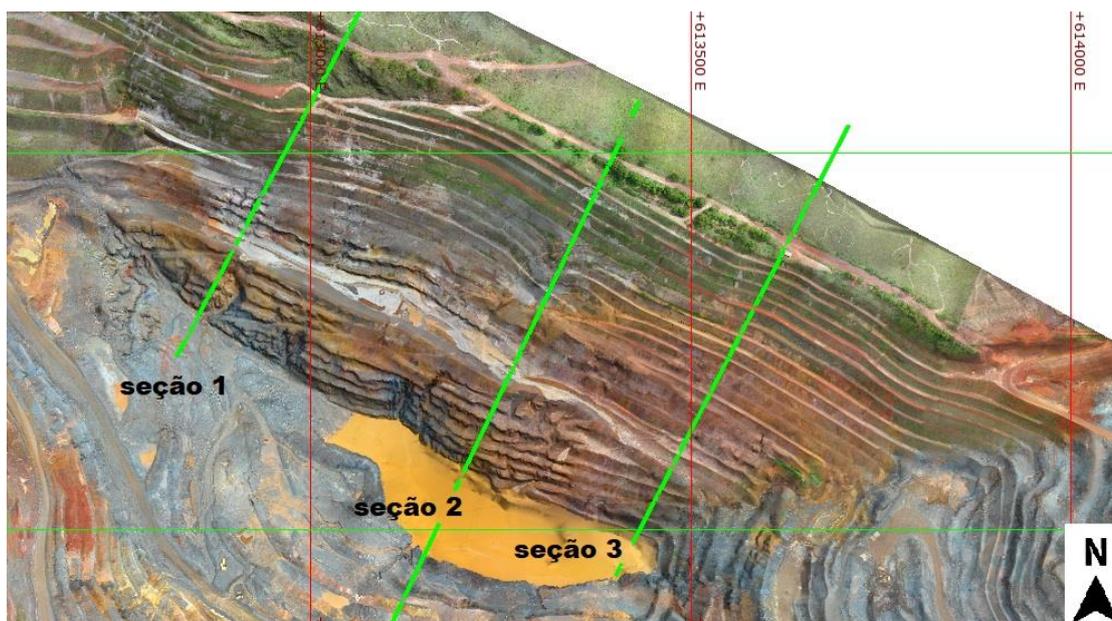
Selecionados os locais de avaliação foram então realizadas as análises no software Slide2. A motivação para a escolha das seções (Figura 22) foram:

Seção 1: local de acesso ao talude objeto do estudo, composto em grande parte da seção por filitos sericíticos de textura arenosa, em alguns locais, pouco coeso e com grande possibilidade de se erodir.

Seção 2: local onde ocorre uma erosão de grande porte e tombamentos flexurais, águas superficiais afloram dentro da erosão, aumentando assim a tendência de aumento da erosão e da poro-pressão nas fraturas e tendências de desagregação de materiais da estrutura, em conjunto com as vibrações contínuas.

Seção 3: Local composto basicamente por filitos sericíticos e dolomíticos, com berma de segurança mais curta e o menor fator de segurança de todo o talude avaliado. Essa seção é próxima da área de interesse mineral da cava, na qual detonações acontecem com frequência.

Figura 22 - Imagem com a localização das seções no talude.



Fonte – Print do modelo 3D do software Leapfrog

### 8.6.2 PARÂMETROS DAS ROCHAS

Os parâmetros utilizados para o estudo, mostrados na Tabela 5, foram definidos para cada uma das rochas que ocorrem nas seções de análise. A realização de análises com e sem vibração permitiram avaliar a influência das detonações sobre a estabilidade dos taludes.

Nas avaliações de estabilidade foram utilizados somente os parâmetros das rochas contidas no talude estudado. Utilizaram-se os valores do banco de dados de avaliações anteriores (Tabela 4) com avaliações a geomecânica local, interpretando-se e escolhendo-se os parâmetros que mais se assemelham aos das rochas locais.

Os dados referentes a parâmetros das rochas foram retirados dos bancos de dados da Vale S.A.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados nas avaliações.

