



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



Renato Magni França

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA PERFURAÇÃO E DESMONTE NA
MINA TICO-TICO**

**OURO PRETO - MG
2021**

Renato Magni França

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA PERFURAÇÃO E DESMONTE NA
MINA TICO-TICO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor orientador: Dr. Hernani Mota de Lima

**OURO PRETO – MG
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F814a França, Renato Magni.
Análise da eficiência da perfuração e desmonte na Mina Tico-Tico.
[manuscrito] / Renato Magni França. - 2021.
53 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Rochas - Perfuração. 3. Rochas - Desmonte.
4. Explosivos. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 622.24

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 17 dias do mês de dezembro de 2021, às 13h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Renato Magni França** matrícula 15.1.1420, intitulado: **“ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA PERFURAÇÃO E DESMONTE NA MINA TICO-TICO”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, Eng.º de Minas Aderbal Alves da Silveira Júnior e Eng.º de Minas Raphael Rios Zeymer. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro, o Eng.º de Minas Aderbal Alves da Silveira Júnior, segundo o Eng.º de Minas Raphael Rios Zeymer e, em último, o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 10,0. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP, no prazo máximo de 15 (quinze) dias, uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão.

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2021.

HERNANI MOTA DE LIMA:46880488668

Assinado de forma digital por
HERNANI MOTA DE
LIMA:46880488668
Dados: 2021.12.17 14:21:01 -03'00'

Presidente: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: Eng.º de Minas Aderbal Alves da Silveira Júnior

Membro: Eng.º de Minas Raphael Rios Zeymer

Discente: Renato Magni França

Dedico esta conquista a todos que
colaboraram para a minha graduação.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus pela oportunidade de viver este e tantos outros momentos felizes.

Aos meus pais Ricardo e Elisa, exemplos de honestidade, caráter e dedicação.

À minha noiva Isabella, que esteve comigo desde o começo e que foi meu alicerce nesta caminhada.

Ao professor Hernani Mota de Lima, pela paciência e incentivo aos estudos.

À AngloGold Ashanti e Mineração Morro do Ipê, pelo valioso apoio e oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas da UFOP, pela amizade, companheirismo e aprendizado.

RESUMO

A fase de perfuração das rochas para desmonte é essencial para garantir uma boa fragmentação no processo. No ano de 2021, a mina objeto deste estudo passou por uma fase de implementação de novas tecnologias para desmonte de rochas, além de efetuar o primeiro desmonte com explosivo convencional da nova empresa detentora dos direitos minerários. Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica sobre explosivos e acessórios, suas propriedades e conceitos, utilizados para fornecer base teórica às ações realizadas. A fim de otimizar o processo de fragmentação, respeitando os limites de vibrações impostos na legislação, a tecnologia PLASMA4th da empresa ENAEX foi avaliada, apresentando ótimo desempenho nessas questões. Além disso, também foi utilizado o software O-Pitblast no estudo de caso de um desmonte por explosivo convencional na mina, onde foi sugerido alterações no plano de fogo para uma melhor eficiência do processo. Por último, foi sugerido a adição do *booster* com ligação eletrônica em cada furo, associado com a espoleta com ligação não-elétrica como backup, garantindo um melhor desempenho do desmonte e maior segurança.

Palavras-chave: perfuração, eficiência de desmonte, explosivos, o-pitblast.

ABSTRACT

The rock drilling phase for blasting is essential to ensure good fragmentation in the process. In 2021, the mine object of this study went through a phase of implementation of new technologies for rock blasting, in addition to carrying out the first blast with conventional explosive of the new company holding the mining rights. This presents study is a bibliographic review about explosives and accessories, their properties, and concepts, used to arrive at the performed actions. To optimize the fragmentation process, respecting the vibration limits imposed by legislation, the PLASMA4th technology from ENAEX was evaluated, showing excellent performance in these matters. In addition, the O-Pitblast software was also used in the case study of a conventional explosive blast in the mine, where changes in the fire plan were suggested for better process efficiency. Finally, it was suggested to add a booster with electronic connection in each hole, associated with a fuze with non-electric connection as a backup, ensuring better blasting performance and greater safety.

Keywords: *drilling, blasting efficiency, explosives, o-pitblast.*

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

" – polegadas

% - Porcentagem

°C - Graus Celsius

ABS - *Absolute Bulk Strenght*

AWS - *Absolute Weight Strenght*

Cal - caloria

cm - centímetro

cm³ - centímetros cúbicos

D - Distância

ρ_e - densidade do explosivo

EQ - Equação

g - Grama

K - Kelvin

kcal - quilocaloria

kgf - quilograma força

km - quilometro

m - Metros

M_{cop} - massa do copo

M_{exp} - massa do explosivo

Mpa - Mega Pascal

NP - Nitropenta

PD - Pressão de Detonação

RBS - *Relative Bulk Strenght*

REE - Energia Relativa Efetiva

RWS - *Relative Weigth Strenght*

CME – Carga Máxima por Espera

VOD - Velocidade de Detonação

VOD_c - Velocidade de Detonação conhecida

VOD_e - Velocidade de Detonação do explosivo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização da Mineração Morro do Ipê (GOOGLE EARTH, 2021).....	1
Figura 2 - Velocidade de detonação pelo tempo (JIMENO et al., 1987).	4
Figura 3 - Perfil esquemático de uma detonação JIMENO et al., (1987).....	5
Figura 4 - Método de Traulz (MUNARETTI, 2002).....	6
Figura 5 - Método de D' Autriche (JIMENO et al., 1987).	7
Figura 6 – circuito do Plasma (ENAEEX, 2021).....	11
Figura 7 - Aspecto da espoleta não elétrica de retardo (ORICA, 2019).....	14
Figura 8 - Aspecto físico dos boosters (MENDES, 2019).	16
Figura 9 – Detalhe por dentro do booster PENTEX TM G (ORICA, 2019).....	17
Figura 10 - Plano de Fogo (MANUAL BRITANITE).....	19
Figura 11 - Teoria da reflexão das ondas de choque (MORAIS, 2004).....	20
Figura 12 – Localização das cavidades monitoradas (CARSTE, 2021).....	22
Figura 13 – Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência (CARSTE, 2021).....	23
Figura 14 – Mapa geral das cavidades monitoradas e das fragmentações realizado na Mineração Morro do Ipê (CARSTE, 2021).....	24
Figura 15 – Local do desmonte (ARQUIVO PESSOAL,2021).....	26
Figura 16 – Plano de fogo (ELBL,2021).....	27
Figura 17 – Área do desmonte (ARQUIVO PESSOAL,2021).	28
Figura 18 – Simulação no Software (O-Pitblast,2021).....	29
Figura 19 – Informações do projeto (O-Pitblast,2021).....	30
Figura 20 – Plano de perfuração (O-Pitblast,2021).....	31
Figura 21 – Amarração do fogo (O-Pitblast,2021).....	32
Figura 22 – Plano de amarração, mostrando o sentido do lançamento (O-Pitblast,2021).	32
Figura 23 – PPV Previsto x Limite (O-Pitblast,2021).....	33

Figura 24 – Previsão de fragmentação (O-Pitblast,2021).....	34
Figura 25 – Nova previsão de fragmentação (O-Pitblast,2021).....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pressão de detonação da emulsão e da nitropenta. Adaptado de MUNARETTI (2002).	8
Tabela 2 – Características técnicas do Plasma (ENAEEX, 2021).	10
Tabela 3 - Composição típica de um explosivo em emulsão (Silva, V.C., 1986).	12
Tabela 4 - Propriedade da emulsão (MORAIS, 2004).	12
Tabela 5 - Características do estopim (MENDES, 2018).....	13
Tabela 6 - Tipos de cordéis, gramaturas e algumas funções (ORICA, 2019).	15
Tabela 7 - Propriedades do booster (MENDES,2019).	17
Tabela 8 – Pontos de instalação dos sismógrafos (CARSTE, 2021).....	21
Tabela 9 – Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência (CARSTE, 2021).	23
Tabela 10 – Histórico Sismográfico de desmontes (Arquivo pessoal, 2021).....	33
Tabela 11 – Propriedades do Booster (ORICA, 2021).....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Localização das minas	1
1.2	Formulação do problema	2
2	OBJETIVO.....	2
2.1	Objetivo Geral	2
2.2	Objetivos específicos	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Explosivos	3
3.1.1	Classificação de explosivos	3
3.1.2	Combustão, deflagração e detonação	3
3.1.3	Propriedades dos Explosivos	5
3.2	Tecnologia PLASMA4th.....	10
3.1.4	Principais Tipos de Explosivos	11
3.2	Acessórios.....	13
3.2.1	Principais tipos de acessórios	13
3.3	Elementos do plano de fogo	18
3.3.1	Face livre	19
4	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1	Metodologia utilizada	20
4.1.2	Utilização do Plasma	20
4.1.2	Análise do desmonte pelo O-Pitblast.....	25
4.1.2.1	O Software	25
4.1.2.2	Local e plano de fogo realizado.....	25
4.1.2.3	Simulação no O-Pitblast	28
5	DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	34
5.1	Troca da malha de Perfuração e Tamponamento	35
5.2	Adição de Booster com ligação eletrônica na iniciação do furo	37
6	CONCLUSÃO	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Localização das minas

As minas onde o presente estudo foi realizado, denominadas Mina Ipê e Mina Tico-Tico, localizam-se em Serra Azul, na divisa dos municípios de Igarapé, Brumadinho e São Joaquim de Bicas, na região metropolitana de Belo Horizonte, do estado de Minas Gerais, localizada na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero. A figura 1 apresenta a localização das minas no mapa de Minas Gerais.



Figura 1 Localização da Mineração Morro do Ipê (GOOGLE EARTH, 2021).

A exploração de minério de ferro na região ocorre desde a década de 1940, sendo que em 1975 a Empresa de Mineração e Terraplanagem (Emicon) começou a lavar e beneficiar o minério de ferro no local conhecido como Fazenda dos Quéias. Atualmente de propriedade da empresa Mineração Morro do Ipê S.A, que lava o minério de ferro e produz sínter, lump e concentrados (magnéticos e espirais).

1.2 Formulação do problema

Avaliando isoladamente os custos das etapas de operação de uma mineração tem-se que geralmente os preços de carregamento e transporte de minérios podem corresponder a mais da metade do custo operacional de minas a céu aberto e a cominuição é a etapa mais cara em todo o processo de produção (ASI e ORAEE 2006).

Fica claro, portanto, a importância da otimização dessa etapa para gerar economias no processo de lavra, e viabilizar o empreendimento como um todo, com uma correta fragmentação do material e influenciando nas etapas subsequentes ao desmorte, reduzindo o retrabalho.

A Mineração Morro do Ipê conta com cavidades de relevâncias variadas, podendo ser de baixa, média, alta ou máxima relevância, além de ter frentes de lavra próximas a uma rodovia federal, a BR-381. Para cada categoria de relevância das cavidades, há um limite de vibração permitido, que está associado com a segurança física das cavernas, visto que as atividades da mineração geram vibrações que podem gerar danos a essas cavidades e paralisar as operações, como está previsto no Plano de Controle Ambiental (PCE).

Portanto, é de grande importância utilizar bons explosivos e acessórios, bem como um ideal plano de fogo para se obter um resultado satisfatório no desmorte de rochas, respeitando os limites de vibração.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

- Estudar algumas das propriedades dos explosivos e analisar os resultados de rendimento de um desmorte realizado através do software O-PitBlast.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a utilização do PLASMA para fragmentação de rochas respeitando os limites de vibração;
- Avaliar a malha adequada para cada desmorte;
- Avaliar a utilização do *booster* na iniciação do “fogo”.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Explosivos

Explosivos são substâncias puras ou misturas, que ao serem acionadas por calor, atrito ou impacto, de maneira suficientemente energética, tem sua reação de decomposição em um curtíssimo intervalo de tempo, o que libera uma grande quantidade de energia e geram altas pressões e temperaturas (CROSBY, 1998).

3.1.1 Classificação de explosivos

3.1.1.1 Altos explosivos e baixos explosivos

Os explosivos podem ser classificados de acordo com a velocidade que suas reações acontecem. Enquanto altos explosivos possuem velocidades de detonação geralmente entre 1500 m/s e 9000 m/s, os baixos explosivos tem velocidade de até 1500 m/s. Por isso, os baixos explosivos apresentam menor poder destrutivo, quando comparados aos altos explosivos, e seus danos são causados pelo calor e pelas chamas ao invés de ondas de choque (JUNIOR, 2017).

3.1.1.2 Altos explosivos primários e Altos explosivos secundários

Os altos explosivos primários são altamente sensíveis e, portanto, são facilmente detonados por chama, centelha, impacto e/ou fricção, e são assim chamados por serem utilizados para iniciar altos explosivos menos sensíveis, chamados de altos explosivos secundários (JUNIOR, 2017).

