



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN**



**ALTAMIRO RODRIGUES DE ALMEIDA JUNIOR**

**OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE FOGO DE PEGMATITOS LITINÍFEROS**

**Ouro Preto – MG**  
**Fevereiro de 2024**

ALTAMIRO RODRIGUES DE ALMEIDA JUNIOR

OTIMIZAÇÃO DE PLANOS DE FOGO DE PEGMATITOS LITINÍFEROS

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Co-orientador: Aleksandro Silva Falcão

Ouro Preto – MG  
Fevereiro de 2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447o Almeida Junior, Altamiro Rodrigues de.  
Otimização de planos de fogo de pegmatitos litiníferos. [manuscrito] /  
Altamiro Rodrigues de Almeida Junior. - 2024.  
78 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.  
Coorientador: Prof. Esp. Alexsandro Silva Falcão.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Desmonte de rochas. 2. Lítio. 3. Pegmatitos. 4. Métodos de  
simulação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Falcão, Alexsandro Silva. III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.235

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Altamiro Rodrigues de Almeida Junior**

### Otimização dos Planos de Fogo de Pegmatitos Litíferos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 07 de Fevereiro de 2024

#### Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Elton Destro - Universidade Federal de Ouro Preto  
Eng. de Minas Ruan Fernandes Souza - Enaex

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/02/2024, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0667637** e o código CRC **456CA94C**.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a conclusão deste trabalho. Este é um momento significativo, e não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas.

Neste momento de conclusão e gratidão, não posso deixar de expressar minha profunda gratidão a Deus, fonte inesgotável de sabedoria, força e graça. Em cada etapa desta jornada acadêmica, sua presença foi sentida, e sua orientação foi a luz que iluminou meu caminho.

À minha mãe Elizabete, pai Altamiro e irmã Rayana por todo apoio e sacrifícios ao longo de toda a graduação, que estiveram ao meu lado durante toda a jornada, agradeço por seu apoio incondicional e compreensão. Seu incentivo foi vital para manter meu foco e determinação.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Carlos Enrique Arroyo Ortiz por sua orientação valiosa, com ideias, paciência e constante encorajamento ao longo deste processo. Seu conhecimento e insights foram fundamentais para moldar este trabalho.

Agradeço também aos professores Elton Destro e Daniel Jaques por suas valiosas sugestões, contribuições durante as discussões e avaliações deste projeto.

À empresa ENAEX, especialmente a Alexsandro Silva Falcão e Ronaldo Barcelos, pela orientação técnica, materiais e parceria para a realização deste trabalho, expressei minha sincera gratidão. Cada colaboração foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

À Thaísa Luiz pela revisão do texto e palavras de incentivo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este projeto. Cada experiência, conselho e palavra amiga foram essenciais para a conclusão deste trabalho acadêmico.

Obrigado a todos que fizeram parte desta jornada.

## RESUMO

A mineralização de lítio pode ocorrer tanto em evaporitos, quanto nos denominados pegmatitos litiníferos, rochas graníticas compostas por minerais como quartzo, feldspato, micas, espodumênio e petalita. Os pegmatitos possuem grande competência, podendo ter uma resistência a compressão uniaxial na ordem de 100 MPa, portanto, faz-se necessária a utilização de explosivos para sua fragmentação. A elaboração de projeto de fragmentação de rochas engloba etapas como a coleta de dados referente ao maciço rochoso, seleção do método de perfuração, definição de geometrias e energia, simulação das curvas granulométricas, além de retroanálises e ajustes pontuais visando a otimização da operação. Este trabalho propôs elaborar um projeto de desmonte preliminar para as litologias pegmatíticas da Mina de Volta Grande em Nazareno-MG, descritas por Jaques (2014). Foi elaborado um software utilizando a linguagem de programação Pascal para a realização dos cálculos dos planos de fogo e simulação das curvas granulométricas utilizando o modelo de fragmentação de Kuz-Ram modificado. Ao todo, foram simuladas 36 situações diferentes, variando a altura da bancada em 6, 10, e 15 metros e o diâmetro de perfuração em 3, 5 e 7 polegadas (76,2 mm, 127mm e 178 mm, respectivamente), utilizando ANFO ou Emulsão. As litologias pegmatíticas apresentaram diferenças significativas em sua resistência a compressão uniaxial, o que justificou a necessidade de dividi-las em dois grupos chamados Cenário A e Cenário B. As análises se basearam nos dados de P80, Razão de Carga, Porcentagem de material menor que 10 cm simulada pelo *software* e área da malha de perfuração dos desmontes (Afastamento x Espaçamento). O modelo de Kuz-Ram não se mostrou adequado para avaliação da fração fina do Cenário A, sendo indicada a utilização de um modelo de fragmentação alternativo. A modificação no explosivo utilizado influenciou principalmente a Razão de Carga teórica. As alterações nas alturas das bancadas representaram certa influência nos parâmetros analisados, principalmente na Razão de Carga, fração de finos, e P80. O diâmetro de 127 mm apontou os resultados mais discrepantes com relação ao P80 e fração de finos. O diâmetro de 178 mm apresentou os maiores valores de razão de carga e áreas de malha. Para o Cenário B os diâmetros de 127 mm e 178 mm geraram resultados similares de áreas de perfuração

**Palavras-chave:** Lítio, Desmonte de Rochas, Pegmatito, Modelo de Kuz-Ram, Simulação

## ABSTRACT

A lithium mineralization can occur in both evaporites and the so-called lithium-bearing pegmatites, granitic rocks composed of minerals such as quartz, feldspar, micas, spodumene, and petalite. Pegmatites exhibit significant competence, thus requiring the use of explosives to have appropriate fragmentation. The development of a rock blasting project involves stages such as collecting data about the rock mass, selecting the drilling method, calculating blast plans, simulating size distribution curves, as well as to perform retro-analyses and specific adjustments aiming the optimization of the operation. This study aimed to develop a preliminary blasting project for the pegmatitic lithologies of the Volta Grande Mine in Nazareno-MG, as described by Jaques (2014). A software was developed using the Pascal programming language to perform blast plan calculations and simulate size distribution curves using the modified Kuz-Ram fragmentation model. In total, 36 different situations were simulated, varying the bench height at 6, 10, and 15 meters, and the drill hole diameter at 3, 5, and 7 inches (76.2 mm, 127 mm, and 178 mm, respectively), using ANFO or Emulsion explosives. The pegmatitic lithologies showed significant differences in their uniaxial compressive strength, justifying the need to divide them into two groups called Scenario A and Scenario B. Analyses were based on P80 data, powder factor, fraction of material smaller than 10 cm, and blast hole pattern area. The Kuz-Ram model proved unsuitable for evaluating the fine fraction of Scenario A, indicating the need for an alternative fragmentation model. The modification in the explosive used mainly influenced the theoretical powder factor. Changes in bench heights represented a certain influence on the analyzed parameters, especially the powder factor, fines fraction, and P80. The 127 mm diameter showed the most discrepant results concerning P80 and fine fraction. The 178 mm diameter presented the highest values for the powder factor and blast hole pattern areas. For Scenario B, the 127 mm and 178 mm diameters generated similar blast hole pattern areas.

**Keywords:** Lithium, Rock Blasting, Pegmatite, Kuz-Ram fragmentation model, Simulation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostras dos principais minerais de lítio, coletadas na dos municípios de Araçuaí e Itinga. A) Espodumênio, B) Lepidolita, C) Petalita, D) Amblygonita.....	15
Figura 2 - Mapa de Minas Gerais com a distribuição das áreas conhecidas de depósitos e jazidas de lítio no estado, apresentando os distritos de (1) Araçuaí, (2) São José da Safira, (3) Conselheiro Pena, (4) São João del Rei.....	18
Figura 3 - Coroa tricônica utilizada no método rotativo .....	20
Figura 4 - Sistemas de perfuração rotopercussivos (a) Método de Martelo de superfície (b) Método de Martelo de fundo de furo.....	21
Figura 5 - Ábaco para seleção do método de perfuração .....	22
Figura 6 - Influência do diâmetro de perfuração no número de furos na malha, tamanho de pilha, fragmentação do material e dimensão dos equipamentos necessários para carregamento.....	23
Figura 7 - Esquematização do Espaçamento e Afastamento de uma malha de perfuração .....	24
Figura 8 - Representação gráfica das malhas quadrada, retangular e estagiada .....	25
Figura 9 - Áreas de influência de explosivo nas malhas a) quadradas e b) estagiadas .....	25
Figura 10 - Área de influência do explosivo na malha de triângulo equilátero .....	26
Figura 11 - Principais tipos de desvios de furo.....	27
Figura 12 - Possibilidades de amarração para uma mesma malha de perfuração....	35
Figura 13 - Esquematização da técnica de pré-corte .....	36
Figura 14 - Equipamento Microtrap .....	40
Figura 15 - Explosivo ANFO.....	42
Figura 16 - Emulsão explosiva .....	43
Figura 17 - Espoleta comum .....	45
Figura 18 - Sistema de iniciação da Espoleta Simples.....	45
Figura 19 - Detonador não elétrico comercializado pela ENAEX (Brinel).....	46
Figura 20 - Espoleta eletrônica comercializada pela ENAEX (Daveytronic).....	47
Figura 21 - Disparo de fogo, utilizando o sistema de iniciação eletrônica .....	48
Figura 22 - Reforçador comercializado pela ENAEX (X-Booster 450) .....	49
Figura 23 - Kit de acessórios utilizados em cada furo. (Da esquerda para a direita) Reforçador, detonador eletrônico, detonador não elétrico.....	49
Figura 24 - Operação do Software WipFrag.....	50



Figura 25 - Realização de levantamento para análise granulométrica em pilha desmontada.....	51
Figura 26 - Relatório granulométrico gerado pelo Strayos.....	52
Figura 27 - Representação gráfica do desenvolvimento de projeto de Desmonte de Rochas .....	56
Figura 28 - Interface da IDE Lazarus. (A) Barra de ferramentas, (B) Inspetor de objetos, (C) Editor de código, (D) Formulário .....	59
Figura 29 - Interface do Simulador .....	59
Figura 30 - Exemplo de simulação .....	60
Figura 31 - Classes de RMR das litologias.....	64
Figura 32 – Ficha técnica do Ibemux .....	65
Figura 33 - Ficha técnica do Anfomax.....	66
Figura 34 - Relação entre o diâmetro da carga e velocidade de detonação do Anfomax .....	66
Figura 35 - Cenários simulados no ábaco de perfuração .....	67
Figura 36 - Resultado do cenário A.....	69
Figura 37 - Resultados do cenário B .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Considerações sobre a relação Hb/A.....	29
Tabela 2 - ANFO de massa específica 0,85 (g/cm <sup>3</sup> ).....	33
Tabela 3 - Emulsão de massa específica 1,20 (g/cm <sup>3</sup> ) .....	33
Tabela 4 - Massa específica das litologias da Mina de Volta Grande .....	61
Tabela 5 - Resistência a Compressão Uniaxial das Litologias .....	62
Tabela 6 - Variáveis para o cálculo do fator de rocha .....	63
Tabela 7 - Valores utilizados para o cálculo do fator de rocha .....	64
Tabela 8 - Resultados das simulações.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFO – *Amonium Nitrate and Fuel Oil*

cm – Centímetro

g/t – Gramas por tonelada

m – Metros

m<sup>3</sup> - Metro cúbico

mm – Milímetros

P80 – Tamanho correspondente a 80% do material passante

UCS - *Uniaxial Compressive Strength*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos .....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos .....	13
1.2	Estrutura do Trabalho.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	Características gerais das mineralizações de lítio .....	15
2.2	Histórico de estudos, empreendimentos e mercado atual.....	16
2.3	Perfuração.....	18
2.3.1	Métodos de perfuração de rochas .....	19
2.3.2	Diâmetro de perfuração .....	22
2.3.3	Malha de perfuração.....	23
2.3.4	Desvios de perfuração.....	26
2.4	Plano de fogo .....	27
2.4.1	Afastamento.....	27
2.4.2	Espaçamento.....	29
2.4.3	Subperfuração (S) .....	30
2.4.4	Profundidade do furo (Hf) .....	30
2.4.5	Tampão (T).....	31
2.4.6	Carga de fundo (Hcf) .....	31
2.4.7	Carga de coluna (Hcc).....	31
2.4.8	Razão de carregamento (RCt).....	32
2.4.9	Sequência de acionamento .....	34
2.4.10	Desmonte escultural.....	35
2.5	Explosivos .....	37
2.6	Tipos de explosivos.....	42
2.6.1	ANFO.....	42
2.6.2	Emulsão.....	43
2.7	Acessórios.....	44
2.7.1	Espoleta comum.....	44
2.7.2	Detonadores não-elétricos.....	46
2.7.3	Detonadores eletrônicos.....	46

2.7.4	Reforçadores (Boosters).....	48
2.8	Análise granulométrica.....	50
2.8.1	Simulação de curva granulométrica.....	52
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
3.1	Cenários estudados .....	57
3.2	Método de perfuração .....	58
3.3	Cálculo do plano de fogo e simulação de curva granulométrica .....	58
3.4	Desenvolvimento do simulador .....	58
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>61</b>
4.1	Dados de cada cenário .....	61
4.1.1	Densidade da rocha.....	61
4.1.2	Resistência da rocha .....	62
4.1.3	Fator de rocha .....	62
4.2	Características dos explosivos.....	65
4.3	Condições das simulações.....	66
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
5.1	Método de perfuração .....	67
5.2	Resultados das simulações.....	68
5.2.1	Cenário A.....	69
5.2.2	Cenário B.....	71
5.3	Comparação entre cenários .....	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização adequada de explosivos na fragmentação de rochas na mineração muitas vezes foi referida como uma ciência, bem como uma arte ao longo dos anos. No passado, o desenvolvimento de explosivos consolidou-se como ciência graças aos químicos que se dedicaram a aperfeiçoá-los, tornando-os estáveis, mais poderosos e com utilidade prática. Nas últimas décadas, a necessidade de se minimizar os custos de detonação e britagem, melhorar os índices de fragmentação e controlar os impactos ambientais provenientes do desmonte com explosivos, motivaram diversos estudos voltados a um projeto de desmonte cuidadosamente projetado (HARTMAN, 1992).

Dentre as commodities mineradas em território brasileiro, o lítio tem se destacado nos últimos anos. O aumento de preço devido à alta demanda no mercado combinado com a descoberta de muitas novas jazidas, têm despertado a atenção tanto de investidores, buscando novas alternativas de mercado, quanto de acadêmicos, vizando se aprofundar nos pormenores deste modelo de mineração. O lítio, por sua vez, ocorre principalmente em rochas graníticas chamadas pegmatitos que por sua alta competência, exigem a utilização de explosivos em sua lavra.

A elaboração do plano de fogo passa por diversas etapas, demandando informações acerca da rocha a ser desmontada, explosivo a ser utilizado, geometria de cava, granulometria desejada e, ainda, possíveis interferências a se atentar. A otimização desta operação unitária promove ganhos econômicos significativos em todas as outras subsequentes, sendo essencial para a aplicação do conceito de *mine-to-mill*.