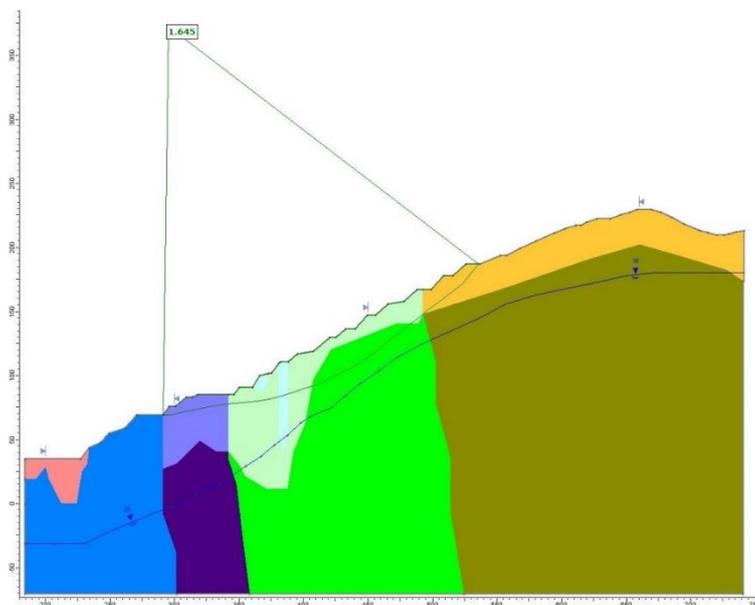
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Sat. Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Cohesion 2 (kPa)	Phi 2 (deg)	Angle (ccw to 1) (deg)	UCS (kPa)	mb	s	a	Water Surface	Hu Type	Hu
Filito Sericítico		20	22	Anisotropic strength	70	28	125	28	70					Water Surface	Automatically Calculated	
Filito Sericítico alterado		18	22	Mohr-Coulomb	65	29								Water Surface	Automatically Calculated	
Filito Dolomítico alterado		24	26	Mohr-Coulomb	45	28								Water Surface	Automatically Calculated	
Filito Dolomítico		19	23	Mohr-Coulomb	119	37								Water Surface	Custom	1
Hematita Média		38	40	Generalized Hoek-Brown						7000	6.99376	0.048301	0.500593	Water Surface	Custom	1
Quartzito compacto		19	22	Generalized Hoek-Brown						9000	6.99376	0.048301	0.500593	Water Surface	Automatically Calculated	
Quartzito Alterado		22		Mohr-Coulomb	40	32								Water Surface	Custom	1

Fonte – Vale 2017.

### 8.6.3 - SEÇÃO 1

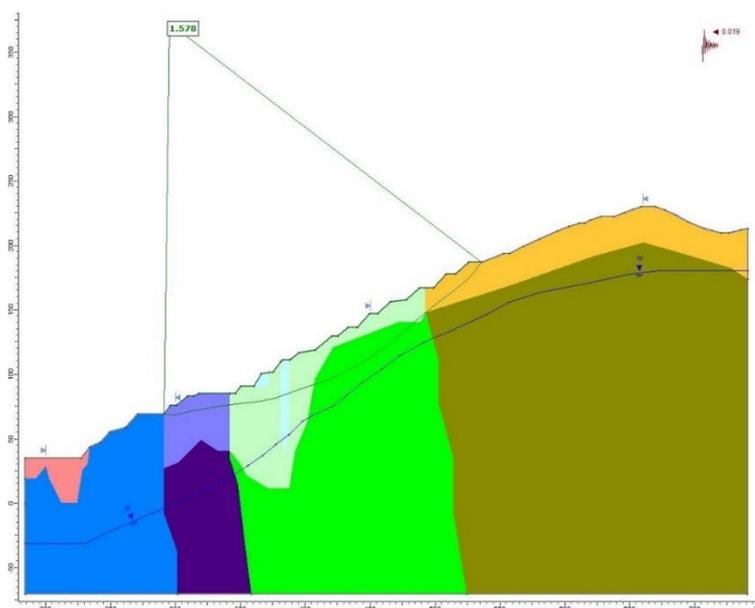
A análise da seção 1 resultou em um fator de segurança com valor de 1.645 (Figura 23) em condições estáticas. Com a consideração da vibração induzida pelo desmonte, igual a 0,019g, esse valor de FS diminui para 1.578(Figura 24).

Figura 23 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 1 - FS=1.645.



Fonte – Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog

Figura 24 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 1 - FS 1.578.