3.1.2 Combustão, deflagração e detonação

Podemos diferenciar esses conceitos, assim como se classifica os explosivos, pela velocidade que suas reações acontecem. A figura 2 mostra a velocidade de reação pelo tempo:

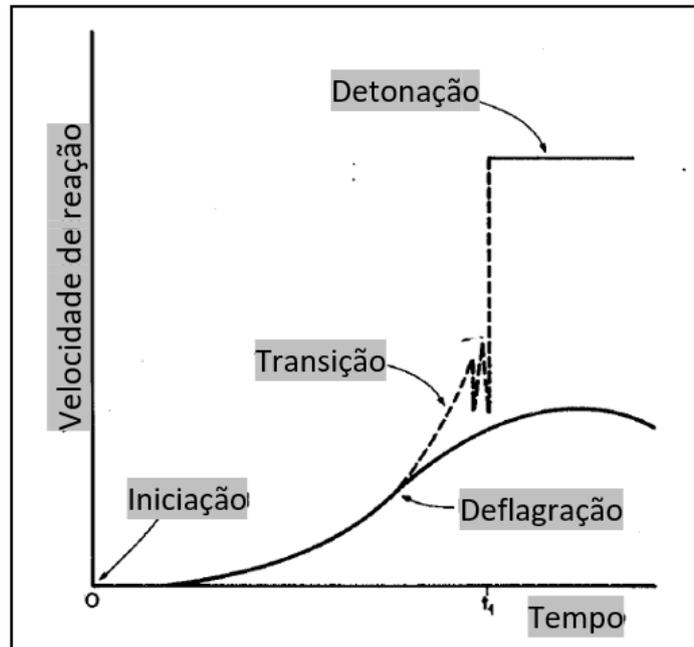


Figura 2 - Velocidade de detonação pelo tempo (JIMENO et al., 1987).

3.1.2.1 Combustão

A reação de combustão pode ser entendida como uma reação química que libera energia. É uma reação química de oxidação e geralmente ocorre por conta do oxigênio do ar e em baixas velocidades e tem como exemplo a queima de um pedaço de carvão ou de uma vela (SILVA, 2007).

3.1.2.2 Deflagração

Entende-se por deflagração, o processo exotérmico de decomposição com velocidade que, geralmente, não passa de 1000 m/s. A reação gera apenas uma expansão gasosa, não gerando onda de choque. Neste caso, além do oxigênio do ar, há a participação daquele intrínseco a substância (JIMENO et al., 1987).

A deflagração não consegue romper a resistência a compressão da rocha, não conseguindo gerar fraturas no maciço, e, conseqüentemente, não o fragmenta.

3.1.2.3 Detonação

É caracterizada pela sua alta velocidade de reação, chegando até 8000 m/s, produzindo uma onda de choque e altas pressões gasosas devido a sua rápida reação.

Segundo JIMENO et al., (1987), o primeiro efeito produzido ao se iniciar o explosivo é a geração de uma onda de choque que se propaga na sua própria massa. Essa onda tem energia suficiente para acionar o restante do explosivo ao redor da iniciação, provocando uma reação em cadeia por toda extensão do furo carregado. Na figura 3 é mostrado como acontece o processo de detonação de uma carga explosiva. A onda de choque cria fissuras na rocha, fraturando a mesma.

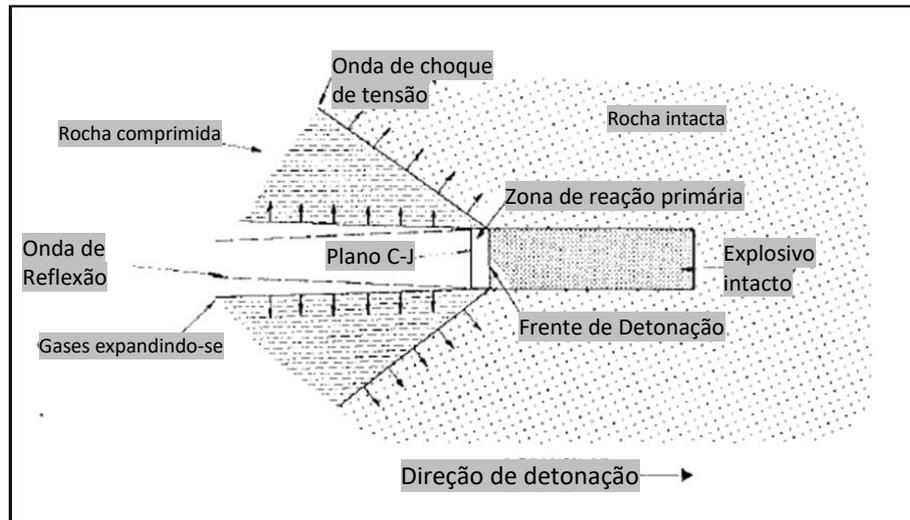


Figura 3 - Perfil esquemático de uma detonação JIMENO et al., (1987).

3.1.3 Propriedades dos Explosivos

3.1.3.1 Potência e energia:

Uma das características mais importantes de um explosivo é a potência, que define a energia disponível para produzir o choque mecânico que fratura as rochas, no ponto de vista de mineração.

A energia que se libera de um explosivo dentro em um furo é utilizada para pulverização da rocha na região mais próxima da carga explosiva, para a formação de fissuras e o rompimento da rocha, além de gerar calor, luz, vibração no terreno e deslocamento de ar (MENDES, 2018).

Atualmente, as energias dos explosivos são medidas de duas formas: medidas absolutas de energia e medidas relativas. No primeiro caso, utiliza-se a energia por unidade de peso (AWS – *Absolute Weight Strength*) ou volume (ABS – *Absolute Bulk Strength*) do explosivo. Já no segundo caso, a medida de energia é feita pela porcentagem relativa em peso

(RWS – *Relative Weight Strenght*) ou em volume (RBS – *Relative Bulk Strenght*) ao ANFO padrão.

Existem ainda métodos para determinação da potência e energia disponível de um explosivo. Dentre eles, o método de Traulz, em que uma carga explosiva de quantidade específica é colocada dentro de um bloco de chumbo de tamanho também específico, onde o explosivo é acionado. O índice de Traulz é retirado quando é comparado o volume de vazio produzido no chumbo após a detonação do explosivo com o volume produzido após a detonação de ácido pícrico. A figura 4 mostra o perfil esquemático do teste.

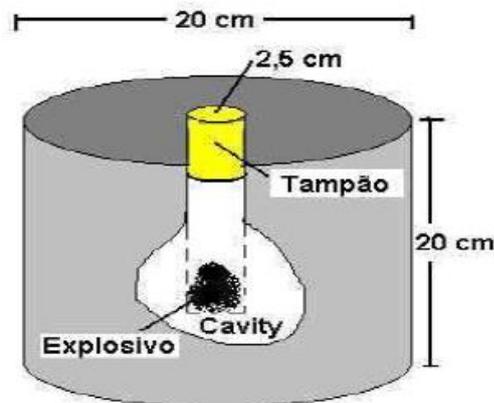


Figura 4 - Método de Traulz (MUNARETTI, 2002).

3.1.3.2 Velocidade de Detonação (VOD)

É a velocidade da propagação da onda de choque numa coluna ou num cordel de carga explosiva e é outra propriedade de grande importância no desmonte de rochas, tendo influência direta na pressão de detonação.

Segundo JIMENO et al., (1987), alguns fatores que influenciam na VOD de um explosivo são:

- a densidade;
- o diâmetro da carga;
- o confinamento;
- a iniciação;
- o envelhecimento do explosivo.

Existem diversos métodos para determinação da velocidade de detonação de um explosivo. Um deles é o D'Autriche, como pode ser visto na figura 5: pega-se um cordel detonante de VOD já conhecida, divide-se o mesmo em duas partes de tamanhos iguais fazendo uma marca numa placa de chumbo. No explosivo de interesse, acopla-se o cordel detonante espaçados de uma distância conhecida, e em uma de suas laterais se inicia a carga explosiva. A onda de choque inicia o cordel nos dois pontos de contato em tempos diferentes, o que provoca uma marca na placa de chumbo. Coleta-se a distância <a> até o ponto médio, e pela fórmula 1, determina-se a velocidade de detonação do explosivo de interesse:

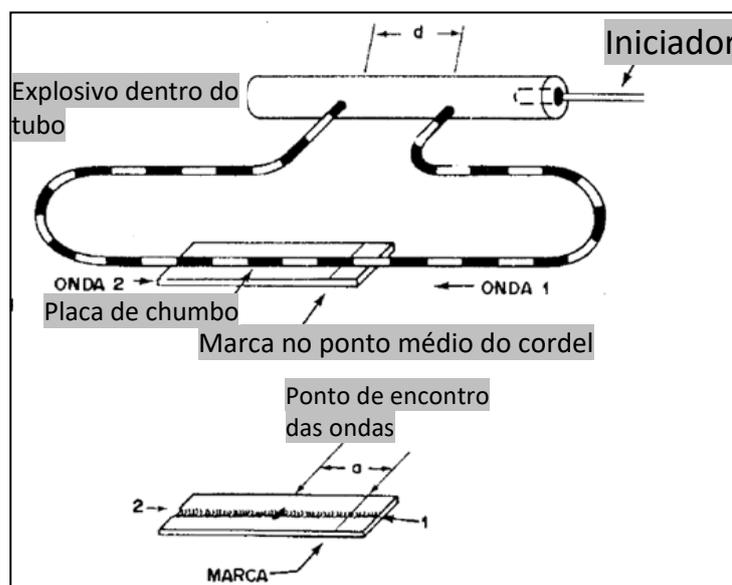


Figura 5 - Método de D' Autriche (JIMENO et al., 1987).

$$VOD_e = (VOD_c \times d) / 2a \quad \text{EQ. 1}$$

Em que: VOD_e é a velocidade de detonação do explosivo que se pretende investigar, VOD_c é a velocidade de detonação conhecida do cordel, d é a distância conhecida na carga explosiva e a é a distância do ponto de encontro das ondas e a marca na placa de chumbo.

3.1.3.3 Massa Específica (“Densidade”)

A densidade expressa a massa do explosivo pelo volume ocupado por ele. Segundo JIMENO et al. (1987), a maioria dos explosivos tem densidade variando entre 0,8 e 1,6 g/cm³,

e igualmente como ocorre com a velocidade de detonação, quanto maior a densidade é, maior o efeito rompedor proporcionado.

De acordo com Geraldi (2011), as emulsões são tipos de explosivos elaborados a partir do nitrato de amônio, combinado com outras composições químicas que estabilizam o produto e o faz resistente à água, como o nitrito de sódio. Quando embalados industrialmente, são conhecidos como emulsão encartuchada. Se tratando de grandes maciços de rocha, a emulsão pode ser aplicada diretamente no furo sem a sua embalagem, o que caracteriza a emulsão bombeada.

3.1.3.4 Pressão de detonação

O grau de fraturas na rocha está ligado diretamente ao valor da pressão de detonação. Podemos entendê-la como a pressão gerada pela onda de detonação ao longo da carga explosiva. Segundo JIMENO et al., (1987), a pressão de detonação de um explosivo é função do quadrado da velocidade de detonação e da densidade, como se vê na equação 2.

$$PD = 432 \times 10^{-6} \times \rho_e \times (VOD^2) / (1 + 0,8 \rho_e) \quad \text{EQ. 2}$$

Em que:

PD = Pressão de detonação (MPa)

ρ_e = Densidade do explosivo

VOD: Velocidade de detonação

Na tabela 1, encontra-se a pressão de detonação da emulsão e da nitropenta:

Tabela 1 - Pressão de detonação da emulsão e da nitropenta. Adaptado de MUNARETTI (2002).

PRODUTO	PRESSÃO DE DETONAÇÃO (kbar)
Emulsão	93
Nitropenta	225

Como a pressão de detonação está diretamente ligada à velocidade de detonação (VOD) do agente explosivo, por vezes, utilizam-se reforçadores para iniciar o fogo, aumentando a VOD, e, conseqüentemente, a pressão de detonação.

Os iniciadores devem apresentar uma pressão de detonação superior à do agente explosivo, a fim de assegurar a energia necessária para iniciar e garantir a propagação da detonação (HOPLER, 1999).

3.1.3.5 Resistência do explosivo

Podemos considerar a resistência do explosivo como sendo a característica de suportar certas condições do ambiente, que poderiam provocar sua deterioração. Dentre essas condições estão a presença de água no furo, as condições de armazenamento e transporte.

- A resistência à água é a capacidade do explosivo de permanecer em contato com ela por um determinado período sem perder suas características.
- A resistência ao armazenamento associa-se ao tempo de estocagem que o explosivo fica no paiol sem perder sua qualidade.
- A resistência ao choque é uma propriedade importante para manter a integridade do explosivo e segurança para o seu transporte e utilização, tanto para ter os resultados esperados no desmonte, quanto para evitar detonações não desejadas.