Desse modo, se faz pertinente a utilização de ferramentas de simulação tanto para cálculo dos planos de fogo quanto para se determinar a curva granulométrica de acordo com diferentes parâmetros geométricos destes. O trabalho utilizará dados publicados da Mina de Volta Grande, localizada na província pegmatítica de São João Del Rei.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O Lítio apresenta diversas rotas de processamento aplicadas em diferentes empreendimentos, sendo as principais a flotação e a separação por meio denso. Dessa forma os requisitos granulométricos do desmonte variam muito de empresa para empresa. Com base nisso, este trabalho busca elaborar projeto desmonte generalizado, aplicado às rochas pegmatíticas, apresentando, com base na literatura e simulações computacionais, o método de perfuração mais indicado e uma comparação entre diversos cenários variando os parâmetros geométricos do plano de fogo e explosivo utilizado.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do projeto foram:

- Propor método de perfuração indicado com base na resistência da rocha e diâmetro de furo desejado;
- Criar simulador de desmontes que calcula o plano de fogo recebendo como entradas os dados da rocha, do explosivo, altura de bancada e diâmetro de perfuração e gera a curva granulométrica teórica por meio do modelo de Kuz-Ram modificado. O software não contempla sequência e tempos de retardo nem alterações manuais nos parâmetros geométricos do plano de fogo, que o software calcula automaticamente;
- Realizar cálculos de planos de fogo variando o explosivo utilizado entre ANFO e Emulsão, a altura de bancada em 6, 10 e 15 metros e variando os diâmetros de perfuração em 3, 5 e 7 polegadas;
- Apresentar comparativo entre os cenários simulados, com base na área da malha do plano de fogo, distribuição granulométrica e razão de carga;

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em capítulos, se configurando da seguinte maneira:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, possuindo tópicos referentes à mineração de lítio como um todo e ao desmonte de rochas com explosivo. São apresentadas as características gerais das mineralizações de lítio bem como um histórico de empreendimentos da área. Foi levantado um referencial teórico contemplando os métodos de perfuração, cálculo dos planos de fogo, características e propriedades dos explosivos, especificamente ANFO e Emulsão, tipos de acessórios de detonação utilizados. Também foram apresentados modelos matemáticos para simulação de fragmentação de rochas.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho, detalhando os passos e descrevendo os cálculos e simulações realizadas. Neste capítulo a construção do simulador é apresentada.

No Capítulo 4 são apresentadas as especificidades provenientes do caso estudado (Mina de Volta Grande), descrevendo as variações nas características das litologias, além das propriedades específicas dos explosivos da Enaex utilizados como base nos cálculos.

Os resultados das simulações de cada cenário estão compilados em tabelas e gráficos presentes no capítulo 5, bem como comentários acerca dos mesmos.

O Capítulo 6 apresenta conclusões obtidas a partir deste estudo, análises dos resultados com base na qualidade da fragmentação e custos potenciais atrelados aos mesmos, bem como as recomendações para trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características gerais das mineralizações de lítio

Chaves e Dias (2022) apontaram em seu estudo que “existem diversos minerais que possuem lítio em sua composição química. Entre os mais importantes em termos econômicos estão o espodumênio, amblygonita, petalita e lepidolita” (Figura 1). É importante ressaltar que no Brasil eles ocorrem estritamente nos classificados como pegmatitos graníticos diferenciados, possuindo sua mineralogia caracterizada por quartzo, feldspato e micas, sempre associados aos minerais raros citados acima (CHAVES *et al.*, 2005), sendo historicamente explorados para aplicações industriais gerais. O único mineral que atualmente apresenta uma rota economicamente viável para a produção do concentrado de lítio é o espodumênio.

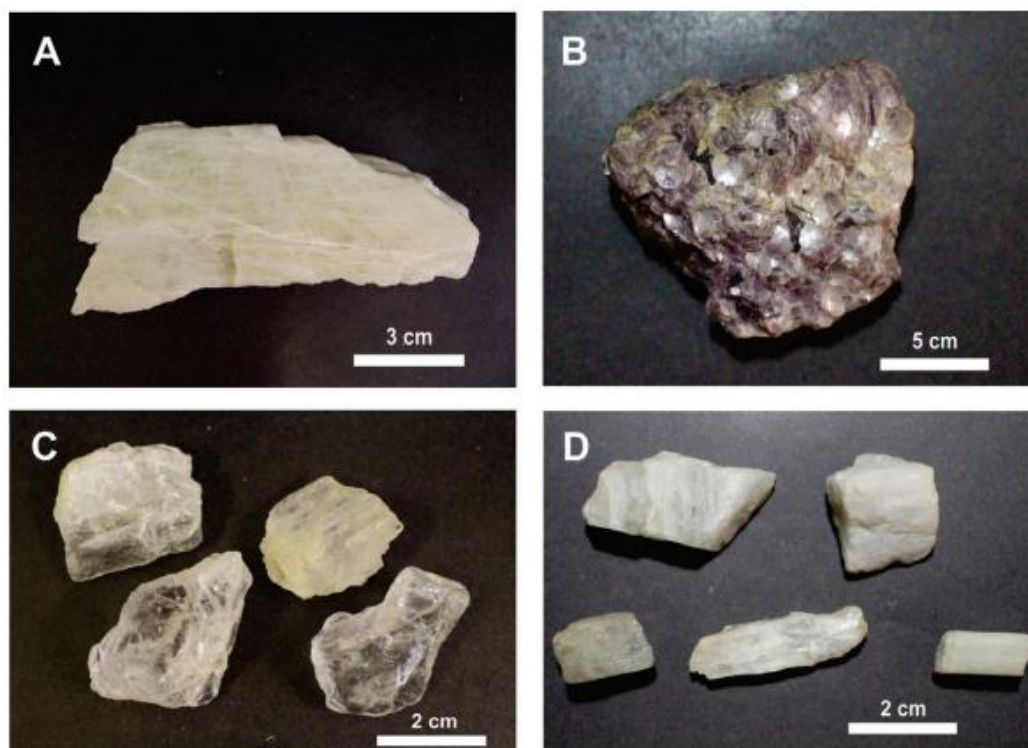


Figura 1 - Amostras dos principais minerais de lítio, coletadas na dos municípios de Araçuaí e Itinga.

A) Espodumênio, B) Lepidolita, C) Petalita, D) Amblygonita.

Fonte: CHAVES *et al.* (2022)

O lítio, por apresentar alta reatividade, não é encontrado em sua forma nativa na natureza, estando sempre associado a algum outro elemento, geralmente o

oxigênio e silício. Apresenta ocorrências tanto em evaporitos (salmouras de lítio) quanto nas rochas plutônicas supracitadas, denominadas pegmatitos. As salmouras são formadas em bacias de drenagem fechadas, onde a taxa evaporação é maior do que a taxa de precipitação. Já os pegmatitos são a consequência da cristalização lenta de magma em profundidade, que se aloja em espaços abertos (intrusões) das rochas encaixantes BRAGA (2008).

Os pegmatitos, como já abordado, são rochas graníticas, compostas principalmente por quartzo, feldspato e micas, possuindo textura grossa, formada muitas vezes por cristais bem desenvolvidos que podem chegar a tamanhos de escala métrica (LUZ *et al.*, 2003). Johnston Jr. (1945a, 1945b), citado posteriormente por Soares et al. (2016) propôs uma classificação para os pegmatitos baseada em sua estrutura interna, separando-os nos chamados pegmatitos homogêneos que não possuem zoneamento mineralógico interno e nos nomeados pegmatitos heterogêneos, constituído por zonas de cristalização I, II, III e IV, sendo geralmente implementada, segundo Moore (1945), uma lavra seletiva na zona III, pois é onde há a ocorrência dos principais minerais de valor econômico.

## **2.2 Histórico de estudos, empreendimentos e mercado atual**

Os primeiros empreendimentos de extração dos compostos de lítio datam do século XIX na Alemanha. Posteriormente, surgiram projetos na França e nos Estados Unidos, país que passou a dominar o mercado mundial. Em 1986, projetos de exploração de evaporitos de lítio foram iniciados no Chile e Argentina. No Brasil, o lítio é extraído a mais de 30 anos pela CBL – Companhia brasileira de Lítio, em corpos pegmatíticos nos municípios de Araçuaí/MG e Itinga/MG (BRAGA, 2008). Vale pontuar que a utilização desses produtos sempre se limitou, principalmente, à aplicações na indústria de cerâmicas, de vidros e farmacêutica.

Outra aplicabilidade do lítio é na composição de baterias elétricas com grande capacidade de armazenamento de energia. A partir do século XXI, com todos os avanços tecnológicos recentes, tanto no mercado automobilístico, com os carros elétricos, quanto na popularização dos dispositivos móveis, o lítio vem recebendo grande relevância entre as commodities pertinentes ao mercado de tecnologia, e essa demanda tende a aumentar nas próximas décadas (SALOMÃO e BORGES, 2019).

Por conta desse aumento de demanda e de preço, o mercado de lítio tem ganhado a atenção de investidores ao redor do mundo.

Em 1977, José Haroldo da Silva Sá, em sua tese de doutorado, conduziu um estudo na região do Vale do Jequitinhonha, nordeste de Minas Gerais, especificamente nos municípios de Itinga e Araçuaí, no qual apresentou um estudo geral acerca das características geológicas dos pegmatitos litiníferos da região, documentando pela primeira vez, de forma detalhada, o potencial da região para esse tipo de depósito. Mais de 40 anos após esse estudo, a região é o epicentro de diversos projetos de mineração, sendo até rotulada de “Vale do Lítio”.

Posteriormente, um estudo de pesquisa mineral executado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), publicado em 2016 (PAES *et al.* 2016), explorou 45 depósitos de lítio no Vale do Jequitinhonha. Contemplando uma área de 17.750 km<sup>2</sup>, o estudo constatou um grande potencial de aumento das reservas de lítio conhecidas no Brasil, representando um atrativo para empreendedores. Nos anos seguintes, a região recebeu diversos projetos de prospecção bem mais detalhados que o feito pelo CPRM e já conta com projetos de mineração em fase de lavra. A Figura 2 apresenta de forma gráfica os depósitos e jazidas de lítio estudadas no estado de Minas Gerais. Atualmente, grandes empresas se veem presentes na região, sendo pertinente citar a canadense Sigma Lithium, a norte-americana Atlas Lithium, a já veterana Companhia Brasileira de Lítio (CBL) e, mais ao Sul do estado, no município de Nazareno, a AMG Mining.



Figura 2 - Mapa de Minas Gerais com a distribuição das áreas conhecidas de depósitos e jazidas de lítio no estado, apresentando os distritos de (1) Araçuaí, (2) São José da Safira, (3) Conselheiro Pena, (4) São João del Rei.

Fonte: CHAVES *et al.* (2022)

### 2.3 Perfuração

A perfuração de rochas é a primeira operação unitária na etapa de lavra de uma determinada frente. Na mineração, tem como principal intuito a criação de espaços (furos) que serão carregados com explosivos para que assim ocorra a fragmentação desta rocha, cujas propriedades físicas inviabilizam o desmonte mecânico.

A perfurabilidade de uma rocha é a facilidade com que um equipamento de perfuração penetra na mesma. Segundo Silva (2019) a perfurabilidade da rocha é inversamente proporcional à sua resistência à compressão uniaxial. O autor ainda pontua que a perfurabilidade de um determinado tipo de rocha depende, entre outros fatores, da dureza dos minerais e do tamanho das partículas que a compõem (sua textura). Sendo assim, quanto mais duros os minerais e mais bem formados os cristais que compõem um determinado maciço, menor será sua perfurabilidade.

### 2.3.1 Métodos de perfuração de rochas

A seleção do tipo de equipamento mais adequado para a operação de perfuração dependerá de diversos fatores como: topografia do terreno, profundidade desejada dos furos, além de características tanto da rocha intacta quanto do maciço rochoso. Considerando uma operação de perfuração destinada ao desmonte de rochas com explosivos, três métodos podem ser implementados: perfuração rotativa com bits tricônicos (Holler Bit, rotativo), martelo de superfície (Top-Hammer, método rotopercussivo) e o método de martelo de fundo de furo (down the hole, rotopercussivo).

- Perfuração rotativa

Originalmente utilizado na indústria de petróleo, esse método vem sendo amplamente utilizado nas operações de desmonte de rochas. Nessa técnica, a rocha é triturada por meio da energia proveniente de um tubo que, em contato com o bit tricônico, gira e pressiona-o contra a rocha. Não se utiliza a percussão como fonte de energia para fragmentar a rocha, sendo esta ausência compensada pela grande pressão de avanço (pull down) e pela broca tricônica (Figura 3) que possui alto poder de trituração, Silva (2019, p40).



Figura 3 - Coroa tricônica utilizada no método rotativo

Fonte: SILVA (2019)

- Martelo de superfície

Esse método possui como sistemas de acionamento a rotação e percussão. Um pistão no interior do martelo (que pode ser pneumático ou hidráulico) produz a energia que então é transmitida por meio da haste até a broca. A rotação da broca e a energia do martelo se superfície promovem a fragmentação da rocha.

- Martelo de fundo de furo (Down the hole)

O sistema de perfuração por martelo de fundo foi originalmente desenvolvido com o intuito de aumentar a taxa de perfuração em rochas duras. Nesse método, a rotação é gerada no exterior do fundo e a percussão apenas no fundo do furo, onde o pistão do martelo faz contato direto com a coroa. Possui vantagens consideráveis em relação ao sistema de Martelo de superfície em perfurações de grandes profundidades, pois enquanto a taxa de penetração do top hammer cai conforme há

o aprofundamento do furo, na metodologia down the hole, est se mantém constante. Também oferece maior segurança para o operador, pois o ruído gerado na operação é abafado no fundo do furo, permitindo também que seja possível identificar anomalias na perfuração por meio do som proveniente do contato da broca com a rocha. A Figura 4 apresenta de forma esquematizada os sistemas de perfuração por rotopercussão.

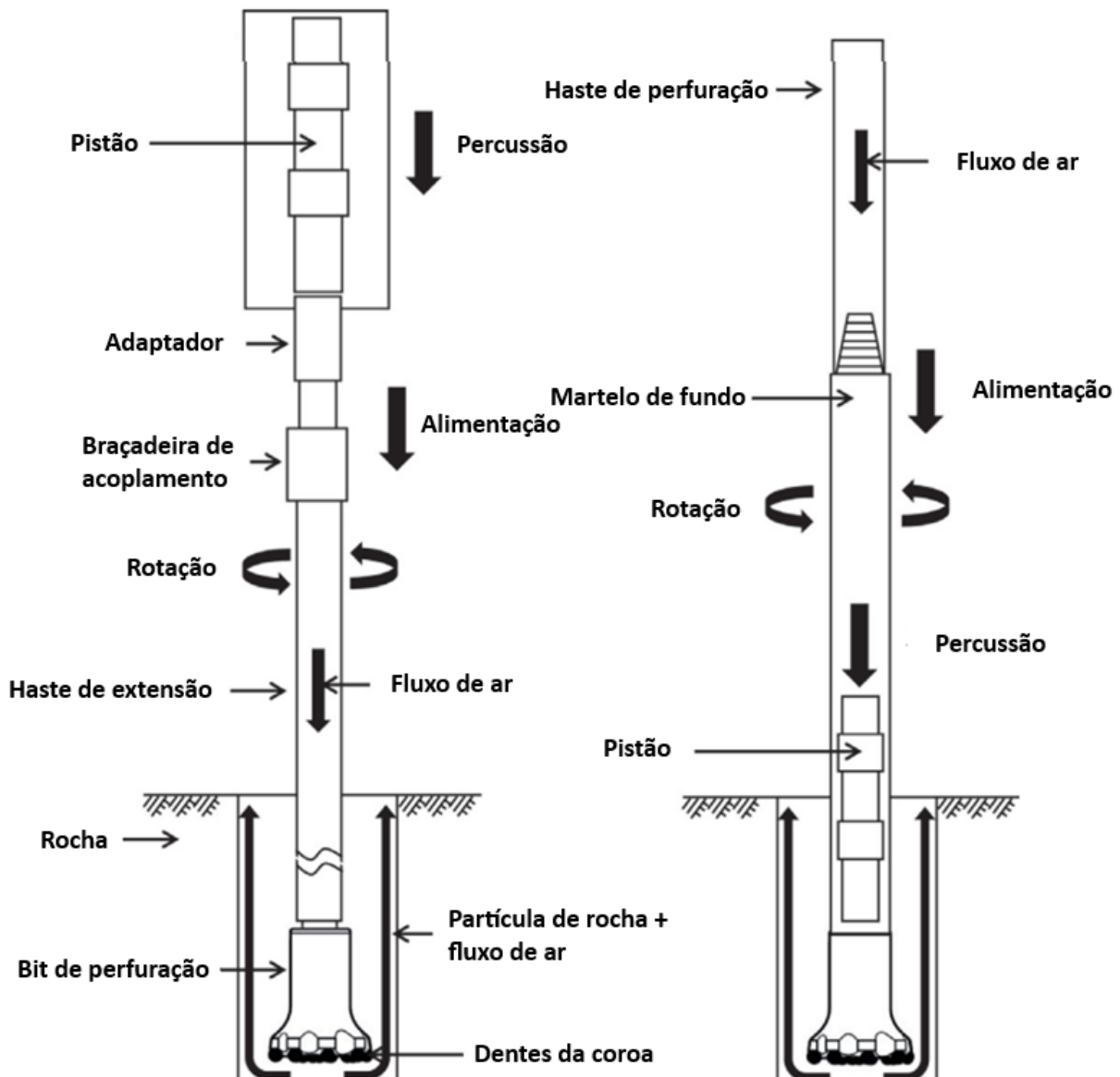


Figura 4 - Sistemas de perfuração rotopercussivos (a) Método de Martelo de superfície (b) Método de Martelo de fundo de furo.