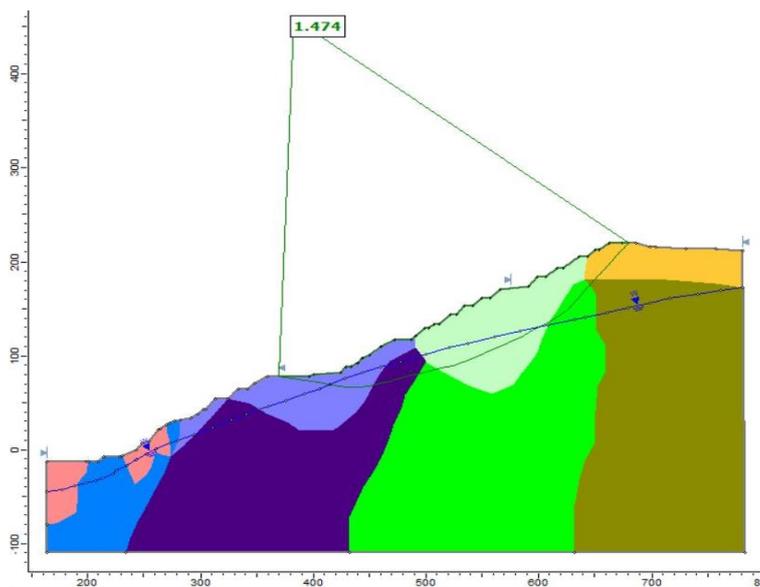


Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog

#### 8.6.4 - SEÇÃO 2

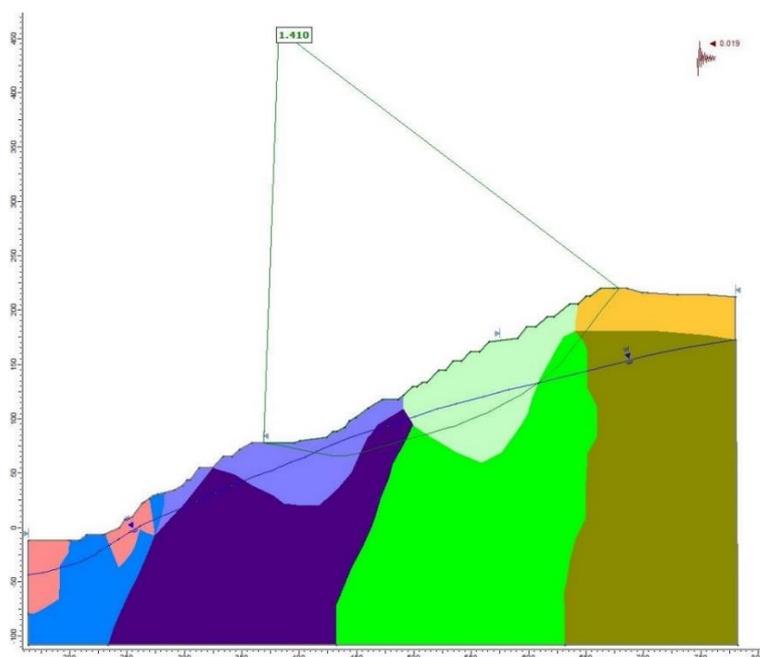
A análise da seção 2 resultou em um fator de segurança igual 1.474 (Figura 25) em condições estáticas. Considerando-se a vibração induzida pelos desmontes, igual a 0,019g, o valor do FS diminui para 1.410 (Figura 26).

Figura 25 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 2 - FS=1.474.



Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog.