3.1.3.6 Sensibilidade

Os explosivos devem ser suficientemente sensíveis a iniciação por agentes iniciadores, porém, por segurança, suficientemente resistentes para não serem perigosos ao calor e ao impacto que ele pode sofrer durante sua utilização.

É comum ocorrer nos furos os chamados *air gaps*, espaços vazios dentro dos furos carregados, ocasionados por mal carregamento por parte do *blaster*. Nesse caso a sensibilidade à propagação é de extrema importância para ser concluída a detonação de toda coluna da carga.

Um dos testes executados para teste de sensibilidade do explosivo é analisar o quão afastado pode ficar duas partes de um mesmo explosivo cilíndrico para que haja a chamada detonação por simpatia. Usualmente, colocam-se dois pedaços de cartuchos, espaçados por uma distância, que varia do diâmetro do cartucho ao dobro dele, no caso dos encartuchados de

emulsão. Quanto mais distantes os pedaços de explosivos estiverem e detonarem por simpatia, mais sensíveis eles são.

3.2 Tecnologia PLASMA4th

O PLASMA4th é um sistema de fragmentação de rocha não-explosivo, sendo uma mistura de sais metálicos (nitrato de sódio, óxido de alumínio, escamas ferrosas, magnésio e óxido de cobre) capaz de iniciar uma reação termoquímica exotérmica, com expansão gasosa, a partir de uma descarga elétrica de alta tensão em um espaço confinado (ENAEX, 2021).

A tabela 2 apresenta algumas características técnicas desse sistema de fragmentação:

Tabela 2 – Características técnicas do Plasma (ENAEX, 2021).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Velocidade de detonação* (m/s)	Não aplicável
Volume gasoso a 25° C (L/Kg)	55
RWS (%)	1,13
RBS (%)	2,13
Resistência a água	Não resistente
Tipo de gases	1 (Não tóxico)
Iniciação	Matéria base para preparação de cargas de PLASMA

O PLASMA4th não é classificado como um Produto Controlado pelo Exército (PCE), inclusive por determinação da Diretoria de Fiscalização de Produtos Controlados (DFPC), pertencente ao Comando Logístico do Exército Brasileiro.

Para realizar a fragmentação, o produto, normalmente encapsulado, é aplicado em perfurações planejadas e tamponado/confinado dentro dos furos, e seus danos possuem menor poder destrutivo. O PLASMA4th pode ser aplicado em construções em geral e em áreas urbanas e para casos específicos, como é o caso da Mineração Morro do Ipê, onde há restrições legais e ambientais.

Cada cápsula de Plasma possui uma resistência elétrica em seu interior, no qual através de conexões e extensões elétricas é possível formar um circuito elétrico em série. Esse circuito em série é conectado em um equipamento iniciador, que por sua vez emite uma tensão de 4.000V, realizando a descarga elétrica necessária para acionamentos das cápsulas. Diversas cápsulas podem ser conectadas em um circuito (figura 6).

Esse Equipamento Iniciador foi desenvolvido para trabalhar com até 8 circuitos simultâneos, denominados “Canais”, onde é possível retardar o acionamento de cada canal, a partir de uma pré-programação eletrônica no Equipamentos (desde 10 ms até 9 segundos).

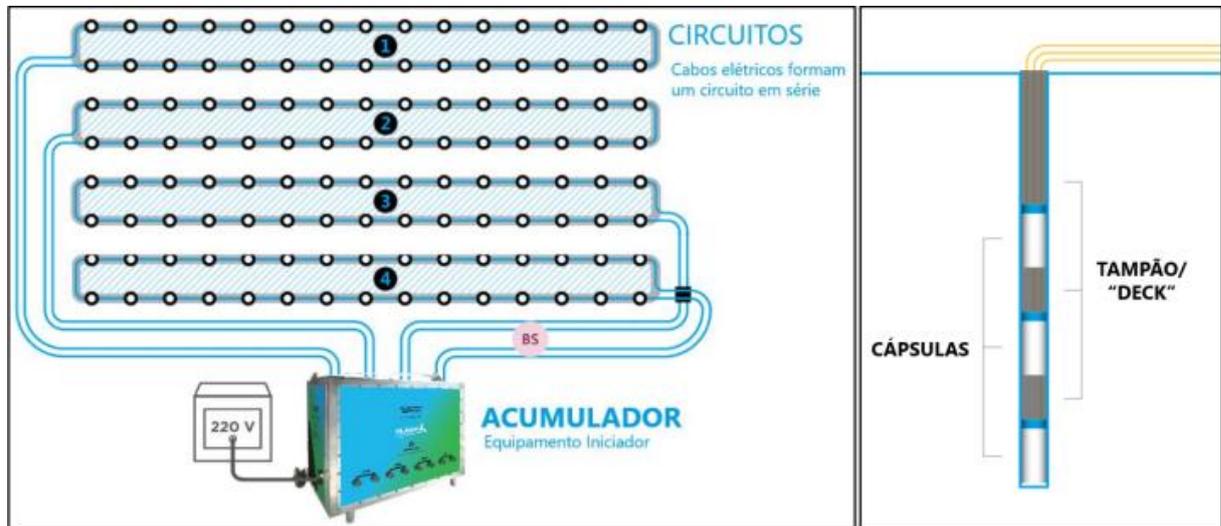


Figura 6 – circuito do Plasma (ENAEX, 2021).

3.1.4 Explosivo

O presente trabalho tratará apenas da Emulsão encartuchada, explosivo utilizado na Mineração Morro do Ipê.

3.1.4.1 Emulsão

A emulsão explosiva é um sistema bifásico formada de uma dispersão de um líquido imiscível em outro, composta por sais inorgânicos oxidantes dissolvidos em água e um combustível líquido imiscível em água. Esse tipo de explosivo é do tipo denominado “água em óleo” (MENDES, 2019).

A tabela 3 mostra a composição típica de um explosivo em emulsão.

Tabela 3 - Composição típica de um explosivo em emulsão (Silva, V.C., 1986).

INGREDIENTES	PORCENTAGEM EM MASSA (%)
Nitrato de amônio	77,3%
Água	16,7%
Óleo Diesel	4,9%
Agente emulsificante: oleato de sódio ou monoleato de ezorbitol	1,1%
Total	100,0%

A grande vantagem da emulsão é sua boa resistência com a presença de água. Nas operações de perfuração de rocha se utiliza água para refrigeração das ferramentas e para limpeza dos furos, e é comum encontrá-la nos furos. Além disso, em minerações a céu aberto pode haver água meteórica nos furos. Nesses casos, a emulsão, por apresentar densidade maior que $1,0 \text{ g/cm}^3$, expulsa a água do furo, fazendo o seu preenchimento adequado com o explosivo.

Os valores teóricos de energia produzida pelas emulsões são apresentados na tabela 4 considerando que os explosivos reagem completamente e que toda sua energia é liberada na onda de detonação. Essa energia pode ser aumentada com a adição de alumínio em sua fórmula.

Tabela 4 - Propriedade da emulsão (MORAIS, 2004).

Composição	Densidade (g/cm^3)	VOD (m/s)	Energia Total (cal/g)
Emulsão 0% Al	1,2	6440	684
Emulsão + 5% Al	1,32	6560	862
Emulsão + 7% Al	1,33	6600	948
Emulsão + 10% Al	1,34	6600	1016
Emulsão + 14% Al	1,35	6500	1150

A emulsão pode vir confinada em cartuchos de diferentes dimensões. Nesse caso, ela já vem com as microbolhas (agente sensibilizante) em comparação com a emulsão bombeada por caminhões, em que a mistura do agente gaseificador é feita na saída da bomba, ou na ponta da mangueira a inserir no furo. Nesse caso, a emulsão sai a uma densidade que vai diminuindo à medida que ela se expande dentro do furo.

3.2 Acessórios

Os acessórios são os agentes que precedem a detonação da rocha como um todo, e são utilizados para iniciar as cargas explosivas.

A seguir se encontra alguns dos principais acessórios utilizados nas detonações de rocha.

3.2.1 Principais tipos de acessórios

3.2.1.1 Estopim espoletado

Tem um aspecto de cordão, consistindo em um núcleo de pólvora negra revestido com uma camada impermeabilizante que o protege contra a penetração de água e a abrasão (MENDES, 2018).

Uma propriedade do estopim é a velocidade de queima dele, para garantir a segurança do *blaster* até a sua evacuação do local de detonação.

O estopim queima com velocidade uniforme conhecida, e possui alta segurança contra impacto. É acoplada uma espoleta em sua ponta oposta, que pode iniciar um cordel detonante ou mesmo uma carga explosiva.

A tabela 5 apresenta as propriedades de um estopim.

Tabela 5 - Características do estopim (MENDES, 2018).

Características estopim	
Núcleo	Misto de pólvora negra
Queima	Lenta
Tempo de queima	145 s/m
Peso médio de pólvora	5,5 g/m
Resistência a água	Classe 1
Resistência máxima a tração	28 kgf
Revestimento externo	Termoplástico
Flexibilidade	Boa
Raio máximo de curvatura	12,5 mm

3.2.1.2 Espoleta não elétrica de Retardo

A espoleta não elétrica de retardo é um acessório destinado a iniciar a carga explosiva. Consiste em uma cápsula de alumínio, aberta em uma das extremidades por onde chega o tubo de choque, além do misto pirotécnico (elemento de retardo), a azida de chumbo e a nitropenta. Na figura 7, pode-se ver o aspecto da espoleta de retardo.

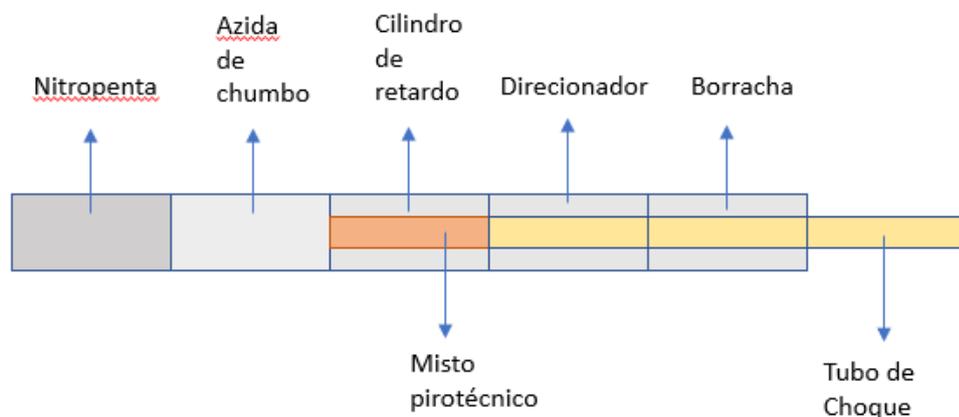


Figura 7 - Aspecto da espoleta não elétrica de retardo (ORICA, 2019).

Após a queima passar pelo elemento de retardo, acontece a detonação da azida de chumbo que inicia a nitropenta, que por sua vez inicia a carga explosiva. A azida de chumbo é extremamente sensível, e se inicia por choque ou uma quantidade suficiente de calor.

Os retardos dessas espoletas são contabilizados em milissegundos e à medida que a temporização aumenta, maior a carga de misto pirotécnico, e menor a precisão exata do disparo.

Uma vantagem da espoleta não elétrica de retardo é o preço bem mais baixo em comparação com a espoleta eletrônica. Uma desvantagem é a dispersão no seu acionamento e a baixa flexibilidade na temporização das cargas explosivas.

3.2.1.3 Espoleta eletrônica de retardo

A espoleta eletrônica é uma tecnologia relativamente nova e sua grande diferença é a precisão e flexibilidade. Para se executar detonações com esse tipo de espoleta necessita um conjunto de itens: a espoleta detonadora, um dispositivo para programação dos retardos e um dispositivo de iniciação.

Nesse caso, o intervalo de tempo de acionamento entre furos é criado de acordo com a necessidade do plano de fogo, e, após a temporização, fica gravado num chip presente na espoleta. Os disparos acontecem com uma precisão altíssima no exato tempo estipulado.

3.2.1.4 Cordel Detonante

Os cordéis são acessórios utilizados para iniciação de cargas explosivas tanto dentro do furo quanto interligando cargas de furos.

Consiste em um núcleo de nitropenta com um recobrimento exterior, que tem por função a proteção do explosivo e do blaster. A velocidade de detonação dos cordéis é por volta de 7000 m/s (JIMENO et al, 1987).

Eles são especificados pela quantidade de nitropenta que contém cada metro do cordel. Na tabela 6, tem-se alguns tipos de cordel presentes no mercado.

Tabela 6 - Tipos de cordéis, gramaturas e algumas funções (ORICA, 2019).