Fonte: KIM *et al.*(2020)

É possível determinar o método de perfuração a ser utilizado por meio de um ábaco que relaciona a resistência a compressão uniaxial da rocha, a pressão exercida no fundo do furo (pull-down) e o diâmetro do furo (Figura 5). (SILVA, 2019)

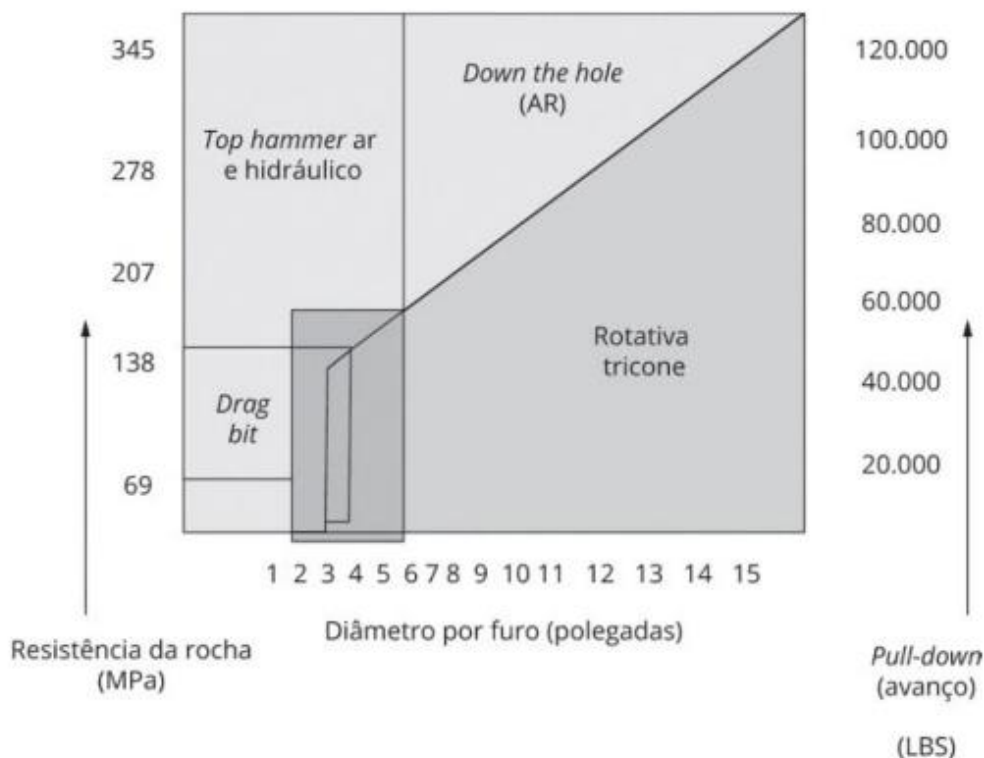


Figura 5 - Ábaco para seleção do método de perfuração

Fonte: SILVA (2019)

### 2.3.2 Diâmetro de perfuração

A seleção do diâmetro do furo dependerá de seu intuito. Especificamente em furos para a detonação, o diâmetro exercerá influência na produção, curva granulométrica do material detonado, escolha do explosivo a ser utilizado, vibração proveniente do desmorte e custos associados a operação como um todo. Nesse aspecto, os furos de maior diâmetro geralmente apresentam menores custos de perfuração e detonação. Muitas vezes a seleção do diâmetro leva em consideração os equipamentos de perfuração carregamento e transporte disponíveis, como podemos ver na Figura 6. (SILVA, 2019).



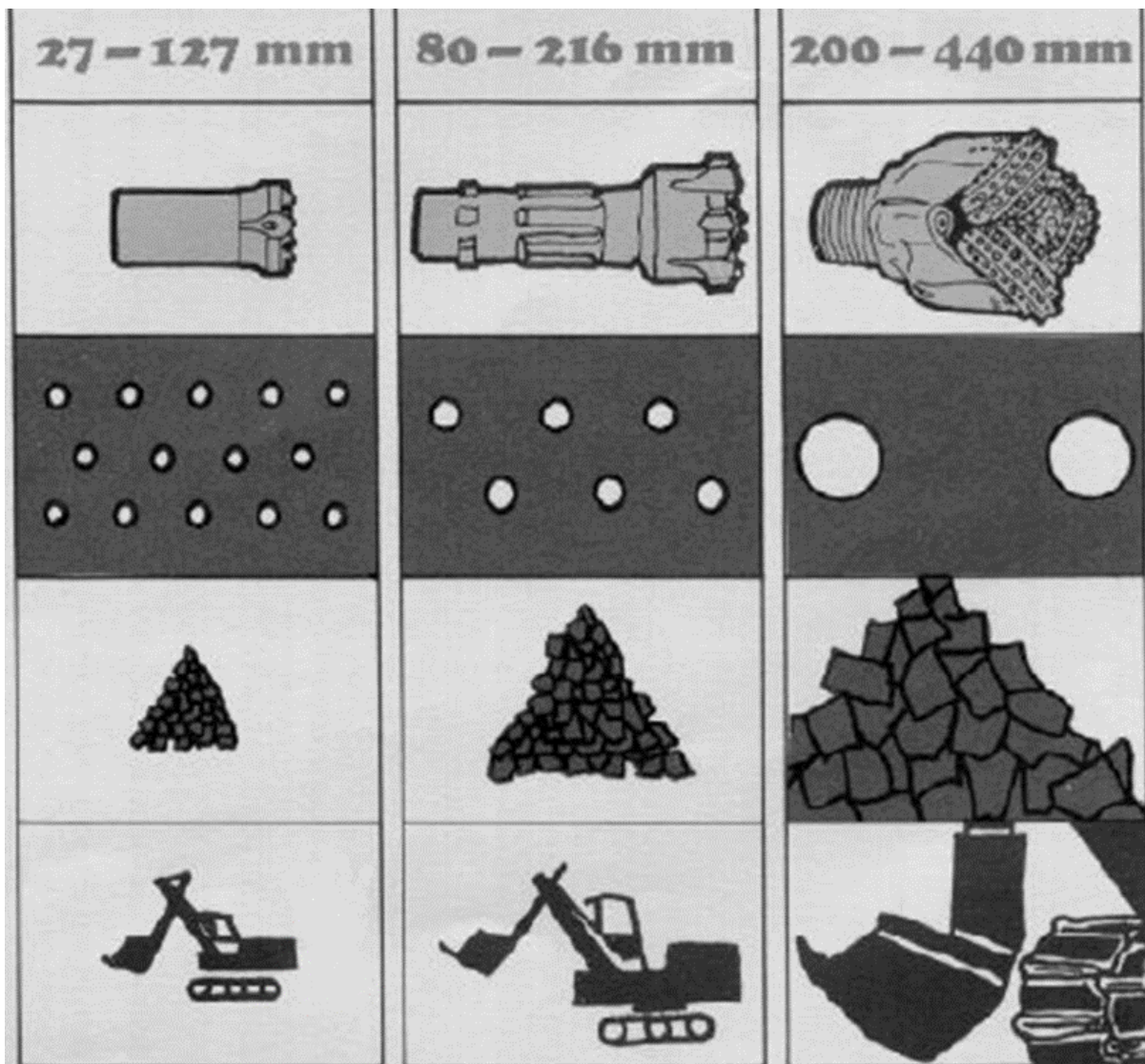


Figura 6 - Influência do diâmetro de perfuração no número de furos na malha, tamanho de pilha, fragmentação do material e dimensão dos equipamentos necessários para carregamento

Fonte: SILVA, 2019

### 2.3.3 Malha de perfuração

A malha de perfuração pode ser definida como a configuração espacial em duas dimensões dos furos de produção na bancada a ser desmonta, sendo caracterizadas pelo seu afastamento e espaçamento (Figura 7). O espaçamento é a distância entre furos de mesma linha, enquanto o afastamento é a distância entre essas linhas, ou a distância entre a face livre e a linha mais próxima. Esta configuração pode ser: quadrada, retangular, estagiada, triângulo equilátero ou alongada. (SILVA, 2019).

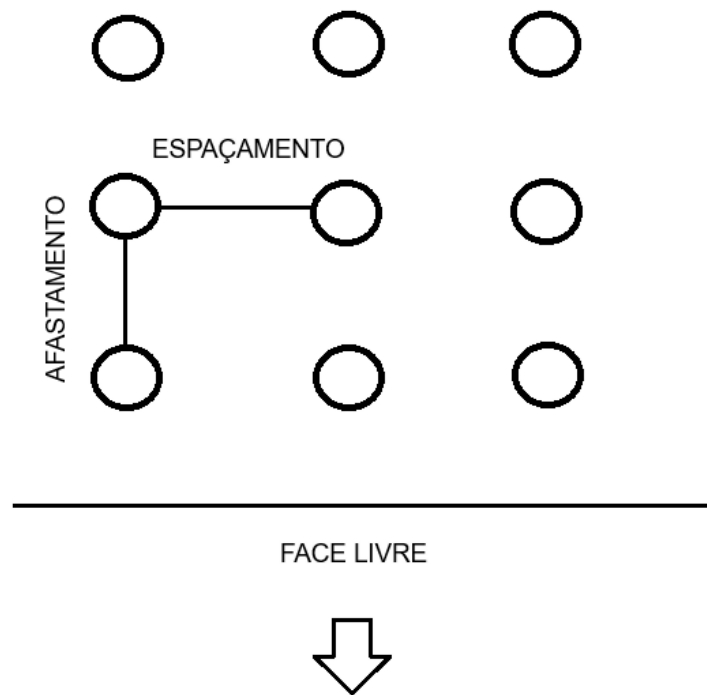


Figura 7 - Esquematização do Espaçamento e Afastamento de uma malha de perfuração

Fonte: O Autor

- Malha quadrada

A malha quadrada é caracterizada por possuir medidas iguais para seu espaçamento(E) e afastamento(A) além de furos perfeitamente alinhados (Figura 8), por esse motivo, facilitam a operação de perfuração, mas resultam em uma área de influência menor do explosivo (Figura 9).

$$E = A$$

- Malha retangular

Possuem o espaçamento maior que o afastamento, além dos furos alinhados, como no caso anterior. Conseqüentemente, possuem as mesmas vantagens e desvantagens da malha quadrada, sendo aplicada de acordo com a avaliação do responsável pelo desmonte.

$$E > A$$

- Malha estagiada

Nesta geometria, os furos de linhas diferentes não são mais alinhados e sim alternados, ainda respeitando o espaçamento e afastamento determinados. Neste caso, o explosivo possui uma melhor distribuição e área de influência no maciço rochoso (Figura 9), porém sua operação de perfuração é um pouco mais demorada.

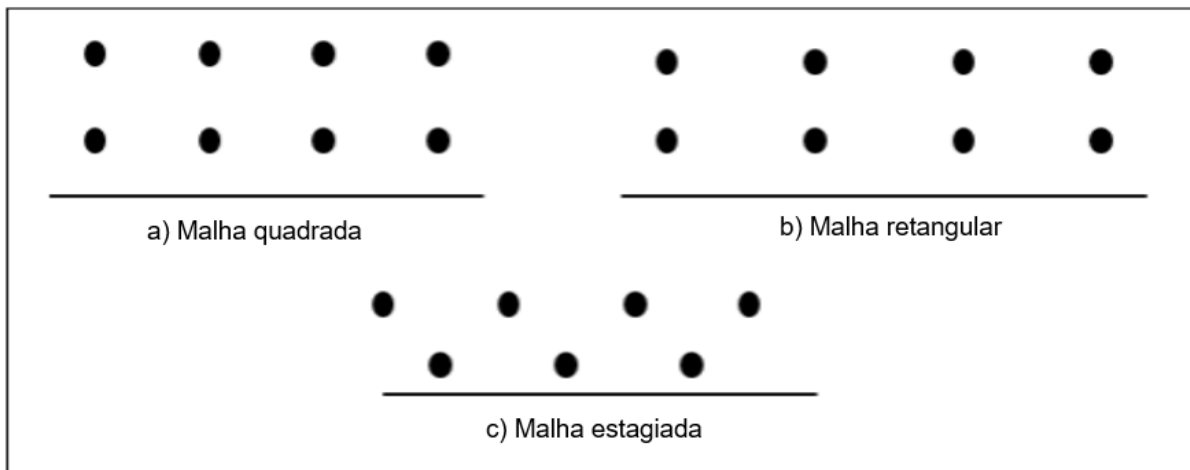


Figura 8 - Representação gráfica das malhas quadrada, retangular e estagiada

Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

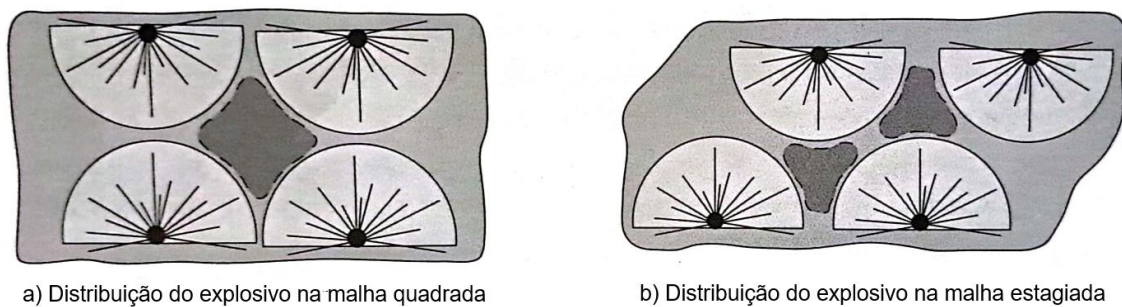


Figura 9 - Áreas de influência de explosivo nas malhas a) quadradas e b) estagiadas