Figura 26 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 2 - FS 1.410

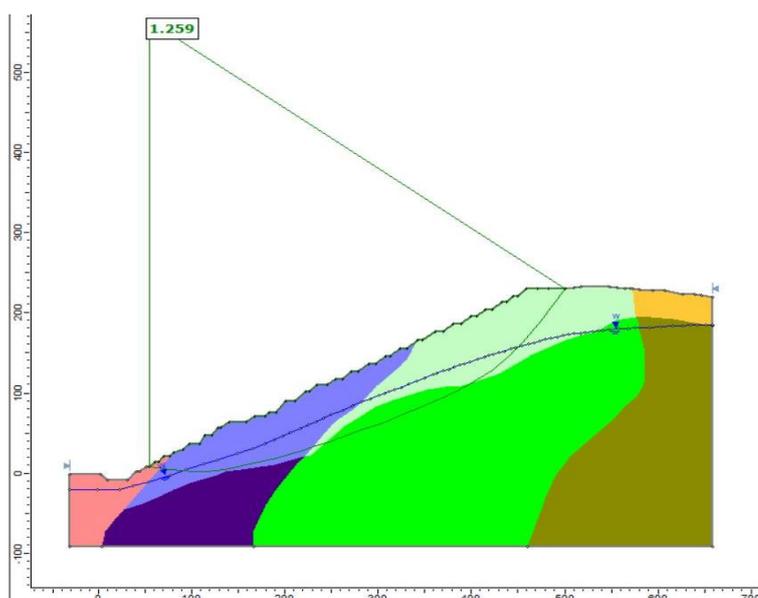


Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog.

### 8.6.5 - SEÇÃO 3

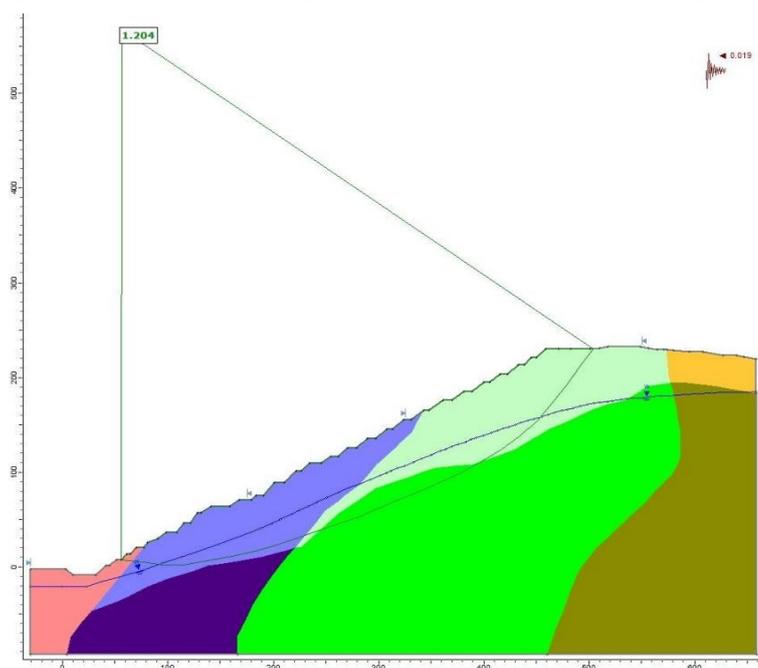
A análise de estabilidade da seção 3 em condições estáticas resultou em um fator de segurança igual a 1.259 (Figura 27). Considerando-se as vibrações induzidas pelas detonações, igual a 0,019 g, este valor de FS diminui para 1.204 (Figura 28). Estes valores são inferiores aos recomendados para taludes operacionais em mineração.

Figura 27 - Imagem com valor da avaliação de FS estático da seção 3. FS=1.259



Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog.

Figura 28 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 3 - FS 1.204

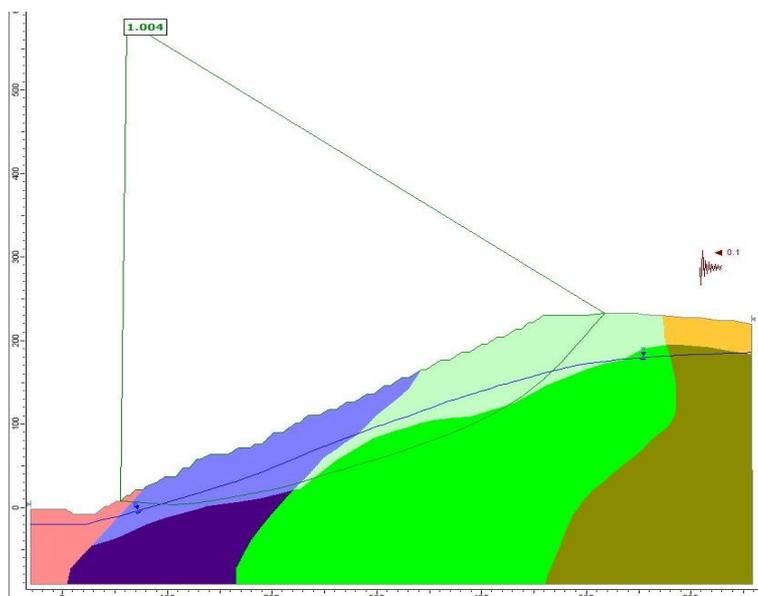


Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog.