Tipo	Gramatura
NP-03	3 gramas de nitropenta por metro linear (utilizado para corte em bloco de granito)
NP-05	3 gramas de nitropenta por metro linear (utilizado para amarração da linha de tronco)
NP-10	3 gramas de nitropenta por metro linear (utilizado para carregamento do furo e amarração da linha tronco)
NP-30	3 gramas de nitropenta por metro linear
NP-40 e NP-60	40 e 60 gramas de nitropenta por metro linear (utilizado para controle de cargas)

3.2.1.5 Boosters ou reforçadores

São explosivos que geram uma alta potência e são utilizados para a iniciação da detonação de explosivos de baixa sensibilidade, além de assegurar a continuidade da propagação da onda explosiva ao longo de toda a carga. Sua iniciação é feita por uma espoleta ou por um cordel detonante (MENDES, 2019).

Existem *boosters* de vários tamanhos, podendo variar de acordo com o diâmetro do furo a ser inserido. Na figura 8 pode-se ver o aspecto físico dos *boosters*.



Figura 8 - Aspecto físico dos boosters (MENDES, 2019).

Como pode se ver na figura acima, eles são dotados de um furo central ao longo de sua estrutura facilitando a escorva da espoleta ou cordel e conferindo maior segurança no processo. O detalhe se encontra na figura 9 abaixo:

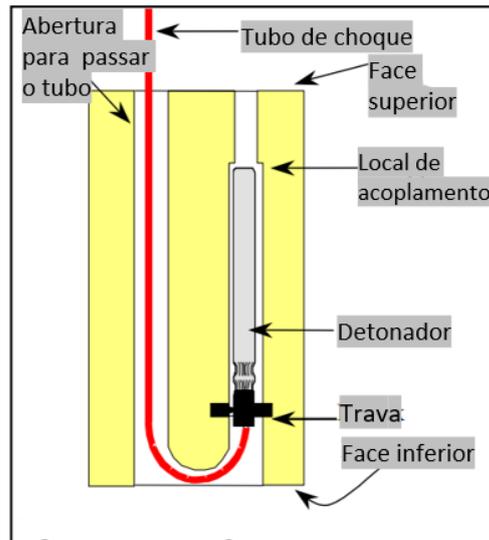


Figura 9 – Detalhe por dentro do booster PENTEX TM G (ORICA, 2019).

A velocidade de detonação do *booster* é de 7400 m/s. Outras propriedades do *booster* encontram-se na tabela 7 (MENDES,2019).

Tabela 7 - Propriedades do booster (MENDES,2019).

CARACTERÍSTICAS BOOSTER	
Cargas explosivas (g)	150
Densidade média (g/cm ³)	1,43
AWS (kcal/kg)	1460
ABS (kcal/l)	2087,8
Energia disponível (kcal/peça)	219 a 657
Temperatura de explosão (K)	3750
Classe de resistência a água	1
Sensibilidade a iniciação	NP10 ou Espoleta nº8
Velocidade de detonação (m/s)	7400
Pressão de detonação (kBars)	195,8
Potência disponível (kcal/s)	(1,621 a 4,862) x 10 ⁶

3.3 Elementos do plano de fogo

O desenho do plano de fogo e suas características são muito importantes para manter o desmonte da forma mais efetiva.

Alguns parâmetros importantes no plano de fogo são:

- α : ângulo de inclinação da bancada;
- A: afastamento;
- CC: carga de coluna;
- CF: carga de fundo;
- DF: diâmetro do furo;
- E: espaçamento;
- FB: face da bancada;
- FF: furo até a face;
- HB: altura da bancada;
- PF: profundidade do furo;
- SF: subfuração;
- TP: tampão;

A figura 10 mostra um plano de fogo, com a indicação da nomenclatura.

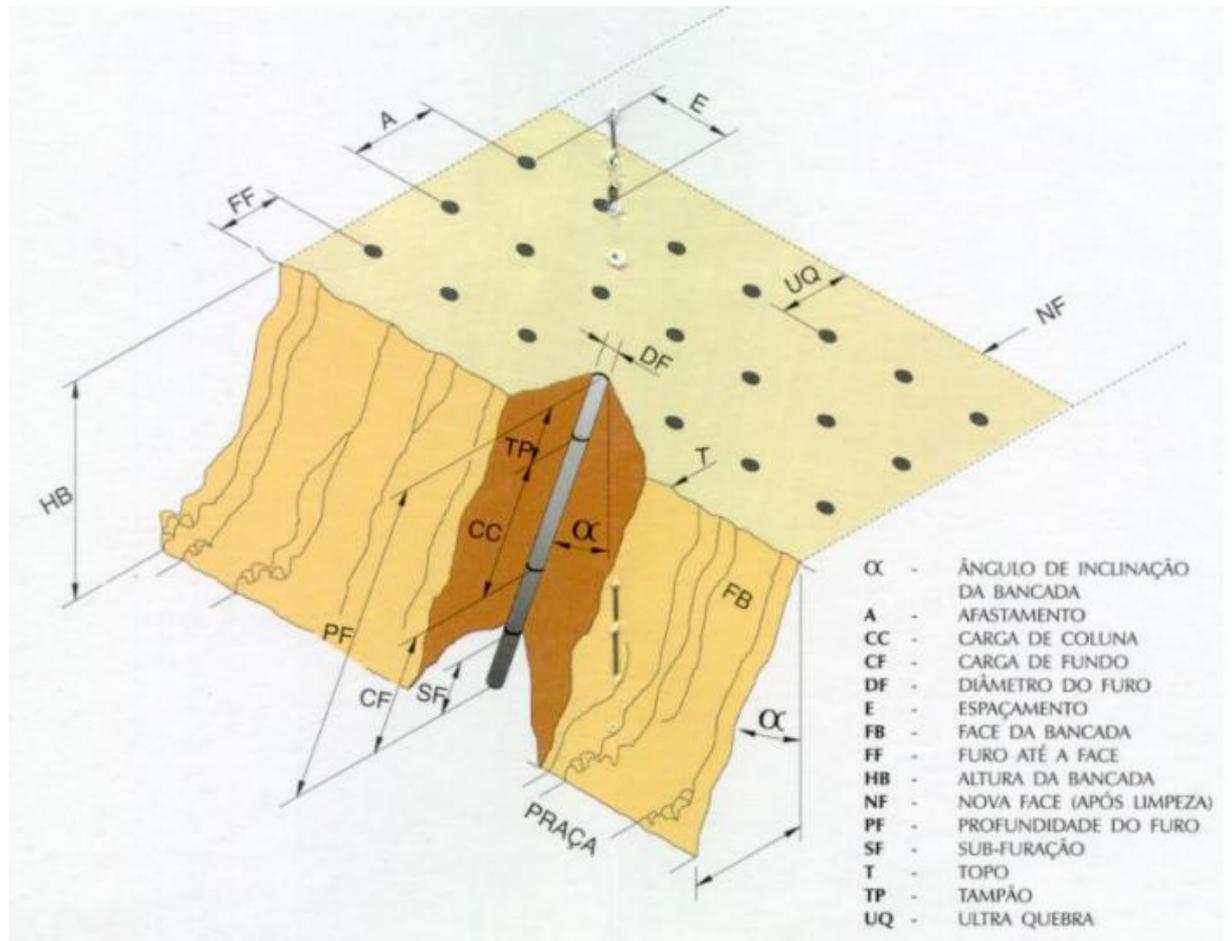


Figura 10 - Plano de Fogo (MANUAL BRITANITE).

3.3.1 Face livre

A face livre é a superfície exposta da rocha, para onde a carga de explosivo direcionará os esforços de fragmentação. MORAIS (2004) diz que uma das primeiras tentativas para se explicar como a rocha se quebra quando uma carga explosiva concentrada é detonada em um furo próximo a uma face livre foi a teoria da reflexão.

O conceito é simples, direto e baseado no fato bem conhecido de que a rocha é sempre menos resistente à tração do que à compressão. A resistência à tração é cerca de 10 a 15 vezes menor que a resistência à compressão. O pulso da tensão compressiva, gerado pela detonação de uma carga explosiva, move-se através da rocha em todas as direções com uma amplitude decrescente. Este pulso é refletido na face livre e é convertido em uma tensão de tração, que

progride de volta ao ponto de origem, criando fraturas de tração no maciço rochoso como ilustra figura 11 (MORAIS, 2004).

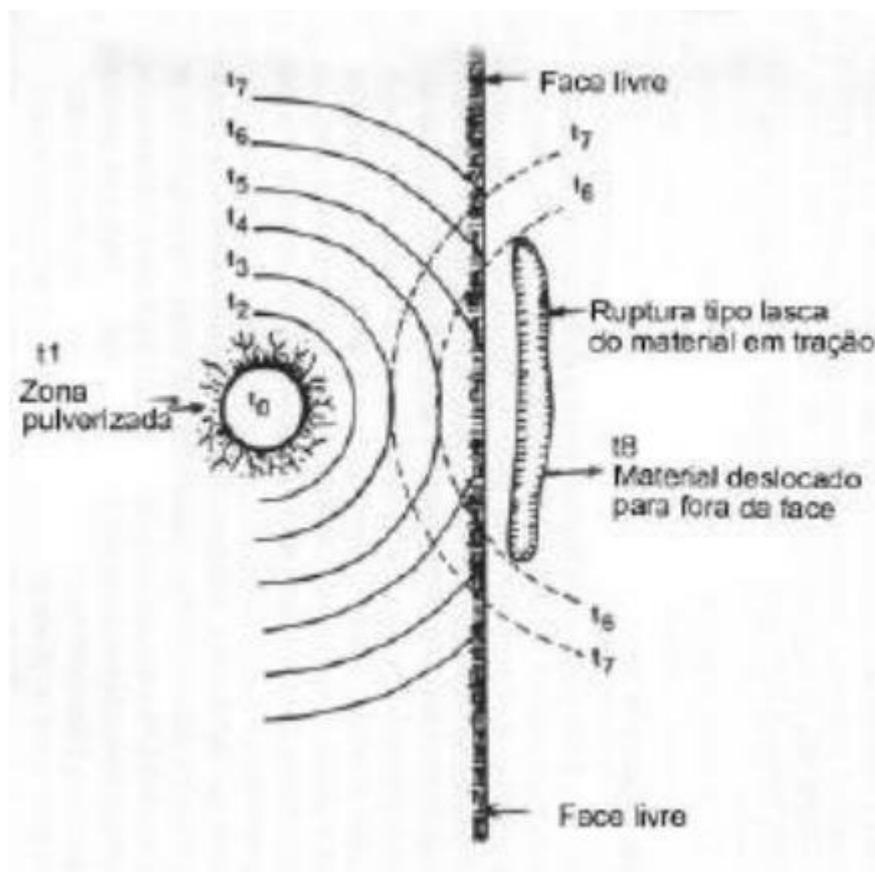


Figura 11 - Teoria da reflexão das ondas de choque (MORAIS, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Metodologia utilizada

Este trabalho se inicia com a revisão mostrada no item 3, e mostra como foi o processo de escolha do PLASMA para fragmentação dentro dos limites estabelecidos na Mineração Morro do Ipê, além do estudo de um desmonte utilizando o software O-Pitblast.

4.1.2 Utilização do Plasma

Quando propagadas no terreno, as vibrações sísmicas podem colocar em risco a segurança física de estruturas geotécnicas e cavidades, como é o caso nas minas Ipê e Tico-Tico. Essas vibrações estão associadas às atividades intrínsecas à mineração, como o desmonte de rochas, movimentação de veículos e equipamentos.

Os sismógrafos são equipamentos utilizados para registrar o nível de vibração do terreno, medindo a velocidade e a frequência de vibração da partícula. A intensidade da vibração gerada é função de fatores como a distância entre o ponto emissor de vibração e o ponto de medição, topografia e características geomorfológicas do terreno.

Pensando nisso, a empresa CARSTE, juntamente com a Mineração Morro do Ipê, instalou sismógrafos nas 4 cavidades de maiores relevâncias da área, apresentadas na tabela 8 e figura 12 abaixo.

Tabela 8 – Pontos de instalação dos sismógrafos (CARSTE, 2021).