Fonte: Adaptado de SILVA, 2019

- Malha triângulo equilátero

Indicadas para o desmonte de rochas compactas e duras, são malhas estagiadas com relação  $\text{Espaçamento}(E)/\text{Afastamento}(A) = 1,15$ . Possuem ótima distribuição de energia, possibilitando uma boa fragmentação no maciço, especialmente no centro do triângulo equilátero (Figura 10).

$$\frac{E}{A} = 1,15$$

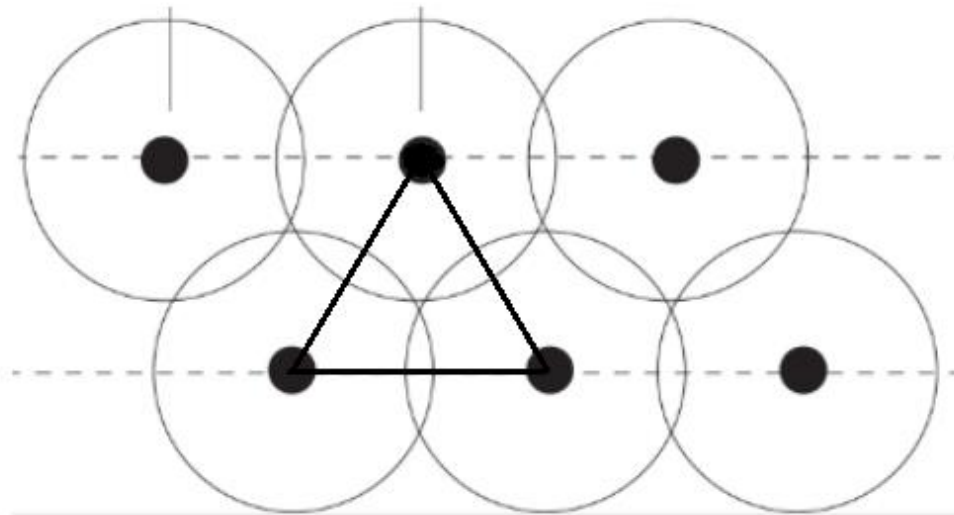


Figura 10 - Área de influência do explosivo na malha de triângulo equilátero

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

- Malhas alongadas

Indicadas principalmente para a fragmentação de friáveis/macias, possuem uma maior relação Espaçamento (E)/Afastamento(A), sendo geralmente superior a 1,75. Por possuírem um menor afastamento, geram um maior lançamento de material e pilhas de menor altura.

$$\frac{E}{A} = 1,75$$

#### 2.3.4 Desvios de perfuração

A perfuração para desmonte tem como intuito realizar furos o mais retilíneos possível para que o explosivo seja distribuído de acordo com o planejado. Durante a operação de perfuração devido ao tipo de rocha, profundidade, inclinação e diâmetro do furo, pode ocorrer o fenômeno denominado “desvio do furo”, que nada mais é que distância entre as coordenadas pretendidas e as realizadas de um furo, medidas a partir do pé do furo. Também pode ser a diferença entre ângulo pretendido originalmente para aquele furo e o ângulo efetivo perfurado. Esses desvios podem causar áreas com pouca ação dos explosivos, acarretando na formação de blocos.

Pode ocorrer, ainda, a união de dois furos, ocasionando no que é chamado de “detonação por simpatia”, evento no qual é detonada uma carga muito maior do que a prevista, gerando sérios riscos à operação.

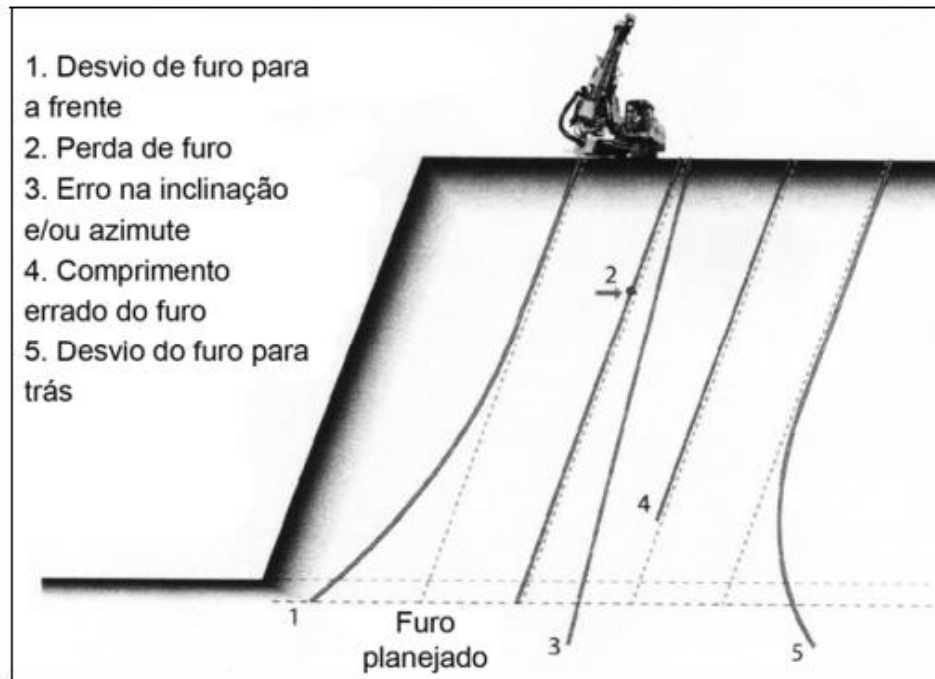


Figura 11 - Principais tipos de desvios de furo

## 2.4 Plano de fogo

O plano de fogo é definido por Silva (2019) como “o projeto executivo para o desmonte (escavação) de rochas com o uso sistemático de explosivos”. No plano de fogo serão apresentados o plano de perfuração, os tipos e quantidades de explosivos e os esquemas de ligação e temporização dos furos que serão detonados. Silva ainda desenvolve, ressaltando que o plano de fogo deve ser calculado de forma precisa, testado e ajustado ao longo do tempo. O objetivo principal do plano de fogo é atender requisitos estabelecidos como fragmentação desejada e um controle estrutural adequado, respeitando as diretrizes ambientais que dizem respeito a esse processo.

### 2.4.1 Afastamento

É considerada a variável mais crítica do plano de fogo, causando efeitos drásticos caso sua estimativa seja inadequada. Na condição em o afastamento seja muito pequeno, a rocha será lançada a uma distância considerável da face gerando

uma fragmentação fina além de grandes pulsos de ar e ruído excessivo. Já para afastamentos excessivamente grandes poderá ocorrer a emissão de gases nos furos, propiciando ultralançamento do material, uma fragmentação muito grossa e vibração induzida no terreno, causada pela energia sísmica provocada no maciço pela percolação dos gases nas fraturas preexistentes do maciço. (SILVA, 2019)

De acordo com Silva (2019) o cálculo do afastamento é em função do diâmetro dos furos, das características das rochas e dos explosivos utilizados:

Para diâmetros de até 5" (127 mm), utiliza-se:

$$A = 0,0123 \left[ 2 \times \left( \frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times d_e$$

Sendo:

$\rho_e$  = densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>);

$\rho_r$  = densidade da rocha (g/cm<sup>3</sup>);

$d_e$ =diâmetro do explosivo ou diâmetro do furo (mm).

Para diâmetros de furos a partir de 5<sup>1/2</sup>" (140 mm), consideramos a resistência à compressão uniaxial da rocha (UCS ou RC):

- Para rochas duras (UCS > 120 MPa):

$$A = 0,00877 \left[ 2 \times \left( \frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times d_e$$

- Para rochas médias (70 MPa a 120 MPa):

$$A = 0,00967 \left[ 2 \times \left( \frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times d_e$$

- Para rochas macias (UCS < 70 MPa):

$$A = 0,01053 \left[ 2 \times \left( \frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times d_e$$

Silva (2019) também comenta sobre a relação entre o afastamento e a altura da bancada ( $\frac{H_b}{A}$ ), pontuando que, empiricamente, seu valor ótimo é 4, como é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Considerações sobre a relação Hb/A

$\frac{H_b}{A}$	Fragmentação	Onda aérea	Ultrançamento	Vibração	Comentários
1	Ruim	Severa	Severo	Severa	Quebra para trás. Não detonar. Recalcular o plano de fogo.
2	Regular	Regular	Regular	Regular	Recalcular, se possível
3	Boa	Boa	Bom	Boa	Bom controle e boa fragmentação
4	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Não há aumento em benefícios para $\frac{H_b}{A} > 4$

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

#### 2.4.2 Espaçamento

Sendo definido como a distância entre furos da mesma linha, alterações no espaçamento afetarão diretamente da fragmentação da rocha. Caso sejam muito pequenos, irão gerar uma fragmentação muito fina entre os furos e haverá a ocorrência de blocos na frente dos mesmos, ocasionando em repés no piso. Porém, caso sejam muito grandes irão promover fragmentação grossa entre os furos, causando problemas de repés e prejuízos à frente remanescente. (SILVA, 2019).

Novamente considerando a resistência à compressão uniaxial da rocha, temos:

- Para rochas duras (UCS > 120 MPa):

$$E = 1,15 \times A$$

- Para rochas médias (70 Mpa a 120 MPa):

$$E = 1,20 \times A$$

- Para rochas macias (UCS < 70 MPa):

$$E = 1,25 \times A$$

Silva (2019) ressalta novamente a importância do ajuste dos parâmetros com base nos resultados obtidos em campo. Nesse caso, diminuindo o espaçamento até que se atinja o tamanho máximo de fragmento desejado.

### 2.4.3 Subperfuração (S)

Perfuração realizada além da altura da bancada, que tem como intuito a mitigação da formação de repés na praça remanescente. A operação de desmonte sempre tem como objetivo a pouca ou nenhuma formação de repés, pois estes para serem corrigidos demandam os denominados desmontes secundários, aumentando os custos de operação e os riscos para trabalhadores e equipamentos, já que este tipo de desmonte é caracterizado pela grande possibilidade de ocorrência de ultralançamentos. Vale ressaltar também que o superdimensionamento desse parâmetro aumentará os custos de perfuração e vibrações no maciço, além de prejudicar a futura bancada, criando trincas (SILVA, 2019).

Pode ser calculada por:

$$S = 0,3 \times A$$

### 2.4.4 Profundidade do furo (Hf)

Representa a perfuração total, sendo maior que a altura da bancada (Hb) devido à inclinação do furo ( $\alpha$ ) e à subperfuração (S). Calcula-se a profundidade do furo por:

$$Hf = \frac{Hb}{\cos(\alpha)} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \times S$$



#### 2.4.5 Tampão (T)

Representa a parte superior do furo que não será carregada com explosivo e sim com algum material rochoso fragmentado, cujo o objetivo é propiciar o confinamento dos gases que serão gerados na detonação. O tamanho ótimo do material representa 0,05 vezes o diâmetro do furo. Ressalta-se que não é indicada a utilização dos fragmentos de perfuração. (SILVA, 2019). O tampão (T) pode ser calculado por utilizando como base o afastamento (A).:

$$T = 0,7 \times A$$

Silva (2019) pontua que caso haja risco de ultralançamentos em áreas com tráfego de veículos e/ou pessoas, residências, redes elétricas, recomenda-se um tampão maior ou igual ao afastamento:

$$T \geq A$$

#### 2.4.6 Carga de fundo (Hcf)

A rocha se encontra muito mais presa na porção inferior do furo em comparação com a porção superior, exigindo assim a presença de uma carga reforçada no fundo do furo, sendo denominada “carga de fundo”. (SILVA, 2019).

Para calcular a altura da carga de fundo utilizamos:

$$H_{cf} = 0,3 \times (Hf - T)$$

Onde:

$Hf$  = Altura do furo;

$T$  = Tampão.

#### 2.4.7 Carga de coluna (Hcc)

É a carga imediatamente acima da carga de fundo, que possui uma melhor influência na rocha, pois a mesma não se encontra tão presa como na região do fundo do furo.

Pode ser calculada por:

$$H_{cc} = (H_f - T) - H_{cf}$$

#### 2.4.8 Razão de carregamento (RCt)

A Razão de carregamento teórica ou apenas razão de carga representa a quantidade necessária de explosivo para fragmentar 1 metro cúbico ou 1 tonelada de rocha:

$$RC_T = \frac{CT}{v}$$

Em que:

$RC_T = \text{g/m}^3$ ;

$CT = \text{Carga total em um furo (g)}$ ;

$v = \text{Volume desmontado por furo (m}^3\text{)}$ .

ou

$$RC_T = \frac{CT}{\rho_r v}$$

Em que

$RC_T = \text{g/t}$ .

$\rho_r = \text{Densidade da rocha}$

Para calcular a carga total em um furo em gramas, temos a seguinte relação:

$$CT = 0,000785 \times d_e^2 \times \rho_e \times (H_{cf} + H_{cc})$$

Na qual:

$d_e = \text{Diâmetro do explosivo (mm)}$ .

$\rho_e = \text{Densidade do explosivo (g/cm}^3\text{)}$ .

$H_f$  = Altura do furo (m);

Já para calcular o volume, basta utilizar:

$$v = A \times E \times H_b$$

Em que:

$A$  = Afastamento (m).

$E$  = Espaçamento (m).

$H_b$  = Altura da bancada (m);

Silva (2019) apresenta uma relação entre a razão de carga, a resistência à compressão uniaxial e a fragmentação das rochas em caso de utilização do ANFO (Tabela 2) e Emulsão (Tabela 3).

Tabela 2 - ANFO de massa específica 0,85 (g/cm<sup>3</sup>)

Razão de carga (g/m <sup>3</sup> )			
UCS (MPa)	Boa Fragmentação	Média Fragmentação	Pobre Fragmentação
Brandas < 70	300	250	200
Médias 70 – 120	400	350	300
Duras 120 - 180	600	550	500
Muito Duras > 180	1000	900	800

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Tabela 3 - Emulsão de massa específica 1,20 (g/cm<sup>3</sup>)

Razão de carga (g/m <sup>3</sup> )			
UCS (MPa)	Boa Fragmentação	Média Fragmentação	Pobre Fragmentação
Brandas < 70	250	200	150
Médias 70 – 120	350	300	250
Duras 120 - 180	550	500	450
Muito Duras > 180	950	850	750

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

#### **2.4.9 Sequência de acionamento**

A detonação de todos os furos ao mesmo tempo não é recomendada devido a sua grande geração de vibrações no terreno, danificação do maciço remanescente e baixa qualidade de fragmentação. Por esse motivo, utiliza-se um período de tempo (retardo) para se detonar parcelas da carga total. Esses retardos podem ser entre linhas e/ou entre furos

Segundo Silva (2019) os tempos de retardo entre linhas deve variar entre 10 ms (para rochas duras) e 30 ms (para rochas brandas) por cada metro de afastamento. Além disso, é importante considerar o efeito dos tempos entre furos na pilha de rocha desmontada que será formada, na qual tempos curtos formarão pilhas altas e contidas (indicadas caso a lavra seja feita com escavadeiras) e tempos longos, pilhas baixas e espalhadas (ideais para lavra com pás carregadeiras).

Silva (2019) ainda apresenta a possibilidade de uma mesma malha de perfuração apresentar resultados completamente diferentes no desmonte, de acordo com a sequência de acionamento escolhida, também chamada de amarração (Figura 21).