### 8.6.6 - SEÇÃO 3 COM SIMULAÇÃO DE VIBRAÇÃO MÁXIMA

Com a realização das simulações com valores de aceleração hipotéticos, após vários testes onde se chegasse no valor limite de aceleração aceitável, percebe-se que se a aceleração chegar a 0,1g, o talude chega ao limite de rompimento na seção 3, portanto, temos o estudo de quanto um evento único tem de fornecer de vibração para que este seja catastrófico, ou seja, caso tenhamos um aumento muito representativo de aceleração ou diminuição da frequência, aproximadamente 6 vezes o medido, podemos ter problemas geotécnicos na seção medida (Figura 29).

Figura 29 - Imagem com valor da avaliação de FS pseudo-estático da seção 3 - FS 1.004.



Fonte - Software Slide2 e dados Vale no software Leapfrog.

## 9 CONCLUSÕES

Foram analisadas as equações de onda, o uso de acelerações, frequências e velocidades de partícula para uma comparação entre as simulações de estabilidade estática e pseudo-estática da estrutura por meio de equilíbrio limite e assim, obteve-se o valor do fator de segurança comparativo para cada seção crítica.

A comparação dos fatores de segurança com e sem aceleração causada pelas detonações mostram que a incidência da vibração na mina tem influência no risco geológico-geotécnico das estruturas de corte de rocha na cava, porém, a detonação controlada faz com que estes valores de vibração não ameacem a estrutura em um único evento.

Observa-se que no evento em que houve o pico de vibração, na maior detonação da história da mineradora na cava objeto de estudo, os valores de vibração alcançaram níveis próximos de 0,019 g, o que não representa risco para seus taludes de acordo com as simulações em um único evento.

Comparando-se a redução entre os fatores de segurança estático e pseudo-estático de cada seção, houve uma redução de aproximadamente 4,1% na seção 1, 4,3% na seção 2 e 4,5% na seção 3.

A seção 1 tem maior fator de segurança, enquanto a seção 2 tem menor, e a seção 3 tem o menor fator entre as 3 medidas. Em comparativo às porcentagens de redução de fator de segurança, as seções 2 e 3 tem uma diferença de aproximadamente 8% maior do que a seção 1, portanto, nestas condições, observa-se que os fatores de segurança mais baixos têm maior influência da vibração em seus valores de estabilidade nas seções pseudo-estáticas, quando comparados a valores mais altos.

O estudo constata, portanto, que a metodologia utilizada atualmente na detonação em frente de lavra não seria suficiente para que houvesse um rompimento de escala global causado por um único evento de detonação nas condições em que ele se encontrava em setembro de 2020. Pelo exposto, é possível atestar a segurança geotécnica nas atividades de detonação utilizando os parâmetros atuais. Porém, por haver outras estruturas

geotécnicas nas proximidades, como barragens, não se pode afirmar que é possível aumentar a carga de explosivos na detonação.

Foi calculado também o limite máximo de aceleração de partícula aceitável para os taludes analisadas na cava de estudo mostrando o limite máximo aceitável de aceleração nesta estrutura.

Os procedimentos de segurança atuais das minas exigem um cerco de 500 a 800 metros de distância da detonação, dependendo da sua localização, o que engloba a estrutura geotécnica. Entretanto, vale reforçar a necessidade de se isolar e interditar a estrutura geotécnica durante as detonações como forma de prevenção ao risco de ruptura e como esta pode afetar pessoas e equipamentos da mineradora.

De maneira a se mitigar os efeitos de detonações que possam causar instabilizações dos taludes, a equipe de Geotecnia e de desmonte da mineradora continua desenvolvendo métodos de redução de vibração e aumento da eficiência dos desmontes.

A metodologia aplicada neste estudo também pode ser utilizada em outros locais nos quais há a possibilidade de ruptura de um talude, por exemplo, a montante de barragens ou reservatórios e em túneis e escavações subterrâneas.

O estudo atual mostras a importância de se realizar simulações semelhantes quando existem estruturas próximas a detonação de rochas, evitando-se assim acidentes indesejados e recomenda-se, portanto, o uso desta metodologia dentre outras para prevenir tais acidentes em taludes, barragens, pilhas de estéril e rejeito ou até estruturas de construção civil.