PONTO	RELEVÂNCIA DA CAVIDADE	UTM E (m)	UTM N (m)
Cavidade SAZ-0013	Máxima	575496	7776257
Cavidade SAZ-0049	Alta	576515	7775500
Cavidade SAZ-0061	Alta	576267	7775106
Cavidade SAZ-0069	Alta	574739	7775269

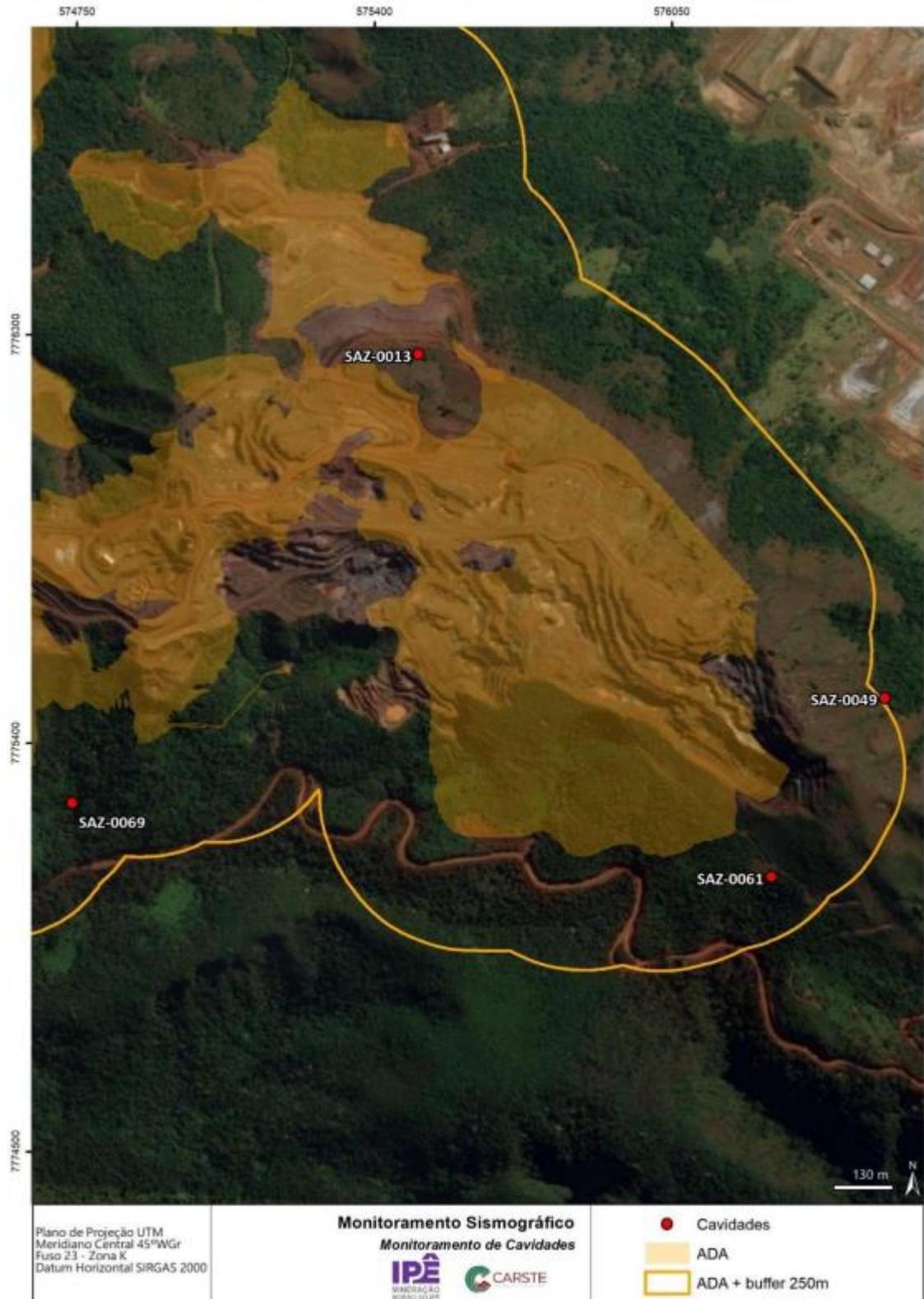


Figura 12 – Localização das cavidades monitoradas (CARSTE, 2021).

Ao analisar as vibrações sísmicas no meio, além da amplitude, deve ser considerada também a frequência de oscilação registrada pelo sismógrafo. Assim, observa-se que a

ocorrência de danos em estruturas está geralmente associada a níveis elevados de vibração em baixas frequências, e quanto maior a repetitividade da incidência de vibração maior a tendência da ocorrência de dano na estrutura.

Os limites para a velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência acima dos quais podem ocorrer danos induzidos por vibração do terreno são apresentados na Tabela 9 e na Figura 13.

Tabela 9 – Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência (CARSTE, 2021).

Faixa de frequência	Limite de velocidade de vibração de partícula de pico
4* Hz** a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz 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)	
OBS: ** 1 Hz corresponde a uma oscilação por segundo	

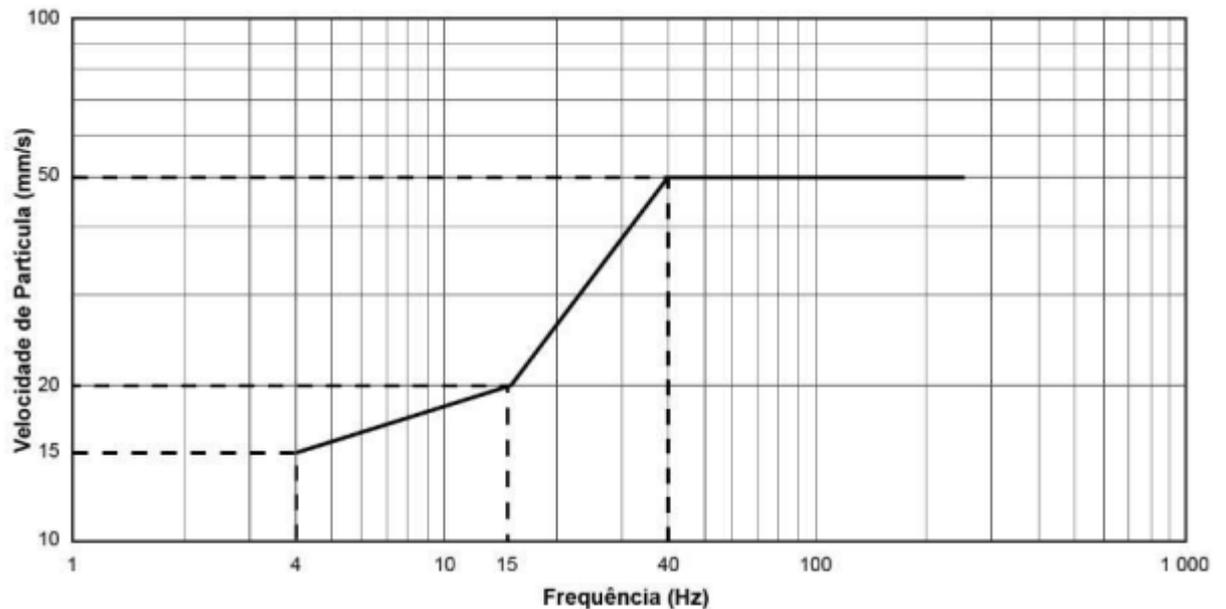


Figura 13 – Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência (CARSTE, 2021).

O trabalho de monitoramento foi realizado na Mineração Morro do Ipê durante o período de 17 de setembro de 2020 até 12 de junho de 2021, onde foram realizadas movimentações de equipamentos e desmontes com Plasma, sendo esses últimos apresentados na Figura 14.

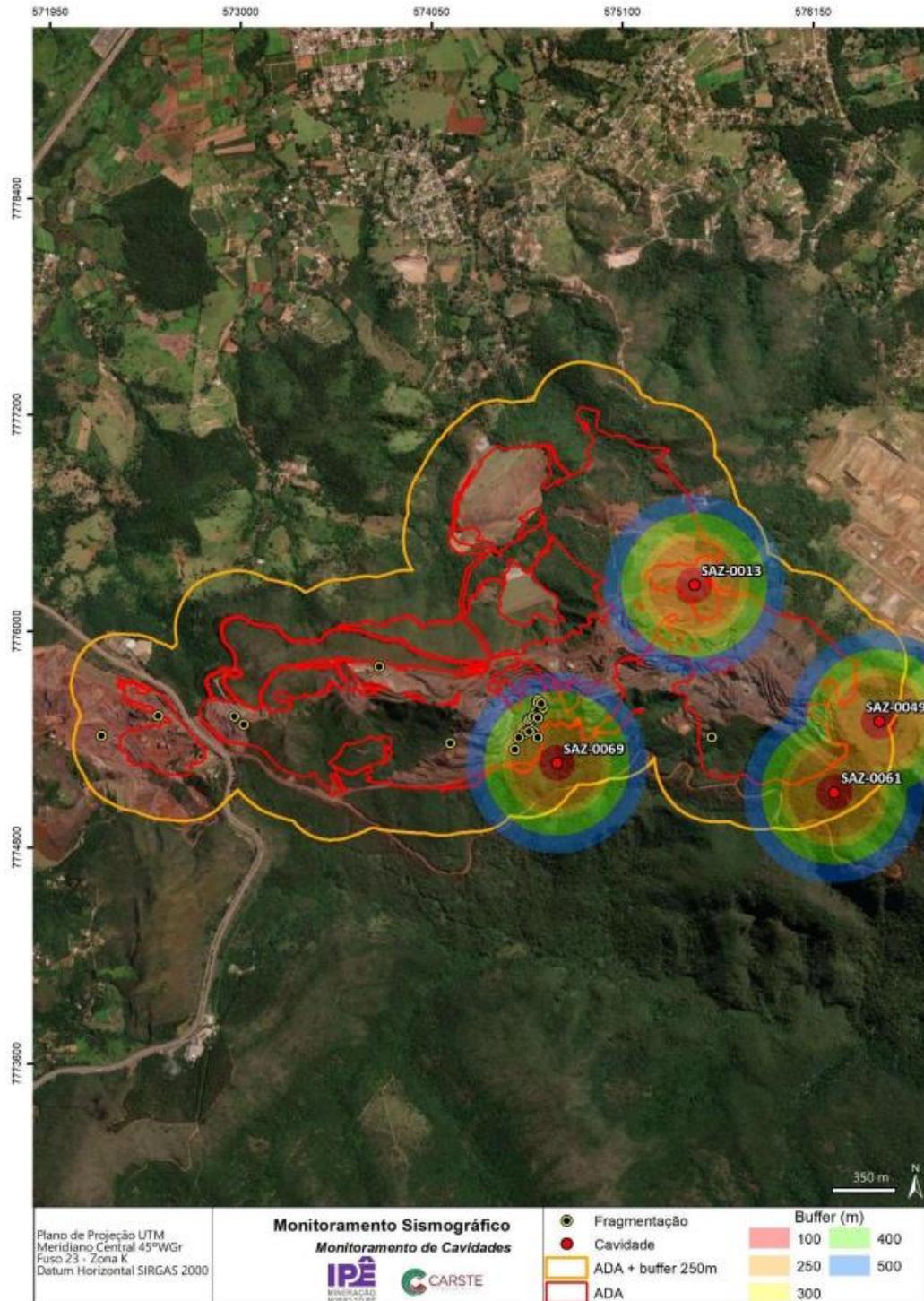


Figura 14 – Mapa geral das cavidades monitoradas e das fragmentações realizado na Mineração Morro do Ipê (CARSTE, 2021).

Durante o período de monitoramento o maior valor de Velocidade de Vibração de Partícula de Pico (PPV) proveniente do desmonte de rochas foi registrado na cavidade SAZ-0069 no dia 29/01/2021 com o valor de 5,21 mm/s no canal longitudinal/radial e com uma frequência associada de 4,9 Hz, característico de desmonte de rochas, e muito abaixo do limite estabelecido na norma para a atividade em questão.

4.1.2 Análise do desmonte pelo O-Pitblast

4.1.2.1 O Software

O-Pitblast é um software de mineração, que chegou ao Brasil há pouco tempo, e tem por finalidade otimizar desmontes de rochas. É uma empresa que já atua em diversas regiões do mundo como, Europa, África e América do Sul. Conta com uma equipe multidisciplinar, com experiência em engenharia de minas, estatística e matemática aplicada à engenharia de minas e é referência em design de otimização de desmonte de rochas com explosivos (O-PITBLAST, 2016).

Os dados da topografia podem ser inseridos por meio de equipamentos que auxiliem na plotagem do terreno real ou feito manualmente através de topografias existentes no próprio software, as demais operações como malhas de perfuração e amarração são realizadas por meio das ferramentas contidas no mesmo. O software conta com serviços de controle de estoque de explosivos e acessórios, planejamento de operações para desmonte de rochas, armazenamento das operações e relatórios com os indicativos das atividades da empresa.

Um desmonte realizado no dia 27/08/2021 na cota 1152 da cava Sudoeste da mina Tico-Tico foi simulado no software para se analisar alguns parâmetros e avaliar a qualidade do plano de fogo executado, bem como as condições da bancada, tendo o objetivo de otimizar o processo e aumentar a segurança da operação.