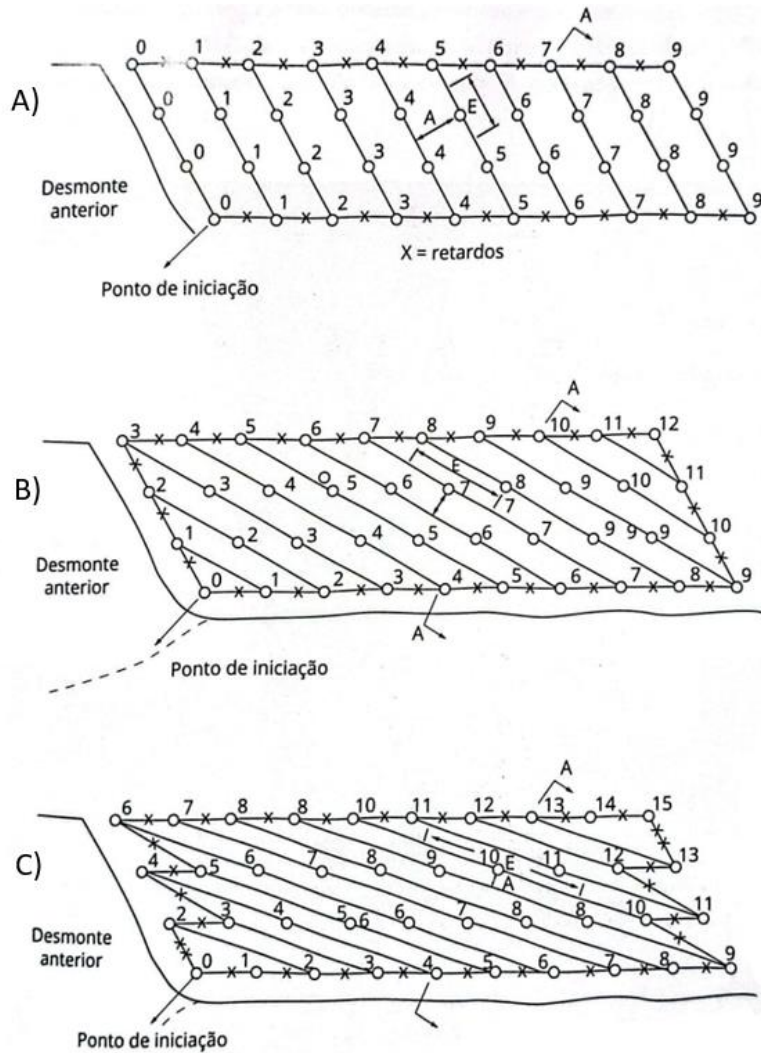


Figura 12 - Possibilidades de amarração para uma mesma malha de perfuração

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Observa-se também pela Figura 21 que a depender dos retardos, os parâmetros de Afastamento e Espaçamento são diretamente afetados, o que também deve ser levado em conta durante o processo de amarração do plano de fogo.

#### 2.4.10 Desmorte escultural

O intuito do desmorte escultural nada mais é do que preservar o talude remanescente do desmorte, visto que danos a essa rocha podem acarretar em condições desfavoráveis de instabilidade. Dentre as técnicas de desmorte escultural desenvolvidas ao longo do tempo destaca-se o pré-corte, uma vez que essa é a mais difundida nas minerações a céu aberto.

Silva (2019) define o pré-corte como uma linha furos de pequeno espaçamento, feitos antes da perfuração da malha principal (Figura 22), que demarcam o limite de escavação desejado. Esses furos serão detonados antes da malha principal, criando uma fissura entre o banco a ser desmontado e o talude que deve ser preservado. Desse modo, quando ocorrer a detonação do banco, as ondas serão capazes de atingir o maciço, devido a separação gerada pela linha de pré-corte.

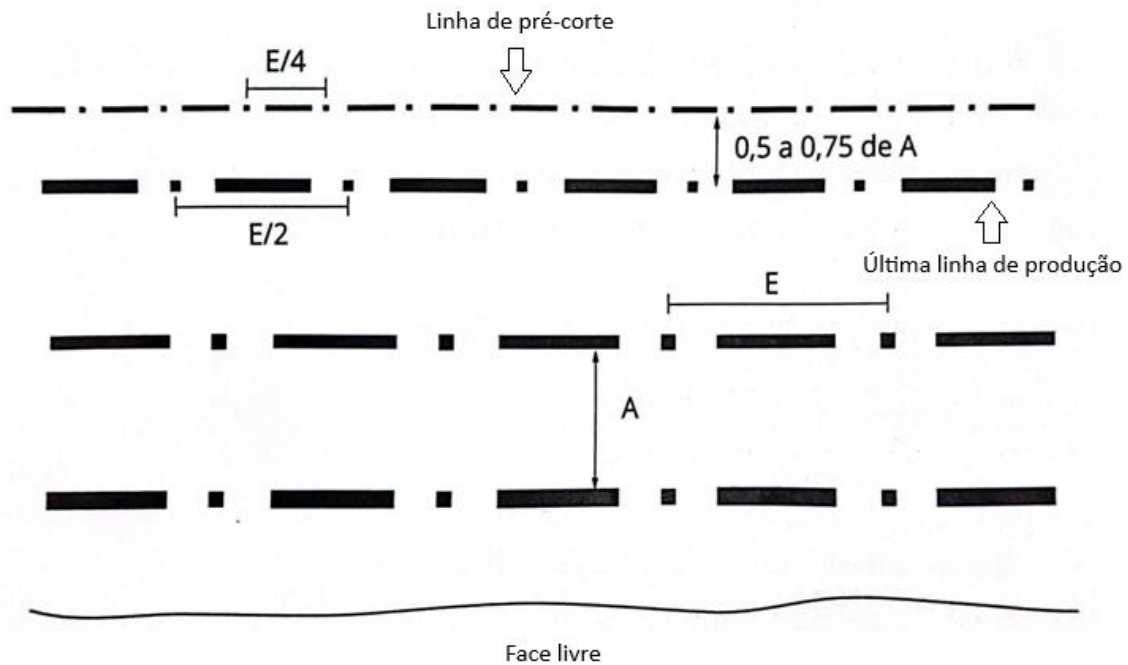


Figura 13 - Esquematização da técnica de pré-corte

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Outro método muito utilizado de desmonte escultural é o chamado *Buffer Blasting*, no português, Desmonte Amortecido. Esse método apresenta uma ideia simples, na qual a última linha tem seu espaçamento afastamento e carregamento reduzidos, sendo sua aplicação associada a outras técnicas. A utilização dessa técnica de desmonte escultural traz grandes benefícios ao talude remanescente, evitando sua quebra excessiva.

## **2.5 Explosivos**

São substâncias químicas que quando submetidas a uma quantidade de energia suficiente, seja em forma de calor, atrito, impacto ou estática, se transformam de forma parcial ou total em gases. Esse processo ocorre em um curto espaço de tempo, proporcionando um aumento repentino de pressão e gera calor. (SILVA, 2019).

Silva (2019) também pontua que essa transformação química pode ser classificada de acordo com a velocidade com que ocorre, sendo este fator de suma importância, pois irá determinar a viabilidade de utilização de um determinado produto:

- Combustão

Reação desencadeada geralmente pelo oxigênio presente no ar, ocorre em baixíssimas velocidades, na ordem de milímetros por segundo. Um exemplo é a queima de um palito de fósforo.

- Deflagração

Ocorre por meio de transferência térmica, tendo a participação tanto do oxigênio do ar, quanto o intrínseco à substância. Pode atingir velocidades de 100 m/s a 1.500 m/s e até 50 Mpa de pressão. Pode ser exemplificado pela queima das pólvoras e de até explosivos mais potentes em condições desfavoráveis.

- Detonação

É uma reação de decomposição da substância explosiva onde há somente a participação do oxigênio presente na mesma. Ocorre em altíssimas velocidades, variando de 2.000 m/s a 10.000 m/s e pressões entre 1,2 GPa e 30 GPa, além de grandes temperaturas, chegando até 5.000 °C.

### **2.5.1 Propriedades dos explosivos**

#### **2.5.1.1 Sensibilidade**

Diz respeito à facilidade com que um explosivo pode ser acionado. Quanto maior a sensibilidade, menor é a energia necessária para que ocorra a detonação.

Por motivos de segurança, grande parte dos explosivos utilizados possuem baixa sensibilidade. Dessa forma, exigem um iniciador para ser detonado. (JIMENO et al, 1987)

Outro ponto pertinente à sensibilidade é o diâmetro crítico de um explosivo, que Jimeno *et al* (1987) define como o diâmetro mínimo para haja a propagação ideal das ondas de detonação. Abaixo desse diâmetro pode ocorrer a propagação limitada ou mesmo a não propagação dessas ondas.

#### **2.5.1.2 Resistência à água**

Jimeno et al. (1987) define a resistência de um explosivo à água como a capacidade de exposição prolongada a mesma sem perder suas características originais. Essa propriedade varia de acordo com a composição do explosivo e pode ser classificada em *Nenhuma, Limitada, Boa, Muito boa e Excelente*. No pior caso (nenhuma), o explosivo perde imediatamente suas características em contato com a água, enquanto no melhor cenário (Excelente), o explosivo pode ter contato com a água por até 12h.

#### **2.5.1.3 Densidade de um explosivo**

Geralmente variando entre 0,8 g/cm<sup>3</sup> e 1,6 g/cm<sup>3</sup>, é uma característica crítica pois afeta diretamente na sensibilidade de um explosivo. Em casos em que a densidade é muito baixa, maior é a sensibilidade do explosivo, podendo acarretar no acionamento indesejado do mesmo. Por outro lado, se muito alta, o agente explosivo pode não ser acionado pelo iniciador. (JIMENO. Et al, 1987)

De acordo com Jimeno et al, 1987, densidade também será um fator determinante a depender da quantidade de carga necessária para o desmonte. Em casos em que mais energia é necessária, explosivos mais densos serão utilizados e vice versa.



#### 2.5.1.4 Força e energia

Segundo Silva (2019) o intuito da utilização de explosivos do desmonte de rochas é a geração de trabalho útil, na qual a energia liberada promove a fragmentação da rocha, gerando calor, luz e vibrações no terreno.

Pode-se definir a força de um explosivo como a energia disponível para gerar efeitos mecânicos. Ao longo do tempo, vários ensaios laboratoriais foram desenvolvidos a fim de se determinar a energia de um explosivo, como por exemplo o teste de Traulz, teste de Força sísmica e o teste de compressão de cilindro, entre outros. Hoje a forma mais difundida de se apresentar a energia de um explosivo é por meio da Energia Relativa em Massa (RWS) ou Energia Relativa em Volume (RBS). (JIMENO et al, 1987).

A Energia Relativa por Massa é expressa em porcentagem e representa a energia de um explosivo em comparação a outro tomado como parâmetro, sendo geralmente o ANFO, considerando a mesma quantidade de massa de ambos. (SILVA, 2019). Podemos calcula-la por meio de:

$$RWS = \frac{ET_x}{ET_p}$$

Em que:

$ET_x$  = Energia termoquímica do explosivo x;

$ET_p$  = Energia termoquímica do explosivo utilizado como parâmetro.

Já a Energia Relativa por Volume, utiliza o mesmo princípio do modelo anterior, porém nesse caso a porcentagem é relativa ao volume dos explosivos que estão sendo comparados:

$$RBS = \frac{ET_x \times \rho_x}{ET_p \times \rho_p}$$

Em que:

$\rho_x$  = Densidade do explosivo x;

$\rho_p$  = Densidade do explosivo utilizado como parâmetro.

### 2.5.1.5 Velocidade e pressão de detonação

Segundo Silva (2019) a velocidade de denotação de um explosivo é o parâmetro mais importante para se estipular o desempenho de um explosivo, já que este índice possui relação direta com a pressão de detonação. A pressão de detonação atua na fase dinâmica da fratura da rocha, na qual a onda de choque produzida pelo explosivo percorre o entorno do furo e, caso seja refletida na face livre com amplitude de tensão superior a resistência à tração do maciço, provocará a fragmentação da rocha.

É possível determinar a velocidade de detonação de um explosivo por meio de testes em campo, utilizando equipamentos, como por exemplo o Microtrap (Figura 11). Conforme acontece a detonação, um cabo previamente introduzido na carga é destruído e o aparelho registra o tempo e a distância até a resistência do cabo chegar a zero. Dessa forma, a velocidade de detonação, em metros por segundo, é calculada.



Figura 14 - Equipamento Microtrap

Fonte: O Autor

A pressão de detonação pode ser calculada pela seguinte relação:

$$Pf = 2,5 \times 10^{-7} \times \rho \times Vd^2$$

Em que:

$Pf$  = Pressão produzida no furo, quando o explosivo se encontra totalmente acoplado no mesmo (GPa);

$\rho$  = Densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>);

$Vd$  = Velocidade de detonação de um explosivo (m/s).

#### 2.5.1.6 Expansão dos gases

O processo de transformação química pelo qual o explosivo passa, intrinsecamente, promove a geração de gases. Esses gases desempenham uma função muito importante para a fragmentação das rochas, atuando na chamada fase semiestática, na qual percolam nas microfissuras e fendas resultantes da fase dinâmica. Esse processo gera trabalho mecânico nas rochas, que percorre as fissuras, destacando blocos preexistentes e lançando-os uns contra os outros. (SILVA, 2019).

É possível então calcular a expansão gasosa pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{V2}{V1} = \frac{22,4 * n}{\frac{MMe}{\rho}} = \frac{22,4 * n * \rho}{MMe}$$

Em que:

$V2$  = Volume do explosivo após a detonação (cm<sup>3</sup>/kg);

$V1$  = Volume inicial do explosivo (cm<sup>3</sup>/kg);

$n$  = Número de mols de gases gerados após a detonação;

$MMe$  = Massa molecular do explosivo (g);

P = Densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>).

## 2.6 Tipos de explosivos

### 2.6.1 ANFO

Sigla derivada de *ammonium nitrate* e *fuel oil*, dá nome ao mais comum entre os explosivos granulados e, como o nome indica, é a mistura entre nitrato de amônio (94,5%) e óleo diesel (5,5%). O ANFO (Figura 12) possui vantagens em comparação a outros explosivos pelo seu baixo custo, volume de gases gerados na reação, sua insensibilidade ao choque e por preencher totalmente o furo. Entretanto, não possui nenhuma resistência à água, possui uma baixa densidade (0,85 g/cm<sup>3</sup>) além de demandar um detonador especial.



Figura 15 - Explosivo ANFO  
Fonte: Disponível em [inertproducts.com](http://inertproducts.com)

## 2.6.2 Emulsão

As emulsões, explosivos do tipo “água em óleo”, recebem esse título por serem constituídas de microgotículas de solução oxidante supersaturada, principalmente o nitrato de amônio, misturada a uma matriz de óleo. Essa composição otimiza o processo de produção, tornando o produto muito competitivo no mercado. No geral, as emulsões (Figura 13) são explosivos com alta velocidade de detonação que apresentam vantagens perante outros explosivos pela sua resistência à água.



Figura 16 - Emulsão explosiva

Fonte: ENAEX

Rodrigues (2018) detalha a composição da emulsão, descrevendo:

- Solução oxidante

Representa geralmente 90% do peso total do explosivo e tem como intuito compor a fase dispersa da emulsão explosiva e fornecer o oxidante, este necessário para a reação de oxidação-redução cuja a energia liberada gera trabalho mecânico.