## 10 SUGESTÃO DE ESTUDOS FUTUROS

Sugere-se para estudos futuros, uma avaliação mais detalhada do caso, tendo em vista que este carácter experimental e metodológico traz todos os artifícios a serem avaliados e a metodologia para obtenção destes dados de vibração. Portanto, ainda assim, pode-se utilizar:

- Modelos 3D de mina no software slide3D;
- avaliar a probabilidade de rupturas seria um bom complemento para este estudo,
- Avaliações utilizando elementos finitos;
- Avaliações semelhantes em minas diferentes com distintas litologias, parâmetros e superfícies topográficas;
- Estudos de influência de vibrações em barragens podem ser avaliadas.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9653**. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas (Procedimento). 2018.
- ALKMIM F. F. & MARSHAK S., **Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero**. Precambrian Research, 90: 29–58. 1998.
- ALMEIDA L. G., CASTRO P.T. A., ENDO I., FONSECA M. A., **O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco: Uma Revisão Estratigráfica**. Revista Brasileira de Geociências, 35 (2): 177-186. 2005.
- ÁLVAREZ-VIGIL, A. E. *et al.* **Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 55, p. 108–116, 2012.
- AZEVEDO, F. S.; PATRÍCIO, J. **“Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais”**. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, II série, nº 72, Lisboa. pp 85-88. 2003.
- B. JAYASINGHE *et al.* / **Attenuation of rock blasting induced ground vibration in rock-soil interface**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 11 - 770-778 (2019)
- BABINSKI M.; CHEMALE F. JR.; SCHUMUS W. R., **Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. Congresso brasileiro de geoquímica, 3. São Paulo. Anais. São Paulo, SBGq. 2, p.628-630. 1991.
- BACCI, D. DE L. C. *et al.* **Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte II**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 56, n. 2, p. 131–137, 2005a.
- BIENAWSKI, Z.T. **Engineering classification of jointed rock masses**. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrd 15, 335-344. 1973.
- BIENAWSKI, Z.T. **Rock mass classification in rock engineering**. In Exploration for rock engineering, proc. Of the symp., (ed. Z.T. Bienawski). Cape Town: Balkema. 1989. 1, 97-106.
- BRADY B. H. G; BROWN E. T. **Rock Mechanics for underground mining**. Londres Springer Science + Business Media, Inc – USA. 2004, 645p
- BYUNG-HEE CHOI *et al.* **Case study of establishing a safe blasting criterion for the pit slopes of an open-pit coal mine**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 57. 2013
- CANEDO, G.R. **Mapa de iso-velocidades: uma ferramenta para o controle das vibrações nas pedreiras**. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2013. 161p.

- CHARLIE WA, VEYERA GE, Durnford DS, Doehring DO. **Pore water pressure increases in soil and rock from underground chemical and nuclear explosions**. International Journal of Engineering Geology 1996. 43(4):225e36.
- D. GARAI *et al.* / **Impact of orientation of blast initiation on ground vibrations** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022
- DINIS DA GAMA, C. **“Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos”**. Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro de Portugal. 1998.
- DORR J.V.N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero**, Minas Gerais, Brazil. US Geological Survey Professional Paper. 1969. 110:641.
- DOWDING, C. H.; AIMONE, C. T. **Rock breakage: explosives**. Mining engineering handbook, p. 722–737, 1992.
- D.P. BLAIR. **Approximate models of blast vibration in non-isotropic rock masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 128. 2020.
- ISEE - INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVE ENGINEERS. **Blasters' Handbook**. Cleveland, 2003.
- ENDO *et al.* **Quadrilátero Ferrífero, Os avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**. 2019.
- FRANÇA G. S. **Estudo das vibrações geradas por detonações feitas na obra civil na Eclusa 2 de Tucuruí (PA)**. Rev. Bras. Geof. vol.29 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2011
- FERREIRA FILHO F., DIAS E., SANTOS R. **Geologia Estrutural da Mina Capitão do Mato**. Ouro Preto Geologia & Pesquisa Mineral. 2005
- GOMES, J. P. **Metodologia Para análise De Vibrações Provocadas Por Desmontes Com Recurso a Explosivos**. 2016. p. 89.
- H. Bazzi *et al.* **Modelling the effect of blast-induced vibrations on the stability of a faulted mine slope**. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 120. October 2020. p 591-597.
- KLEN, A. M. **Aplicação da técnica de simulação para análise da superposição de ondas sísmicas geradas em desmonte de rocha pela dispersão dos tempos de retardo utilizando o método de Monte Carlo**. 2010.
- KOPPE JC, SALVADORETTI P, MUNARETTI E & COSTA JFCL. **Monitoramento geofísico de desmonte de rocha com utilização de explosivos em condições de risco elevado em zona urbana**. Revista Escola de Minas. 2001. 54(4): 273-280.
- KUMAR, R. *et al.* **Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v. 8, n. 3. 2016. p. 341–349.