4.1.2.2 Local e plano de fogo realizado

O desmonte foi realizado na Cava Sudoeste da mina Tico-Tico, onde se predomina a Canga, rocha muito resistente à erosão, que por esse motivo é constantemente encontrada recobrando o relevo, além de possuir alta porosidade, o que facilita a infiltração de água da chuva (figura 15).



Figura 15 – Local do desmonte (ARQUIVO PESSOAL,2021).

O plano de fogo, de malha estagiada (pé de galinha), tendo 168 furos de 3”, malha 3x3 (com espaçamento de 3 metros e afastamento de 3 metros), comprimento médio dos furos de 5,5m, com tampão médio de 1,5m e razão de carga de 0,242 kg/m³ foi elaborado pela empresa ELBL, responsável pela perfuração e desmonte com uso de explosivo convencional na Mineração Morro do Ipê. Foram utilizados 2025 kg de emulsão encartuchada 2,25” x 24” de densidade 1,15 g/cm³, da empresa Pirobrás, e os explosivos foram amarrados com espoleta não-elétrica, mais conhecida como linha silenciosa, e iniciados por espoletado de 1,2m. O plano de fogo e a área perfurada e escorvada se encontram nas figuras 16 e 17.

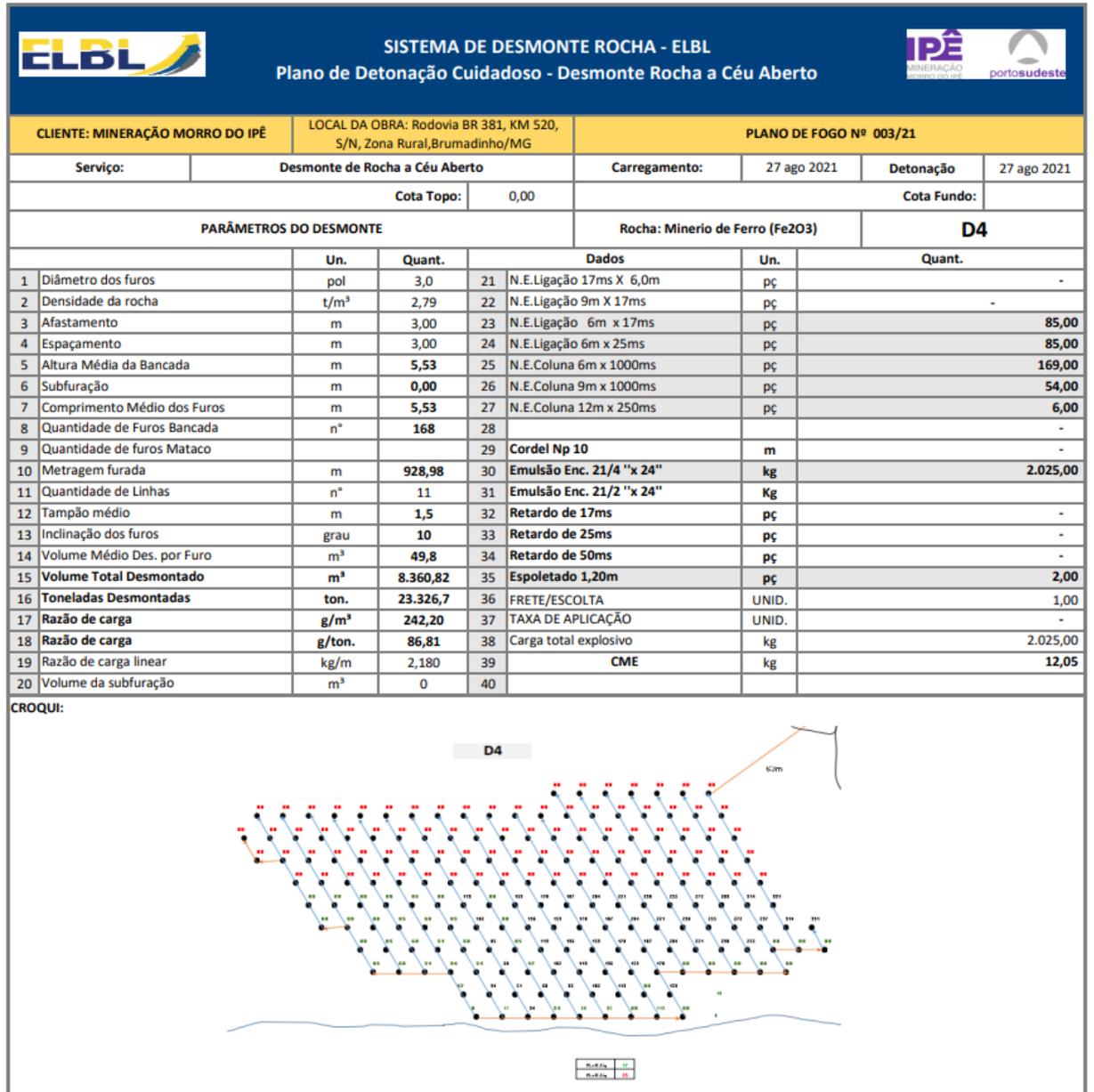


Figura 16 – Plano de fogo (ELBL,2021).



Figura 17 – Área do desmonte (ARQUIVO PESSOAL,2021).

4.1.2.3 Simulação no O-Pitblast

O primeiro passo foi imputar as informações da litologia do material da área desmontada, que foi uma canga de densidade $2,73 \text{ g/cm}^3$, a topografia do local e o pushback para delimitar a área perfurada. Em seguida foi realizada a simulação da perfuração e carregamento, feito 100% com emulsão encartuchada. O plano de perfuração é apresentado nas figuras 18, 19 e 20.

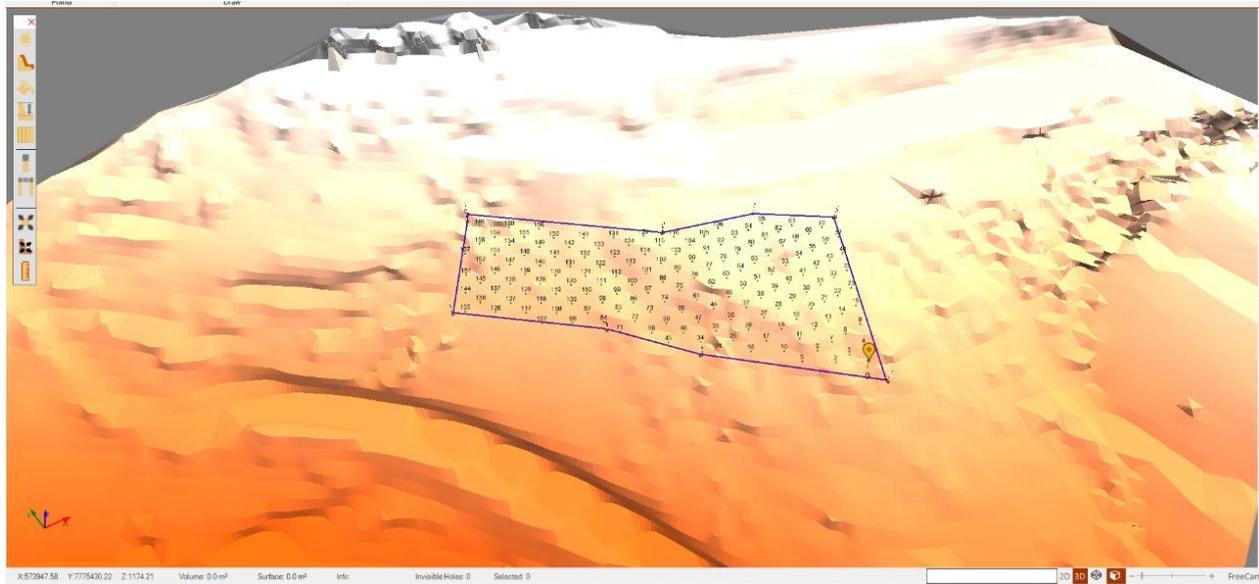


Figura 18 – Simulação no Software (O-Pitblast,2021).



Blast Plan

Blast ID: Estudo_sov2

Project Information

Site name: Date: 28/11/2021, 00:00 Shotfirer:
Country: Location: D&B Resp.:

Explosive Ordering

Explosive Product	Density & Weight	Type	Quantity
Emulsão Encartuchada	1,15 g/cm ³ - 2,080 Kg	Cartridge	1 892,3 Kg
Total			1 892,3 Kg

Accessories Ordering

Product	Type	Quantity

Detonating Cord

Product	Gramature (g/m)	Meters

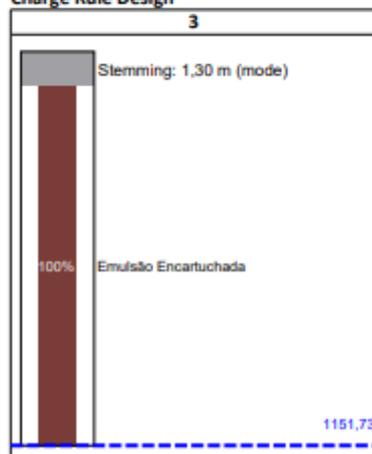
Blast Resume

Bench High	4,74 m	Volume*	7 150 m ³	Powder Factor	0,265 Kg/m ³
Total of Holes	161	Tonnes	19 518,7 t	Powder Factor	0,097 Kg/t
Drilled	763,36 m	Specific Drilling	0,107 m/m ³	Rock Density	2,730 g/cm ³
Design Burden	3,00 m	Design Spacing	3,00 m	Design Volume	6 870 m ³
Average Stemming	1,30 m	Total Stemming Vol.	0,95 m ³	Avg. Stemming Vol.	0,006 m ³
MIC	4,4 Kgs	Avg. Filling Coeff.	67,7%	Blasting mat	No

*Volume based on the hole's length.

Comments

Charge Rule Design



O-Pitblast® Blast Design Platform 1.5.76.0
O-Pitblast © All Rights Reserved

www.o-pitblast.com

Page 1

Figura 19 – Informações do projeto (O-Pitblast,2021).

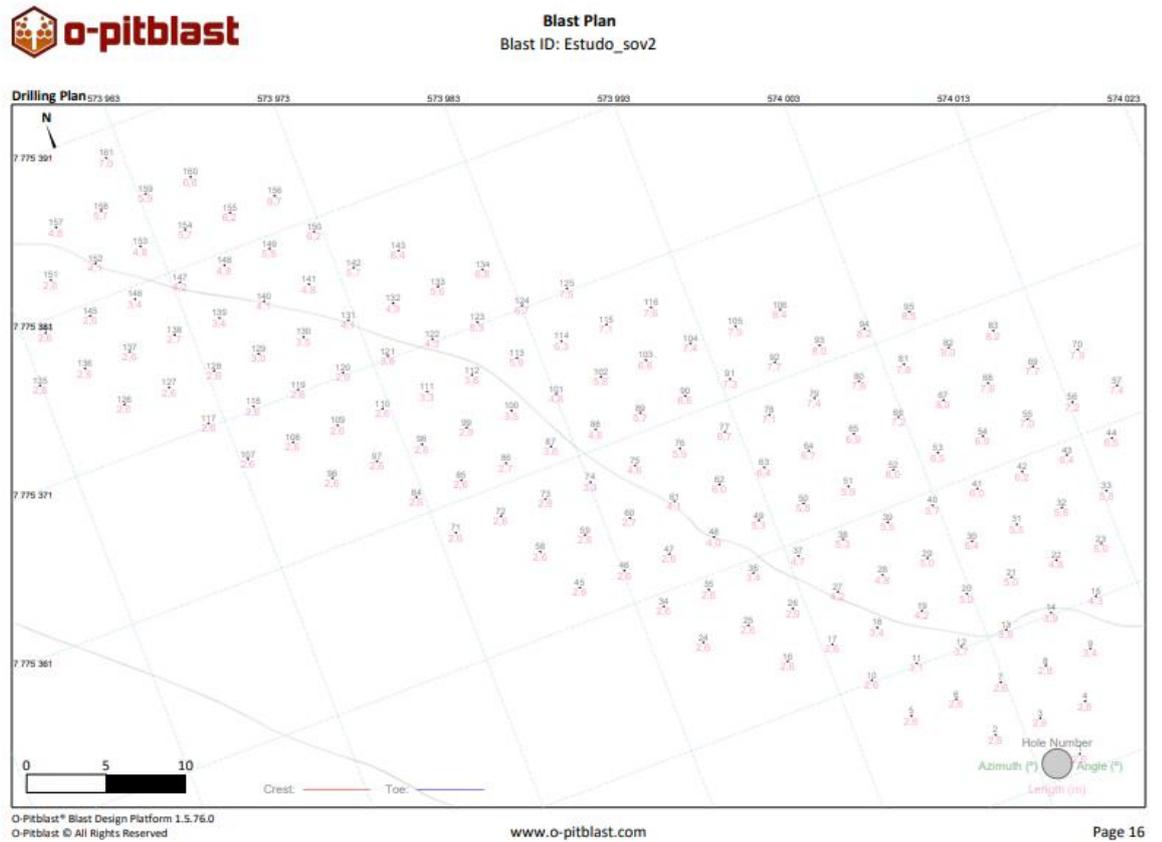


Figura 20 – Plano de perfuração (O-Pitblast,2021).