- Mistura de óleos

Constituída por óleo e agentes emulsificantes cuja principal função é formar a fase contínua da emulsão explosiva. Os óleos devem possuir resistência à água, ser tanto agente de combustão, quanto sensibilizante, além de apresentar boa segurança. Rodrigues (2018) também pontua que os agentes emulsificantes “devem impedir a coalescência de gotas recém-formadas e devem diminuir a tensão

interfacial, reduzindo a pressão, o que implica que o stress necessário para quebrar uma gotícula é reduzido”.

- Sensibilizante

Tem como finalidade modificar a massa volumétrica da emulsão, podendo ser microbolhas de gás, agentes químicos (solução de nitrito de sódio) ou partículas sólidas com gás retido no seu interior.

Geralmente no processo de transporte as emulsões se encontram dessensibilizadas por questões de segurança, recebendo a adição destes compostos apenas durante a operação de carregamento.

## **2.7 Acessórios**

Silva (2019) define os acessórios como “dispositivos empregados para iniciar cargas explosivas, bem como fornecer e transmitir energia para a iniciação dessas cargas”. Por motivos de segurança no transporte e armazenamento, os explosivos utilizados em maiores quantidades na operação possuem baixa sensibilidade, necessitando assim de uma energia considerável para serem iniciados. Nesse contexto, surgem os chamados “acessórios”, que irão promover essa energia, além de proporcionar maior segurança e precisão à operação de desmonte de rochas.

### **2.7.1 Espoleta comum**

Foi concebida por William Bickford na Inglaterra, em meados de 1830 para ser utilizada na mineração. Consiste de um tubo de alumínio ou cobre com uma extremidade aberta e outra fechada (Figura 14). Contém em seu interior uma carga explosiva primária, sendo composta por azida de chumbo, explosivo com alta sensibilidade, podendo ser acionado por uma fagulha e outra carga secundária composta por PETN. É associada a um estopim de segurança, composto por um núcleo de pólvora negra, queimando à velocidade de 1 metro a cada 140 segundos, com erro de 10 segundos.



Figura 17 - Espoleta comum

Fonte: ENAEX

Seu funcionamento consiste da fagulha proporcionada pelo estopim de segurança acionando a azida de chumbo, que por sua vez detonará a carga de PETN (Figura 15). Vale lembrar que, por questões de segurança, são utilizadas pequenas quantidades desses explosivos na composição da espoleta.

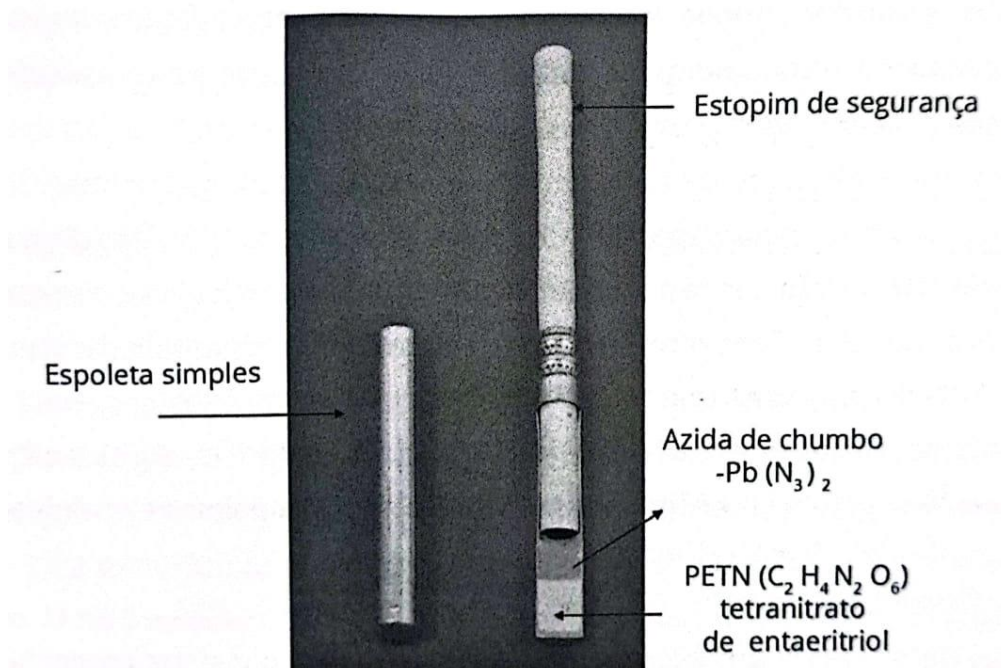


Figura 18 - Sistema de iniciação da Espoleta Simples.

Fonte: SILVA (2019)



Existem vários tipos de espoletas vendidas comercialmente, sendo as mais comuns do tipo nº 6 e nº 8, se diferenciando nas quantidades de massa dos explosivos componentes.

### 2.7.2 Detonadores não-elétricos

Consistem de uma espoleta comum anexada a um tubo de alta resistência (Figura 16), transparente, com carga interna de PETN (geralmente 20 mg/m). Quando acionada a PETN, o calor e a expansão dos gases geram uma onda de choque interna, que inicia instantaneamente a espoleta, que por sua vez aciona a carga explosiva principal. Apresenta grandes vantagens perante outros acessórios comerciais, como por exemplo seu baixo ruído, insensibilidade a correntes elétricas, possibilidade de acionamento pontual e o fato de seu tubo não acionar explosivos comerciais. (Silva, 2019).



Figura 19 - Detonador não elétrico comercializado pela ENAEX (Brinel)

Fonte: ENAEX

### 2.7.3 Detonadores eletrônicos

O detonador eletrônico (Figura 17) é uma espoleta acionada eletronicamente, cujo o tempo de detonação (retardo) é programado de forma rápida e prática em cada espoleta individualmente. É o que se tem de mais avançado no âmbito de acessórios



de detonação, proporcionando um maior controle para os responsáveis pela operação de desmonte devido a sua altíssima precisão de acionamento, o que praticamente elimina a possibilidade de detonação de furos ao mesmo tempo. Outra vantagem da espoleta eletrônica é proporcionar um número praticamente ilimitado de desenhos para a amarração do plano de fogo, dando margem criativa para os engenheiros e blasters, na qual poderão desenvolver o projeto da melhor forma possível, de acordo com as especificidades de cada desmonte. (Silva, 2019).



Figura 20 - Espoleta eletrônica comercializada pela ENAEX (Daveytronic)

Fonte: ENAEX

Possuem um capacitor e chip interno que registra o tempo de iniciação programado. No momento do disparo (Figura 18) o capacitor descarrega sua energia no tempo armazenado no chip, iniciando a espoleta. Cada espoleta eletrônica possui um ID único de fábrica, o que intensifica ainda mais a robustez de suas barreiras de segurança.



Figura 21 - Disparo de fogo, utilizando o sistema de iniciação eletrônica

Fonte: O autor

Os detonadores eletrônicos são o que se tem de melhor atualmente no mercado. Isso se dá ao fato de que apresentam melhor eficiência na fragmentação, menores níveis de vibração, menor ruído e, principalmente, maior segurança para a operação.

#### **2.7.4 Reforçadores (Boosters)**

O booster é uma carga explosiva de grande velocidade de detonação (7000 m/s) e RWS de 128% em relação ao ANFO, utilizada para acionar explosivos comerciais que possuem baixa sensibilidade como a emulsão e o ANFO. É composto por TNT e nitropenta (em proporção de 1 para 1 em massa). Seu acionamento é feito por uma espoleta nº 8. Comercialmente são vendidos boosters de variados diâmetros (entre 38mm e 87,7mm) e pesos (de 150g a 900g), sendo muito versáteis a vários tipos de operação de desmonte.



Figura 22 - Reforçador comercializado pela ENAEX (X-Booster 450)

Fonte: ENAEX

Muitas vezes detonadores não elétricos são utilizados em conjunto com detonadores eletrônicos no acionamento dos boosters (Figura 20), funcionando como backup caso ocorra algum mal funcionamento (perda de comunicação) da espoleta eletrônica. Dessa forma, evita-se a ocorrência de minas vivas (furos cuja carga principal não foi detonada com o disparo de fogo).



Figura 23 - Kit de acessórios utilizados em cada furo. (Da esquerda para a direita) Reforçador, detonador eletrônico, detonador não elétrico.

Fonte: O autor

## 2.8 Análise granulométrica

O produto do desmonte de rochas é a pilha de material desmontado. Desse modo, comumente toma-se a avaliação da aderência da granulometria dessa pilha, de acordo com as especificações tanto da lavra quanto da britagem, como uma forma de avaliar a qualidade desse desmonte. A partir disso, se faz pertinente a execução estudos e levantamentos em campo da curva de distribuição granulométrica do material.

O principal método utilizado atualmente baseia-se na análise de fotos representativas da pilha por meio de softwares, entre os quais o Wipfrag é o mais difundido nas minerações (Figura 23). O software demanda um referencial de tamanho conhecido (pode ser um pontalete como na Figura 22 ou bolas de isopor) e por meio da demarcação do contorno dos blocos e a comparação com o tamanho do referencial, será produzida a curva granulométrica. Quando maior o número de imagens analisadas, mais preciso será o levantamento. Recomenda-se, também, fotos em períodos diferentes da lavra, pois comumente o material mais grosso se acumula na região superior da pilha e o fino na parte inferior.

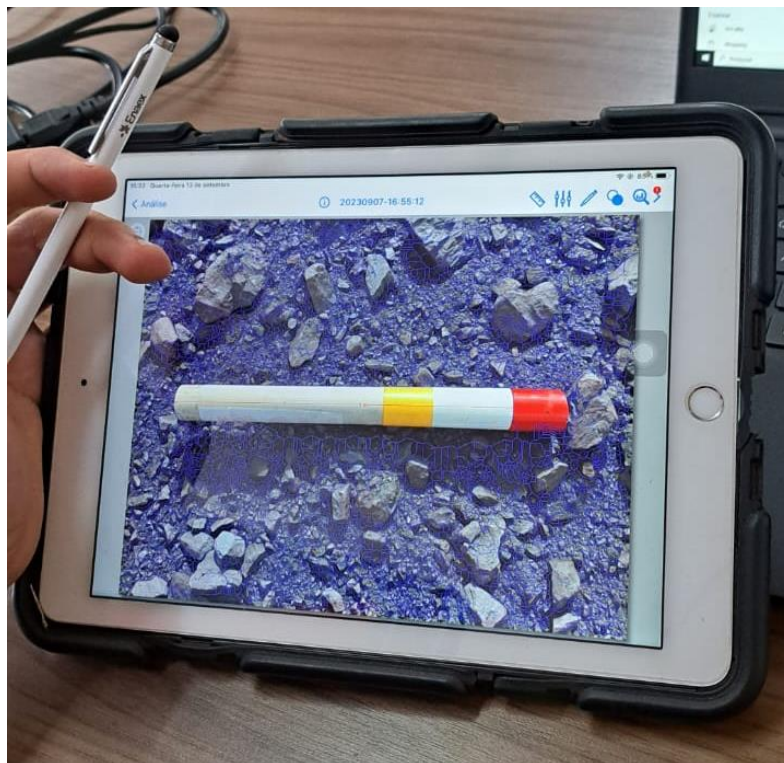


Figura 24 - Operação do Software WipFrag

Fonte: O autor



Esse tipo de levantamento apresenta imprecisões quanto ao tamanho das partículas, por depender da habilidade de quem o conduz, tanto na coleta das fotos, quanto na demarcação dos contornos dos blocos. Além disso, expõe o colaborador a uma situação de risco, na qual este terá de se locomover em uma pilha, por vezes instável, de material desmontado (Figura 24).



Figura 25 - Realização de levantamento para análise granulométrica em pilha desmontada.

Fonte: O autor

Pelas desvantagens supracitadas se fez conveniente o desenvolvimento de outros modelos de levantamentos, sendo pertinente citar a análise granulométrica executada por meio de veículos aéreos não tripulados (Drones), no qual a coleta das imagens é feita a distância. Esse tipo de estudo vem ganhando espaço nas minerações pela sua facilidade de execução, alta precisão de resultados e agilidade, por não demandar nenhum tipo de tratamento das imagens.

O software Strayos recebe as fotos aéreas, todas georreferenciadas pelo GPS do drone e, por meio de inteligência artificial, modela e analisa a pilha desmontada. A partir disso, gera-se, de forma automática, o relatório de análise granulométrica (Figura 25).

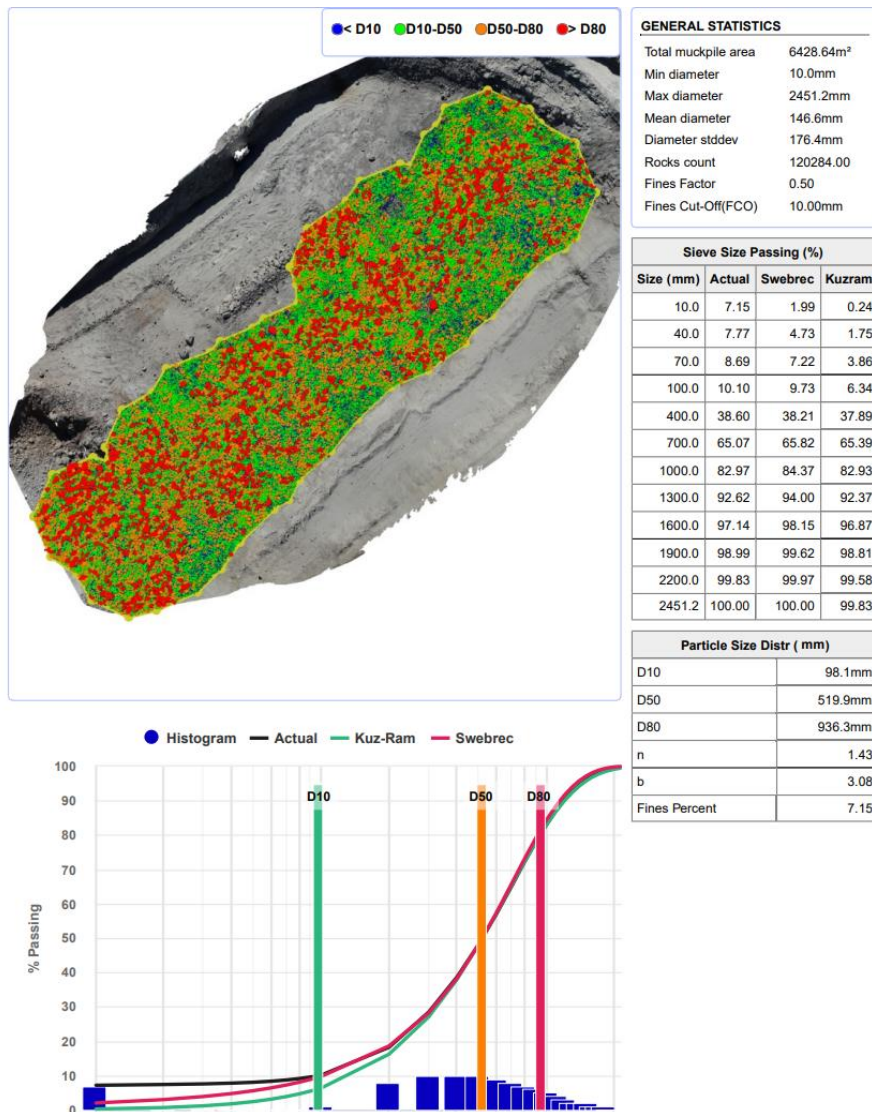


Figura 26 - Relatório granulométrico gerado pelo Strayos.