- MACHADO N.; NOCE C. M.; OLIVEIRA O. A. B. DE; LADEIRA, E. A., **Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozóico Inferior, com base em geocronologia U-Pb.** In: Simpósio Geologia Minas Gerais e Simpósio Geologia Brasília, Belo Horizonte, Anais Belo Horizonte, SBG/NMG. 1989. p.1-5.
- Mingwei Guo *et al.* / **Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011. 282–288.
- P. SUN ET AL. / **Comparison of dominant frequency attenuation of blasting vibration for different charge structures.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 14. (2022). p. 448-459.
- PRAMOD RAJMENY *et al.* **Use of radar technology to establish threshold values of blast vibrations triggering sliding of geological faults at a lead-zinc open pit mine.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 113. 2019
- REIL JP. **Why people complain about blasting.** Rock Products. 1998. p. 40-44
- RT-VALE-CMT-SEC20-Final.doc. **Relatório SEC.** Vale 2017
- R. Rodríguez *et al.* / **Determination of the ground vibration attenuation law from a single blast A particular case of trench blasting.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 13. 2021. 1182-1192.
- SARSBY, R. **Environmental Geotechnics.** Thomas Telford, Londres. Reino Unido. 2000.
- SILVEIRA, L. G. C. **Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do Quadrilátero Ferrífero.** – Ouro Preto. 2017.
- SILVA A. F. S “**Metodologia para mitigar os efeitos adversos gerados pelo desmonte de rocha com explosivos em minerações a céu aberto**” Belo Horizonte – 2019.
- SISKIND, D. E. *et al.* **Structure response and damage produced by air blast from surface mining.** v. Report of. 1980. p. 118.
- SISKIND, D. E. **Vibrations from blasting.** [s.l.] International Society of Explosives Engineers, 2000.
- SISKIND, B. D. E. *et al.* **Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting.** International Journal of Rock Mechanics and Mining. 2005.
- Sciences & Geomechanics Abstracts,** v. 18, n. 4, p. 76, 2005.
- STOJADINOVIC, S. *et al.* **A new approach to blasting induced ground vibrations and damage to structures.** Acta Montanistica Slovaca, v. 16, n. 4, 2011. p. 344–354.
- TEC3, T18026-109-RE-01.DOC. **Relatório de gestão de riscos geotécnicos.** Vale. 2019
- TEIXEIRA W., SABATÉ P., BARBOSA J., NOCE C. M., CARNEIRO M. A., **Archean and Paleoproterozoic evolution of the São Francisco Craton.** In:

Cordani U. G., Milani E. J., Thomas Filho A., Campos D. A. (Eds). Tectonic Evolution of South America. XXXI International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil. 2000. p. 101-137.

VALE. **Classificação geomecânica de maciços rochosos e validação de banco de dados**. Documento s/ nº. VALE, Belo Horizonte, novembro. 2018.

W.M. YAN. *et al.* **Reliability of empirical relation on the attenuation of blast-induced vibrations**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 59. 2013.

XIAOSHUANG LI *et al.* **Study on Three-Dimensional Dynamic Stability of Open-Pit High Slope under Blasting Vibration**. GeoScienceWorld Lithosphere. 2022.

YONGGANG GOU *et al.* **Attenuation assessment of blast-induced vibrations derived from an underground mine**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 127. 2020.

ZHAO, J. **Advances in Rock Dynamics and Applications**. Taylor and Francis Group. London. p 5-7. 2011

Rocscience website. **Tutoriais do software slide2 sobre análises pseudo estáticas**. <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/tutorials-overview/quick-start-tutorial>