Na etapa seguinte, foi feita a amarração do fogo de modo a simular o que foi realizado de fato, utilizando ligação não-elétrica com retardo de 17 ms na primeira linha, e de 25 ms entre os furos das colunas, com apenas uma espoleta por furo. A simulação é representada nas figuras 21 e 22, mostrando o delay acumulado por furo, e o sentido do lançamento, ortogonal às isolinhas.

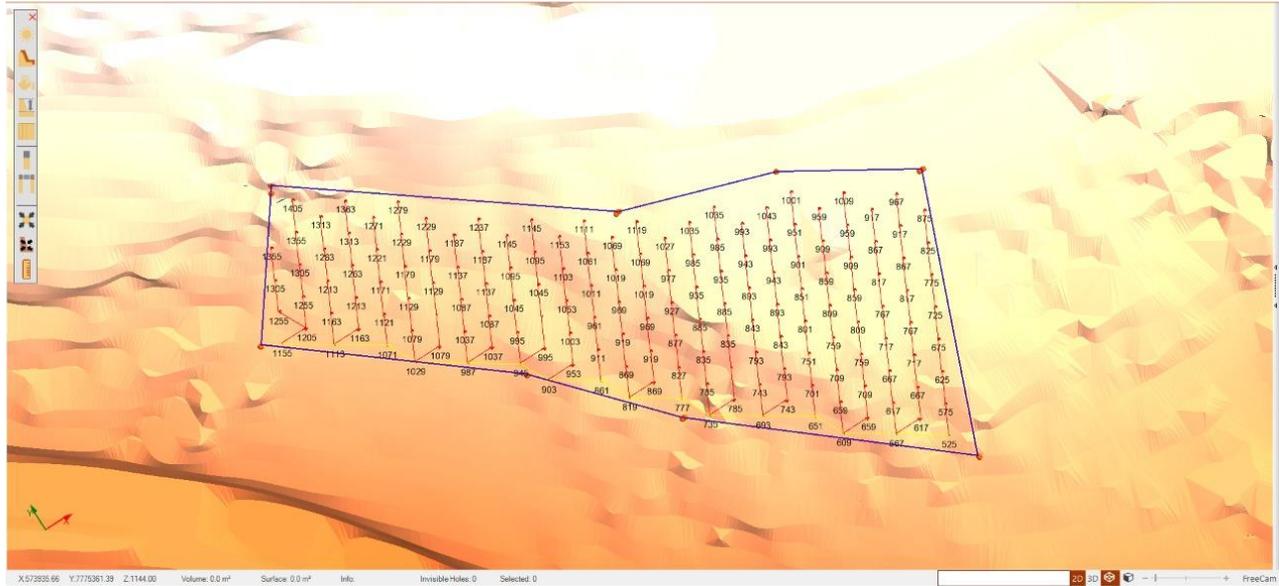


Figura 21 – Amarração do fogo (O-Pitblast,2021).

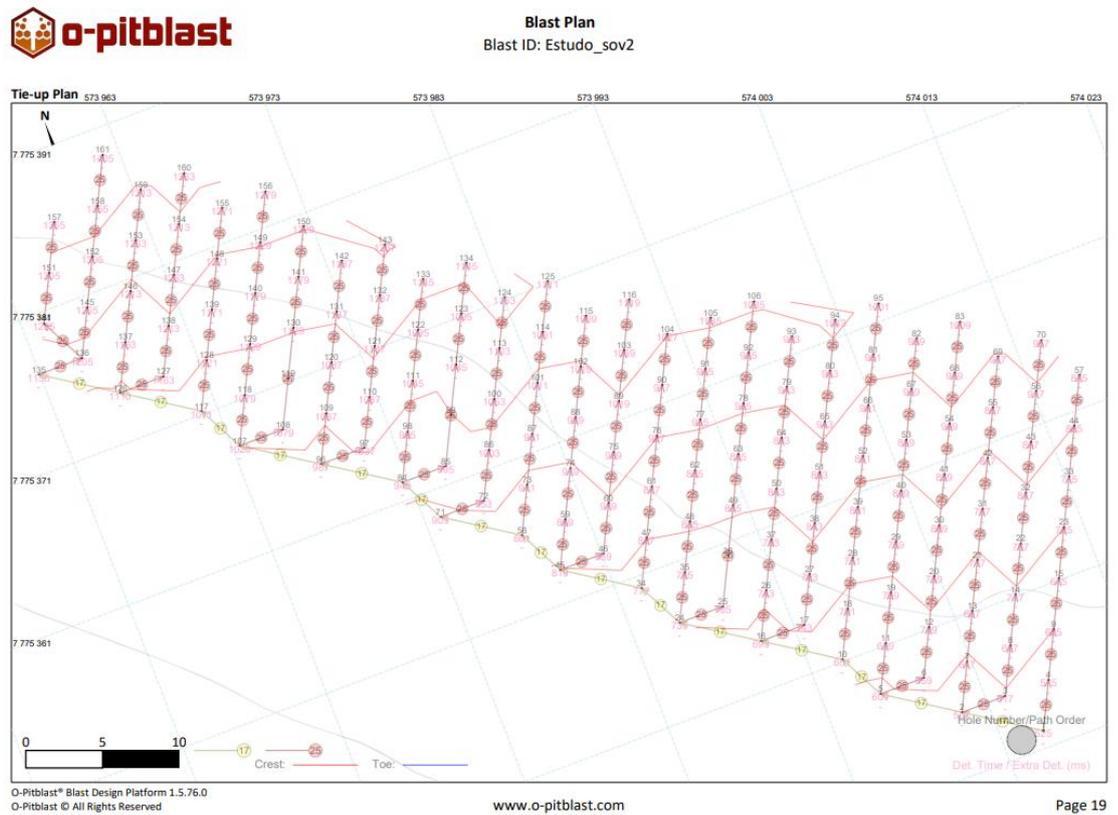


Figura 22 – Plano de amarração, mostrando o sentido do lançamento (O-Pitblast,2021).

Em sequência, foi importada no software uma pequena base de dados com os registros dos desmontes com explosivos convencionais já utilizados na Mineração Morro do Ipê, contendo dados de carga explosiva utilizada, PPV (Velocidade de vibração de Partícula de pico) em mm/s e a distância do local do desmonte até a cavidade de alta relevância mais próxima, a SAZ-0069, a fim de criar uma curva de atenuação e prever a PPV do desmonte executado e analisar se está dentro dos limites aceitáveis (tabela 10).

Tabela 10 – Histórico Sismográfico de desmontes (Arquivo pessoal, 2021).

PPV (mm/s)	Distância até a cavidade (m)	CME (Kg)	Frequência de oscilação (Hz)
0,508	643	20,49	6,3
0	749	1,97	0
0	698	2,18	0
0,635	712	12,05	5,6
0,635	626	3,3	5,6

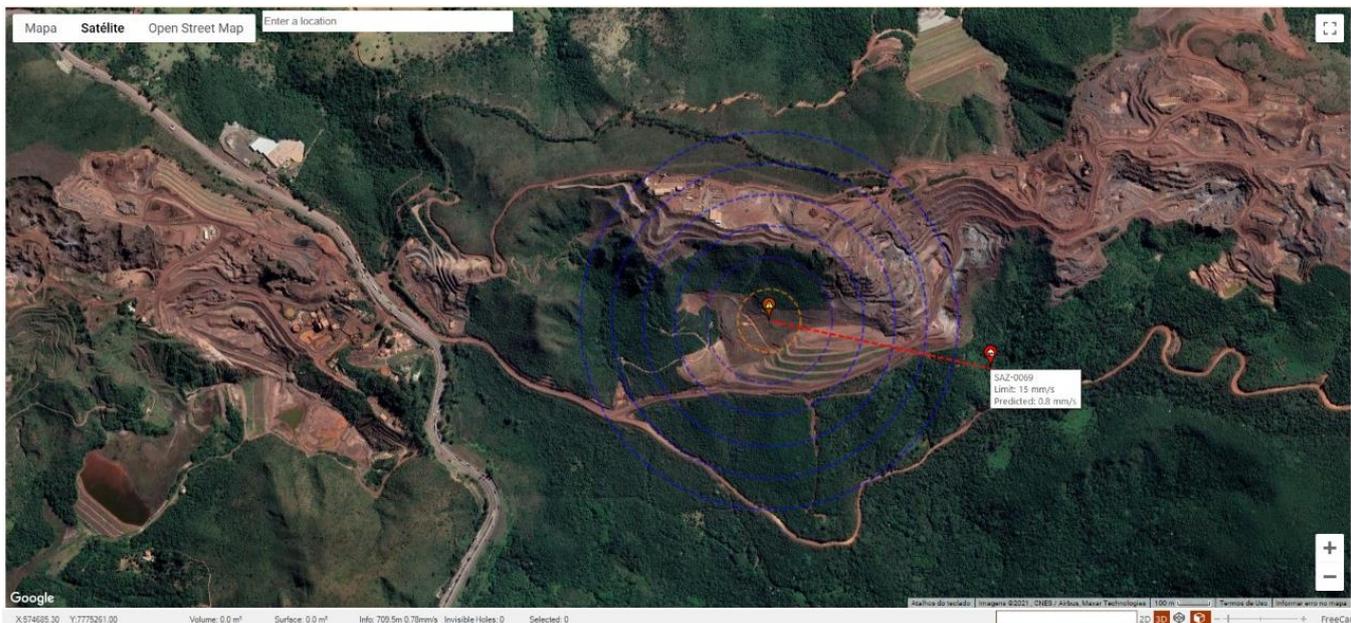


Figura 23 – PPV Previsto x Limite (O-Pitblast,2021).

Conforme a figura 23, a simulação de vibração não excede o limite imposto, e pelos resultados executados, PPV 0,635 com frequência de oscilação 5,6 Hz, conclui-se que o

desmonte não afetou nenhuma cavidade na mina, tampouco alguma estrutura geotécnica ou civil próxima, como barragens e a rodovia BR-381.

Analisando a fragmentação, foi gerado o relatório de previsão de fragmentação concedido pelo software, através do modelo de Kuz-Ram pela fórmula de Kuznetsov. Para a criação dessa curva, foram preenchidos dados litológicos e informações sobre o explosivo.

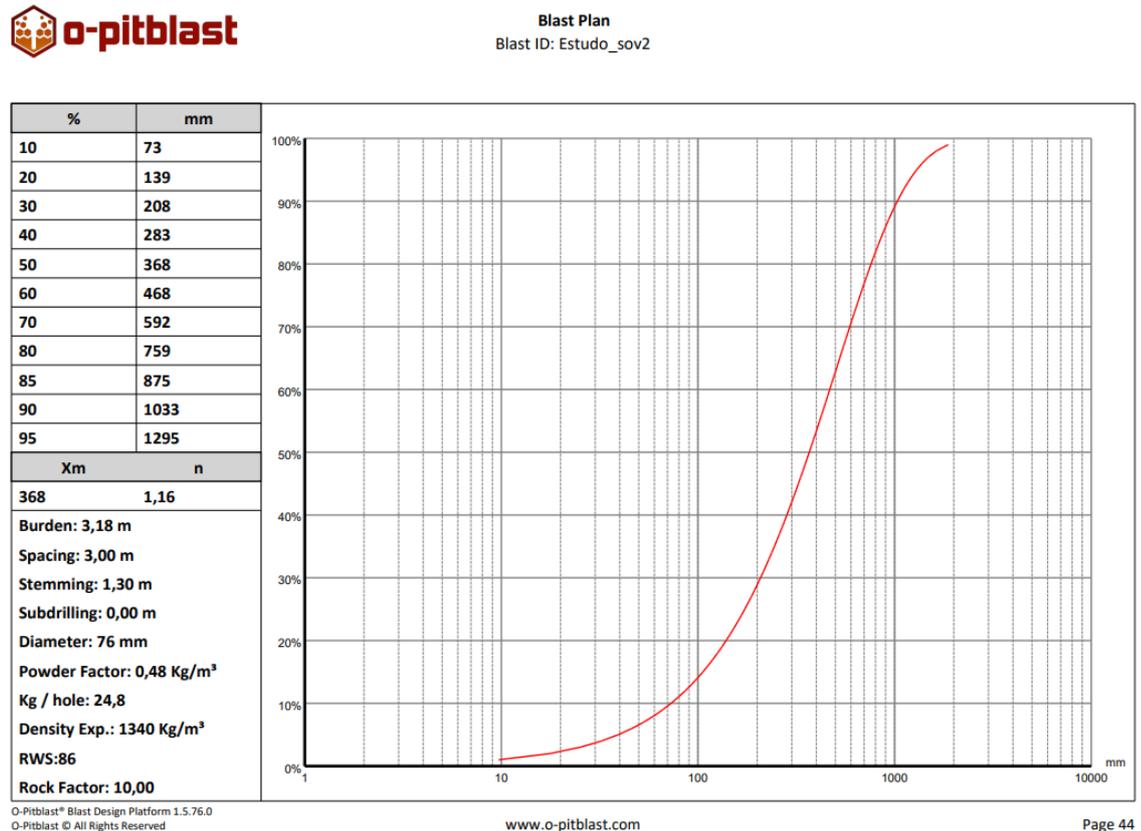


Figura 24 – Previsão de fragmentação (O-Pitblast,2021).