Fonte: O autor

### 2.8.1 Simulação de curva granulométrica

Ao longo dos anos diversos autores se dedicaram a estudar e propor modelos matemáticos que descrevem a interação entre a rocha e o explosivo. Dentre esses modelos se destacam o modelo de Kuz-Ram e TCM. A principal finalidade desses modelos é a previsão da curva granulométrica da pilha detonada, sendo possível ajustar os parâmetros do plano de fogo e assim atingir a granulometria desejada. (MORAIS et al, 2004).

O modelo de Kuz-Ram é definido pela seguinte equação:

$$R = 1 - e^{-0,693 \left( \frac{x}{x_{50}} \right)^n}$$

Em que:

$X$  = Diâmetro da fragmentação da rocha (cm);

$n$  = índice de uniformidade;

$R$  = Fração da massa menor do que  $X$  (%).

$$X_{50} = FR \times K^{-8} \times Q^{0,167} \times \left(\frac{115}{E}\right)^{0,633}$$

Em que:

$FR$  = Fator de rocha;

$X$  = Tamanho médio dos fragmentos;

$K$  = Razão de carga;

$Q$  = massa do explosivo;

$E$  = energia relativa do explosivo em massa.

Pode-se calcular o índice de uniformidade  $n$  por meio da relação desenvolvida por Cunningham:

$$n = \left(2,2 - 14 \times \frac{A}{D}\right) \left(\frac{1 + \frac{E}{A}}{2}\right)^{0,5} \times \left(1 - \frac{W}{A}\right) \times \left[\frac{\text{abs}(CCF - CCC)}{L} + 0,1\right]^{0,1} \times \left(\frac{L}{H}\right)$$

Em que:

$A$  = Afastamento (m);

$E$  = Espaçamento (m);

$D$  = Diâmetro do furo (m);

$W$  = Desvio padrão da perfuração (m);

$L$  = Comprimento da carga de explosivos (m);

$H$  = Altura do banco (m);

$CCF$  = Comprimento da carga de fundo (m);

$CCC$  = Comprimento da carga de coluna (m);

$\text{abs}$  = Valor absoluto.

O modelo TCM foi criado com o intuito de se obter uma maior precisão quanto a fração de finos presente na pilha desmontada, finos estes originados principalmente da rocha mais próxima dos furos, que recebe mais energia proveniente do explosivo (rompida por meio de forças compressivas e cisalhantes). A fração mais grossa da curva representa a rocha mais distante do furo, fragmentada por forças de tração.

Dessa forma foi definida a massa fragmentada por forças compressivas-cisalhantes como:

$$F_c = \frac{M_0}{M}$$

Onde:

$M_0$  = massa de rocha fragmentada por compressão/cisalhamento;

$M$  = massa total por furo.

Sendo assim a fração de material fragmentada por forças de tração é definida por  $1 - F_c$ .

As frações passantes então são representadas de forma distinta, tendo-se para os percentuais passantes na peneira de tamanho ( $x$ ) para as regiões de ruptura por compressão e tração:

- Ruptura por compressão:

$$P_1 = 100 x \left( 1 - e^{-0,693 \left( \frac{x}{c} \right)^d} \right)$$

- Ruptura por tração:

$$P_2 = 100 x \left( 1 - e^{-0,693 \left( \frac{x}{c} \right)^b} \right)$$

Onde:

$c$  = tamanho médio de fragmento na primeira região (ruptura por compressão);

$d$  = coeficiente de uniformidade da primeira distribuição de tamanho de fragmentos;

$a$  = representa o tamanho médio de fragmento na segunda região (ruptura por tração);



b = coeficiente de uniformidade da segunda distribuição de tamanho de fragmentos.

É possível representar a distribuição de tamanho dos fragmentos da massa total somando-se as duas funções (Fc e (1 - Fc)), obtendo-se:

$$P1 = 100 x \left[ \left( 1 - (1 - Fc) x e^{-0,693 \left( \frac{x}{a} \right)^b} \right) - (Fc) x e^{-0,693 \left( \frac{x}{c} \right)^d} \right]$$

Moraes, *et al* (2004) comparou em seu estudo os modelos de fragmentação de KUZ-RAM e TCM e citando Djordjevic (1999) aponta que o modelo de KUZ-RAM subestima, consideravelmente, a fração de finos do desmonte simulado em comparação ao modelo TCM. Nos casos de fatores de rocha elevados (rochas mais competentes), cenário no qual ambos os modelos apresentam um comportamento similar.

Para o presente trabalho, foi implementado no software o modelo de fragmentação de Kuz-Ram.

### 3 METODOLOGIA

É possível sintetizar de forma generalizada o processo de elaboração de um projeto de perfuração e desmonte de rochas em um ciclo de atividades que tende a se repetir sempre que um novo empreendimento minerário é iniciado (Figura 26).

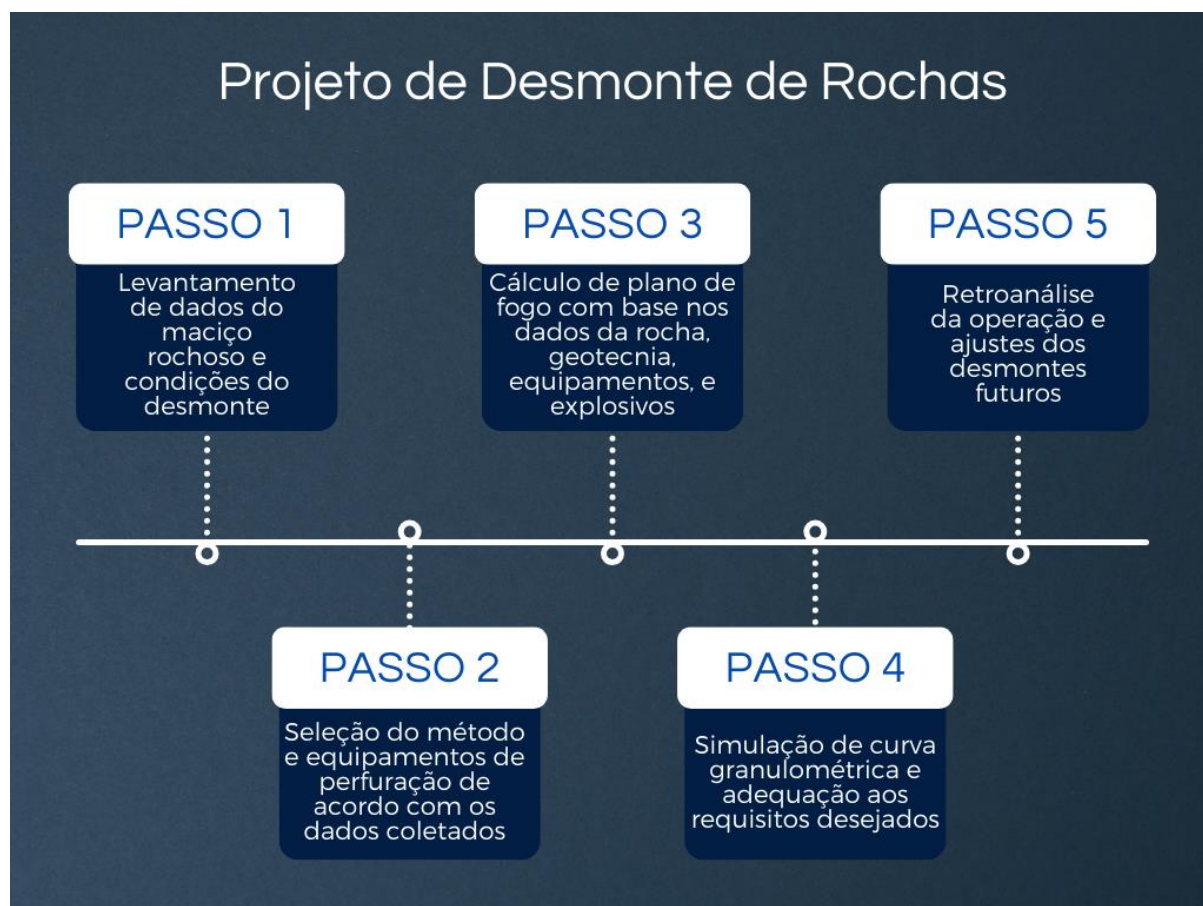


Figura 27 - Representação gráfica do desenvolvimento de projeto de Desmonte de Rochas

Fonte: O Autor

A etapa de levantamento de dados acerca do maciço geralmente é realizada nas fases iniciais do projeto pela equipe de geologia. Dados como a densidade da rocha, resistência à compressão uniaxial e características das discontinuidades são descritas. É importante que esse estudo seja feito de forma assertiva, pois seus efeitos serão significativos em todas as etapas subsequentes.

O dimensionamento e seleção de equipamentos estão alinhados diretamente com os dados geológicos obtidos e com a expectativa de produção ao longo da vida útil da mina. Dessa forma, obtém-se alta assertividade por impactar diretamente tanto nos custos iniciais, quanto nos operacionais.

Conforme abordado no referencial teórico, é possível por meio de fórmulas presentes na literatura, desenvolver um plano de fogo preliminar, com base nas características da rocha intacta e do explosivo a ser utilizado. O processo de seleção do explosivo também deve ser feito de forma minuciosa para que os objetivos do desmonte sejam alcançados com a maior segurança e o menor custo possível. A utilização de ferramentas de simulação também se faz muito pertinente, possibilitando uma análise quantitativa teórica inicial do desmonte, meio através do qual é possível verificar de forma individual o impacto dos parâmetros geométricos no custo e na fragmentação da rocha.

Realizadas tais etapas e executado o desmonte, é conduzida uma avaliação e retroanálise, a fim de checar a aderência do desmonte ao planejamento teórico inicial. Caso sejam necessárias adequações, estas são realizadas no plano de fogo, até que todas as metas sejam contempladas. Dessa forma, um ciclo operacional é desenvolvido.

### **3.1 Cenários estudados**

O trabalho em questão utilizou os dados publicados por Jaques (2014) em seu trabalho de mestrado, no qual os maciços rochosos da mina de Volta Grande, localizada no município de Nazareno, foram caracterizados e classificados de acordo com suas características geológicas e geomecânicas. A mina é particularizada por uma intrusão granítica em um maciço encaixante de anfíbolito. A intrusão é chamada no referenciado estudo de “Corpo A”, possui espessura que pode chegar a 40 metros e mergulho de 10 a 30 graus.

Em sua dissertação, Jaques (2014) separa as ocorrências pegmatíticas no Corpo A em dois grupos distintos, sendo eles Pegmatito grosseiro e fraturado e Pegmatito fino, estes apresentando diferenças consideráveis em seus parâmetros pertinentes ao dimensionamento do desmonte, o que justifica um estudo individual para cada grupo.

### **3.2 Método de perfuração**

O método de perfuração foi definido com base no ábaco apresentado à literatura por Silva (2019), no qual, como na resistência à compressão uniaxial da rocha, pull-down (pressão de avanço), e no diâmetro de furo desejado, é possível determinar dentre os três métodos de perfuração, qual utilizar.

### **3.3 Cálculo do plano de fogo e simulação de curva granulométrica**

Os planos de fogo foram calculados para os dois cenários, variando o explosivo utilizado entre ANFO e Emulsão, a altura da bancada em 6, 10 e 15 metros e utilizando diâmetros de perfuração de 3, 5 e 7 polegadas (76,2 mm, 127 mm e 178 mm, respectivamente). Os parâmetros técnicos dos explosivos como RWS e densidade foram obtidos por meio do portfólio de produtos da empresa ENAEX.

Já para as simulações das curvas granulométricas teóricas foi utilizado o modelo de KUZ-RAM, que requisita, como dados de entrada, os parâmetros geométricos do plano de fogo, dados do maciço rochoso e dados do explosivo a ser utilizado.

### **3.4 Desenvolvimento do simulador**

Para a execução das simulações dos cenários propostos foi elaborado um software para cálculo automatizado dos planos de fogo e distribuição granulométrica. Utilizou-se o ambiente de desenvolvimento integrado (Integrated Development Environment = IDE) Lazarus (Figura 27) que emprega a linguagem de programação Pascal.

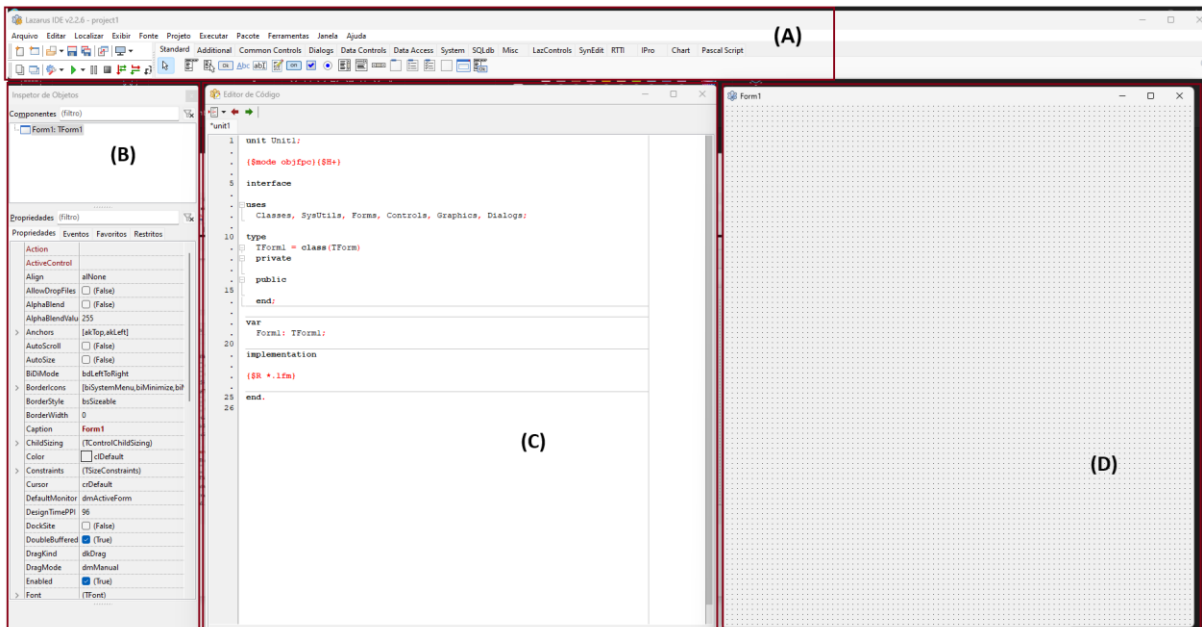


Figura 28 - Interface da IDE Lazarus. (A) Barra de ferramentas, (B) Inspetor de objetos, (C) Editor de código, (D) Formulário

O software (Figura 28) recebe como entrada de dados do usuário a altura da bancada, o diâmetro do furo, densidade e resistência da rocha, densidade e RWS do explosivo, desvio padrão da perfuração e dados referentes ao maciço rochoso.