Os dados sobre a previsão de fragmentação (figura 24) obtidos foram os seguintes: 20% do material é passante em 200 mm; 50 % do material é passante com 368 mm; 80% do material é passante em 759 mm; 90% do material é passante em 1033 mm.

5 DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para se buscar o aumento do rendimento de fogo desejado, que não teve uma boa fragmentação conforme resultados em campo, além de uma melhora na segurança da operação, três mudanças são sugeridas.

5.1 Troca da malha de Perfuração e Tamponamento

A troca da malha de perfuração teve importantes ganhos para o rendimento de fogo e fragmentação, simulados no software e calculado separadamente.

Segundo (Silva,1998), o afastamento é dado por:

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

Onde, β é o afastamento, ρ_e é a densidade do explosivo, ρ_r a densidade da rocha, e D_e o diâmetro do furo em milímetros.

Substituindo os valores conhecidos:

$$\beta = 0,0123 \times (2(1,15/2/74) + 1,5) \times 57,15 = 1,6$$

Segundo Silva (1998), a carga explosiva é mais eficiente onde o afastamento é aproximadamente igual a 25 a 30 vezes o diâmetro do furo, e com isso, chegamos a um resultado do afastamento igual a 22 vezes o diâmetro do furo, resultado considerado bom.

Já o espaçamento, é dado por:

$$E = 0,223 \times (Hb + 2\beta) \quad \text{EQ. 4}$$

Onde Hb é a altura da bancada, e substituindo os valores conhecidos chegamos a um resultado de $E = 2,0$ m, valor que pode ser ajustado conforme resultados obtidos anteriormente.

O tampão, segundo Silva (1998), é 70% do valor do afastamento, então chegamos a um resultado de tampão com 1,2 m. Já a granulometria do tampão, segundo KOPPE (2012), deve ser 1/8 do diâmetro do furo, e para diâmetros de perfuração acima de 2,5", é recomendado o uso de brita (ORICA).

Fazendo essas alterações, e ajustando o espaçamento para 2,5 m segundo histórico de desmontes, vemos uma melhora significativa na previsão de fragmentação no software, conforme figura 25. É importante comentar que o tamponamento no software já é padronizado em brita, então não é possível observar a melhora do tamponamento no gráfico com as alterações realizadas, porém em campo, onde ele foi realizado com pó de perfuração, a melhora será visível.

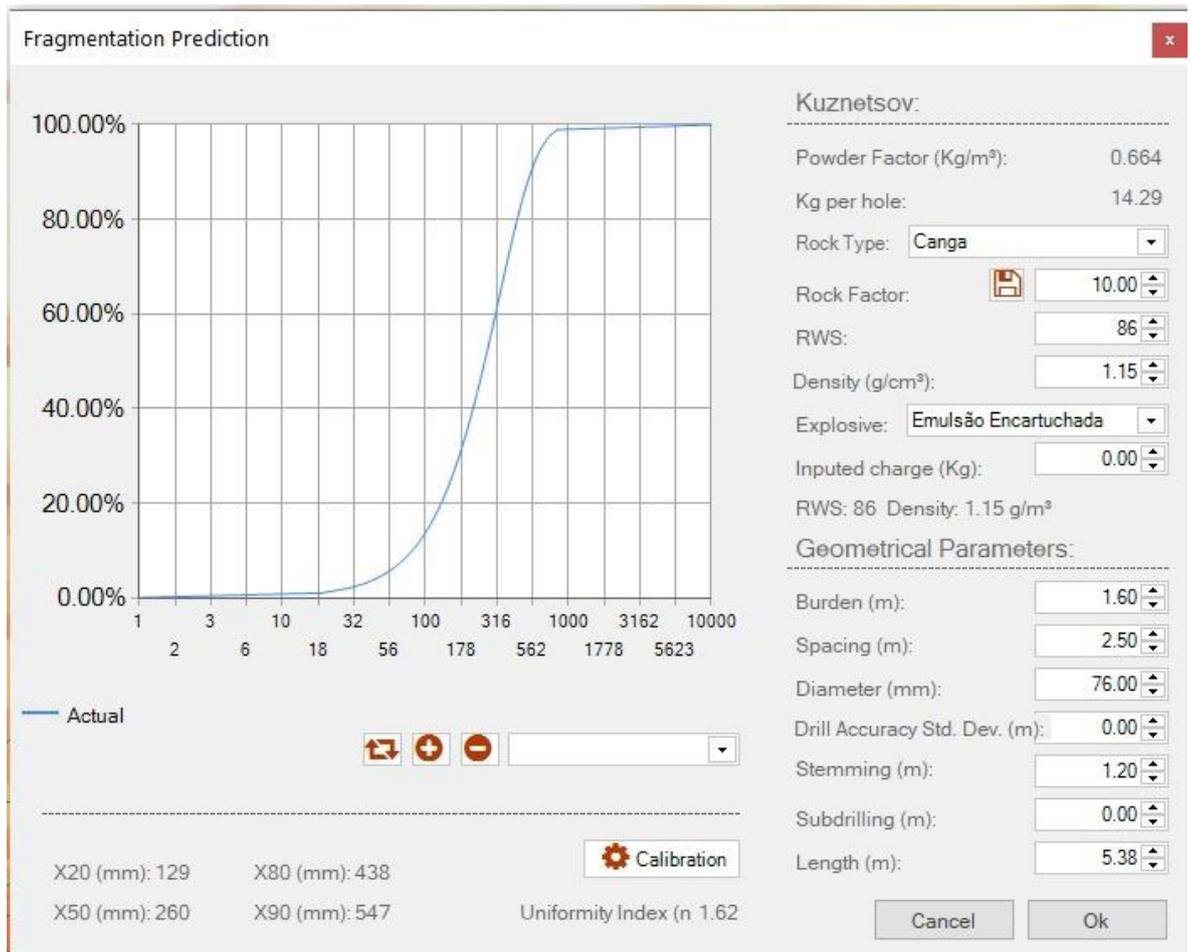


Figura 25 – Nova previsão de fragmentação (O-Pitblast,2021).

Os novos dados sobre a previsão de fragmentação obtidos (figura 25) foram: 20% do material é passante em 129 mm; 50 % do material é passante com 260 mm; 80% do material é passante em 438 mm; 90% do material é passante em 547 mm. Portanto, houve melhora significativa na fragmentação do material.

5.2 Adição de Booster com ligação eletrônica na iniciação do furo

A adição do booster em cada furo garantirá uma melhor e mais forte iniciação do fogo. Além dos ganhos inerentes ao iniciador, ocorrerão ganhos em segurança, pois o booster já tem o local adequado para acoplar a espoleta, sendo desnecessário furar o encartuchado para inserção da espoleta. Somado a isso, a utilização da ligação eletrônica irá garantir uma maior precisão do tempo de retardo e conseqüentemente um melhor rendimento do fogo, além de mantermos a ligação não-elétrica como backup caso ocorra falha de comunicação na ligação eletrônica.

A tabela 11 mostra as propriedades do booster.

Densidade	1.6 g/cm ³
VOD	> 7.000 m/s
Resistência a água	Excelente
Iniciador mínimo	Espoleta nº 8
Geração de calor	1.231 Kca/kg
Volume de gás	612 l/kg
Cor	Laranja
Embalagem	Polietileno

Tabela 11 – Propriedades do Booster (ORICA, 2021).

6 CONCLUSÃO

As mudanças sugeridas no desmonte na Mineração Morro do Ipê se mostraram interessantes pelos aspectos detalhados a seguir:

- Melhor controle da perfuração para cada desmonte, com uso do software O-Pitblast, possibilitando otimização do processo.
- Melhora significativa na fragmentação do material, medida em software e otimizada pela malha de perfuração.
- Aumento do rendimento do fogo e segurança com utilização de booster e da ligação eletrônica, além do backup não-elétrico na iniciação.

Testes em operações futuras podem então revelar formas mais seguras de trabalho, bem como reduzir custos, diminuir tempos de execução, sendo necessários para a melhoria da eficiência, bem como padronização das operações do desmonte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, M. R. An analysis of burn cut pull optimization through varying relief hole depths. (2014). Masters Thesis. Disponível em: https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7296. Acesso em: 28/11/2021

Silva, W.C. L. BLAST – Efeitos da onda de choque no ser humano e nas estruturas. 2007 – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA– Disponível em: <http://docplayer.com.br/4937845-Blast-efeitos-da-onda-de-choque-no-ser-humano-e-nas-estruturas.html>.

ORICA. Curso de Formação de Blaster – Orica Mining Services, 2019, 109 p. Itaúna, Minas Gerais.

BRITANITE. Guia de Utilização de Explosivos, 2019. Disponível em: <http://www.britanite.com.br/site2019/wp-content/uploads/2019/03/Guia-de-Utilizac%CC%A7a%CC%83o-de-Explosivos-V8.pdf> - acessado em: 28/11/2021

HOPLER, R. B., (Ed.), “ISEE Blaster’s Handbook.”, International Society of Explosives Engineers Inc, Cleveland, USA, 742p. 1999.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; BERMUDEZ, P. G. Manual de perforación y voladura de rocas - Madrid. Instituto Geológico y Minero de España – 1987. 442p.

JUNIOR, A. E. B. - Análise direta de vestígios de explosivos empregando espectroscopia vibracional: Uma proposta de auxílio à perícia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/SFSA-AL5L8T/ad_o_edson_de_barcelos_j_nior___disserta_o_de_mestrado.pdf?sequence=1 – acessado em: 28/11/2021

MENDES, M.L. Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos – Formação de Blaster, 2018 83p. Belo Horizonte. Disponível em: <https://www.academia.edu/10183750> – acessado em: 28/11/2021.

MORAIS, J. L. – Simulação de Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos – Universidade Federal de Minas Gerais – 2004. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUDB-8DNHFR> - acessado em: 28/11/2021

ORICA, 2019 – Catálogo de produtos – Disponível em: http://www.engex.com.br/docs/produtos/catalogo_web.pdf – acessado em: 28/11/2021

SILVA, V. C. Curso MIN 112 – Operações Mineiras. Ouro Preto, 2011. 146p.

SILVA, V.C. Desmonte de Rochas com Explosivos. Ietec, Belo Horizonte, 1998. 126p.

CETEM, Exploração do minério de ferro em Serra Azul (MG) requer gestão ambiental eficiente. 2012. Disponível em: <http://verbetes.cetem.gov.br> – acessado em: 28/11/2021

SILVA, J. C. R. M.; GOMES, M. H. (1998). Utilização e manuseio de explosivos. DEXPLO – EXPLOSIVOS MAGNUM LTDA, 104 pp.

SILVA, V. C. (1998). Desmonte de rochas com explosivos. INSTITUTO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 126 pp.

SILVA, V. C. (1998). Variáveis que interferem nos problemas ambientais gerados durante os desmontes de rochas. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, 134 p, São Paulo/SP.

KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. In: Manual de agregados para a construção civil. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.7. p.127-145.

ASI; ORAEE. Prediction of Rock Fragmentation in Open Pit Mines, using Neural Network Analysis. 2006. Disponível em: <https://dspace.stir.ac.uk/handle/1893/2297#.YbEQOtDMKUK> – acessado em: 28/11/2021

O-PITBLAST. User Manual. 2018. Disponível em: <http://downloads.o-pitblast.com/files/manual/O-Pitblast%20Manual%20v.3.0.pdf> – acessado em: 28/11/2021

O-PITBLAST. O-Pitblast Learning Management System. 2018. Disponível em: <http://moodle.o-pitblast.com/> - acessado em: 28/11/2021

CROSBY, W. "Drilling and Blasting in Open Pit and Quarries." Book 1, MREL, Kingston, Canadá, 480p. 1998.

JUNIOR, A. E. Barcelos. Análise direta de vestígios de explosivos empregando espectroscopia vibracional: Uma proposta de auxílio à perícia. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/> - acessado em: 28/11/2021

CARSTE. Relatório consolidado de monitoramento sismográfico em cavidades – Mineração Morro do Ipê. 2021