**Entrada de dados:**

Altura da Bancada (m):

Diâmetro (mm):

Resistência da rocha(MPa):

Densidade do Explosivo (g/cm³):

Densidade da rocha (g/cm³):

RWS do Explosivo:

RMD:

JPS:

JPA:

Módulo de Young (E):

Desvio padrão do furo (m):

**Variáveis geométricas:**

Afastamento(m) :

Espaçamento(m):

Superfuração (m):

Tampão (m):

Altura da carga de fundo (m):

Razão de Carga Teórica (g/t):

Carga por Furo (Kg):

**Cálculo do Fator de Rocha (A):**

Fator de Rocha (A):

**Cálculo do índice de uniformidade (n):**

Índice n:

**Cálculo do X50:**

X50 (cm):

**% DE PASSANTES**

TAMANHO (m)

Figura 29 - Interface do Simulador

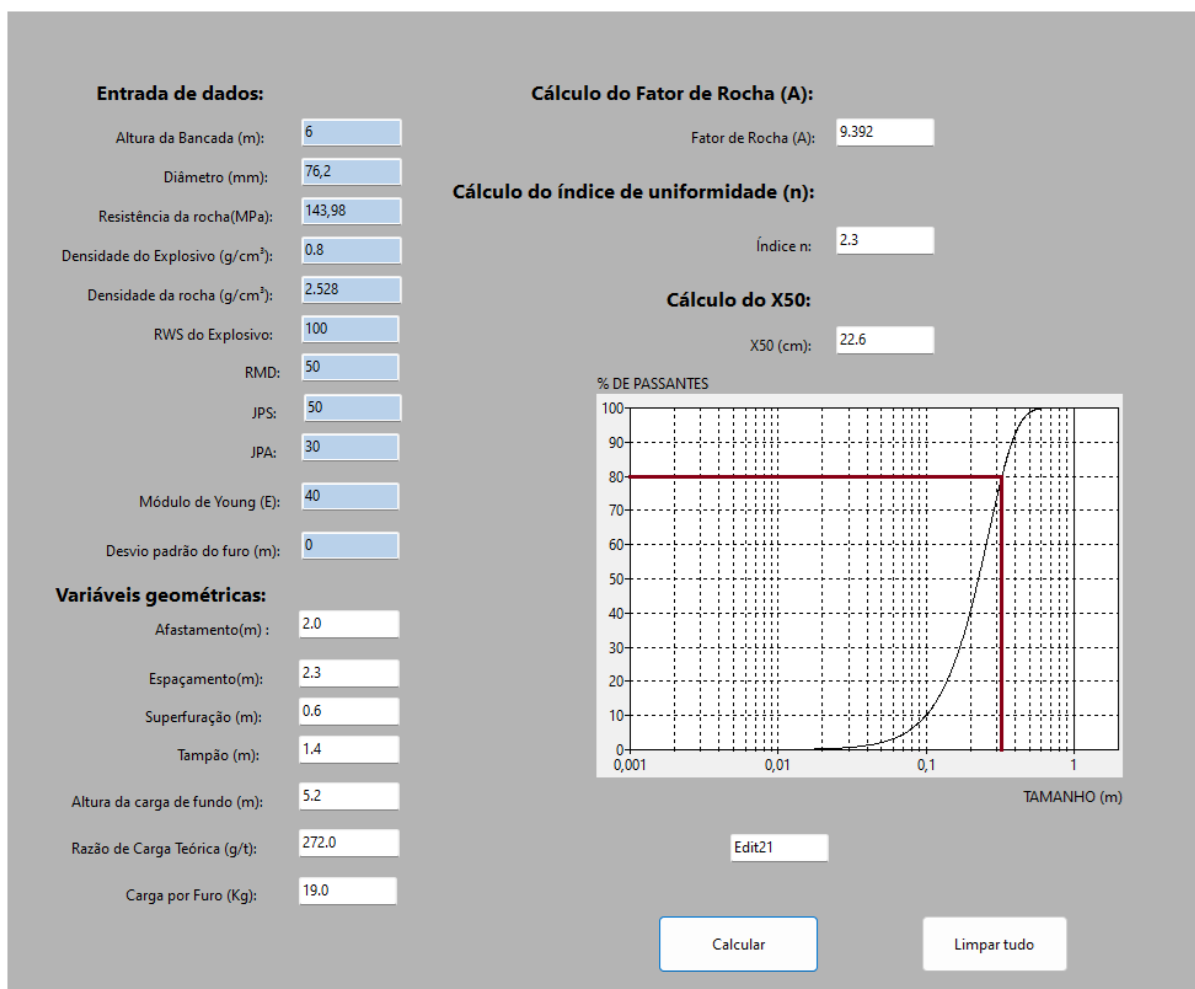


Figura 30 - Exemplo de simulação

Os dados de interesse para fins de análise foram o P80 (tamanho correspondente a 80% do material passante), a razão de carga, a massa de explosivo em cada furo, a área da malha e a porcentagem de material menor que 10 cm, que, neste trabalho, representará a fração de finos. O valor de 10 cm para avaliação de finos se deve exatamente à tendência do modelo de Kuz-Ram em subestimar a fração de finos. Dessa forma, a avaliação desse parâmetro se deu em uma faixa mais ampla para que a comparação entre os cenários seja possível. Considerou-se como premissa que os valores reais provavelmente serão superiores aos registrados na simulação.

Realizou-se uma análise de custos qualitativa preliminar com base na razão de carga e na área da malha dos planos de fogo. Maiores valores de razão de carga representam maiores custos com explosivo, ao passo que malhas mais fechadas (mais furos em cada polígono), representam maiores custos de perfuração e de acessórios.

## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 Dados de cada cenário

Para que as simulações sejam executadas as fórmulas empíricas para cálculo do plano de fogo e o modelo de Kuz-Ram demandam uma série de dados referentes ao maciço a ser desmontado. Nesse capítulo, serão apresentados os dados utilizados assim como a justificativa para a utilização de alguns. O trabalho por seu caráter teórico, considera muitas vezes uma conjuntura utópica, com valores ideais e sem imprecisões operacionais.

#### 4.1.1 Densidade da rocha

Jaques (2014) apresenta na Tabela 4 contendo dados referentes a massa específica das litologias presentes na mina de Volta Grande. Em azul estão representadas as litologias pegmatíticas a serem estudadas.

Tabela 4 - Massa específica das litologias da Mina de Volta Grande

Litotipo	*Grau de alteração	Massa específica kg/m <sup>3</sup>		Porosidade (%)	Absorção (%)
		Seca	Saturada		
Anfibolito	A1	3061	3062	0,09	0,03
Anfibolito	A2/3	2874	2908	3,41	1,19
Anfibolito quartzoso	A1	2949	2959	0,96	0,33
<b>Pegmatito grosseiro e fraturado</b>	<b>A1</b>	<b>2586</b>	<b>2595</b>	<b>0,87</b>	<b>0,34</b>
<b>Pegmatito fino</b>	<b>A1</b>	<b>2528</b>	<b>2557</b>	<b>2,89</b>	<b>1,14</b>
<b>Pegmatito fino</b>	<b>A2/3</b>	<b>2739</b>	<b>2769</b>	<b>3,02</b>	<b>1,10</b>
<b>Pegmatito fino</b>	<b>A3</b>	<b>2514</b>	<b>2565</b>	<b>5,09</b>	<b>2,02</b>
Xisto Grafítico	A2	2854	2880	2,61	0,91

\*ISRM(2007).

Fonte: Adaptado de JAQUES (2014)

Dessa forma, temos que para o Cenário A – Pegmatito Grosseiro e Fraturado uma massa específica seca de 2586 kg/m<sup>3</sup>, representando uma densidade de 2,586

g/cm<sup>3</sup>. Já para o Cenário B – Pegmatito fino, por conta dos diferentes graus de alteração dessa ocorrência, a massa específica seca variou em 3 diferentes valores: 2528, 2739, 2514 kg/m<sup>3</sup>. Sendo assim, o valor considerado foi 2594 kg/m<sup>3</sup>, sendo a média entre os três. A densidade da rocha para o Cenário B então foi de 2,594 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.2 Resistência da rocha

Obtida por meio de uma tabela contendo os valores médios de resistência a compressão uniaxial das litologias. Em azul, as resistências das rochas dos cenários A e B, respectivamente

Tabela 5 - Resistência a Compressão Uniaxial das Litologias

Litotipo	Grau de alteração*	$\sigma$ médio (MPa)	Número de amostras ensaiadas	Desvio-padrão
Anfibolito	A1	310,49	4	18,95
Anfibolito quartzoso	A1	146,93	5	25,75
Pegmatito grosseiro e fraturado	A1	90,46	3	25,94
Pegmatito fino	A1	143,98	4	32,43
Xisto grafitoso	A2	39,65	3	5,45

Fonte: Adaptado de JAQUES (2014)

#### 4.1.3 Fator de rocha

Uma das principais variáveis do modelo de KUZ-RAM é o Fator de rocha, estando relacionada diretamente ao cálculo do X50 ou tamanho médio dos fragmentos. O fator de rocha é calculado pela seguinte relação:

$$FR = 0,06 \times (RMD + JF + RDI + HF)$$

O valor das variáveis é dado pela tabela:



Tabela 6 - Variáveis para o cálculo do fator de rocha

Símb.	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Maciço rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Overize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção e mergulho com relação à face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm <sup>3</sup> )	RDI = 25d - 50	
HF	se E < 50 GPa	HF = E/3	
	se E > 50 GPa	HF = UCS/5	
E	Módulo de Young (GPa)		
UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)		

O valor de HF é obtido com base no Módulo de Young, este que foi obtido por meio da relação com o RMR do maciço, apresentado no trabalho de Santos (2015), em que:

$$Em = 2RMR - 100$$

Para maciços de RMR superiores a 50, e:

$$EM = 10 \times \frac{RMR - 10}{40}$$

Para maciços com RMR inferiores a 50.

Jaques (2014) apresenta na Figura 32 as classes de RMR presentes nas litologias da Mina de Volta Grande:

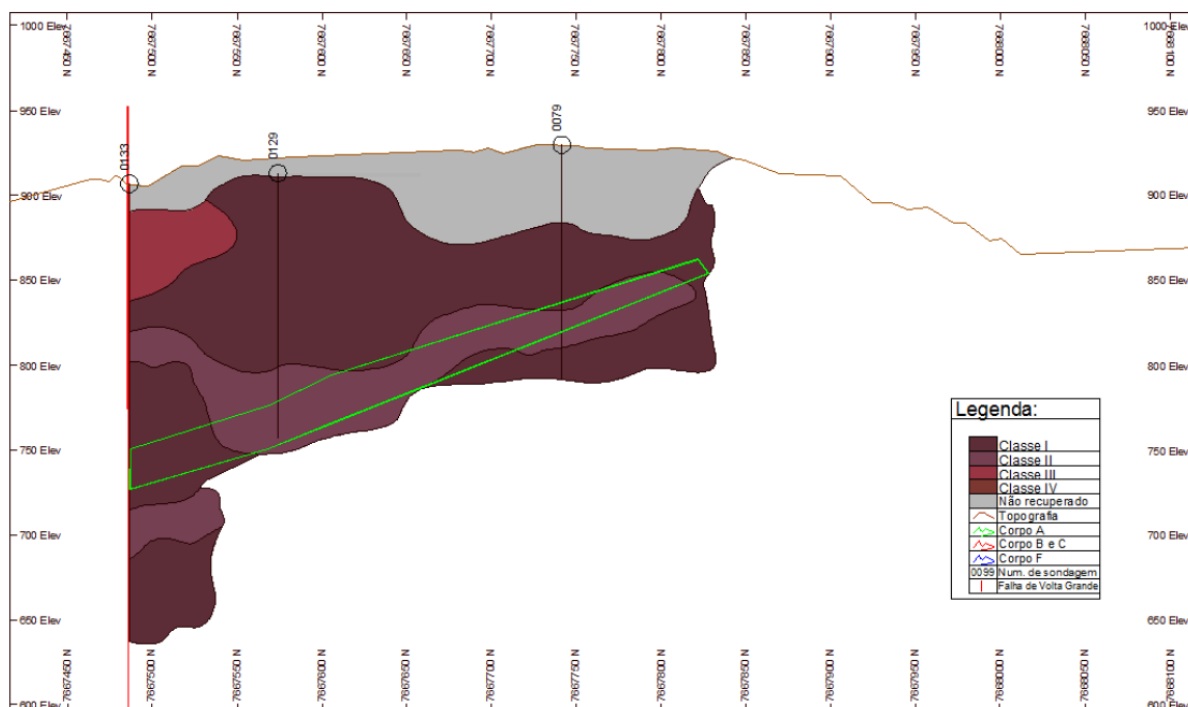


Figura 31 - Classes de RMR das litologias

Fonte: Jaques (2014)

Observa-se que no Corpo A existe a predominância da Classe 2 de RMR, que varia em valores de 61 a 80 de RMR. Dessa forma, o valor médio de 70 foi considerado para o estudo.

Com o RMR de 70, o Módulo de Young do corpo A foi estimado em 40 GPa.

A Tabela apresenta os valores considerados em cada cenário:

Tabela 7 - Valores utilizados para o cálculo do fator de rocha

DADOS	Litologias pegmatíticas	
	Cenário A (Pegmatito grosseiro e fraturado)	Cenário B (Pegmatito fino)
UCS (MPa)	90,46	143,98
Densidade da rocha (g/cm <sup>3</sup> )	2,586	2,528
RMD	80 (JPS+JPA)	50
JPS	50	50
JPA	30	30
Módulo de Young (GPa)	40	40
RDI	14,65	13,2
HF	13,3	13,3
Fator de Rocha	11,279	9,39

## 4.2 Características dos explosivos

A ENAEX apresenta uma grande variedade de produtos em seu portfólio, oferecendo flexibilidade em diversas aplicações, tanto na mineração, quanto na construção civil. Para o estudo em questão, foram utilizados os produtos Ibemux e Anfomax.

O Ibemux é uma emulsão de alta velocidade de detonação e alta resistência à água. Sua iniciação recomendada é por meio de Booster e seu diâmetro crítico é de 2”.

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,90 a 1,25
Velocidade de detonação típica* (m/s)	4.800
Volume de gases (L/kg)	990
RWS** (%)	93
RBS** (%)	169
Resistência à água	Muito resistente

\*A VOD real depende das condições de uso, incluindo a densidade do explosivo e o grau de confinamento. Os valores adotados referem-se a testes com o produto não confinado.

\*\*Comparados ao ANFO padrão.

Figura 32 – Ficha técnica do Ibemux

Fonte: ENAEX

Já o Anfomax, a base de nitrato de amônio, possui baixa densidade, baixa sensibilidade, que garante grande segurança em seu transporte, e baixa resistência à água. Sua iniciação recomendada é por meio de booster ou emulsão encartuchada e sua velocidade de detonação varia de acordo com o diâmetro da carga, sendo seu diâmetro crítico de 1,75 polegada.

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,8
Velocidade de detonação mínima* (m/s)	2.900
Volume de gases (L/kg)	990
RWS** (%)	100
RBS** (%)	100
Resistência à água	Não resistente
Estado físico	Granulado sólido

\*A VOD real depende das condições de uso, incluindo a densidade do explosivo e o grau de confinamento. Os valores adotados referem-se a testes com o produto não confinado.

\*\*Comparado ao ANFO padrão.

Figura 33 - Ficha técnica do Anfomax

Fonte: ENAEX

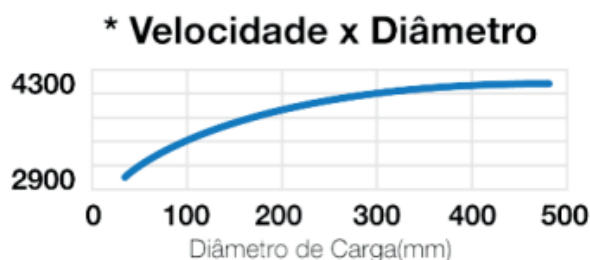


Figura 34 - Relação entre o diâmetro da carga e velocidade de detonação do Anfomax

Fonte: ENAEX

### 4.3 Condições das simulações

As simulações foram executadas considerando um cenário em que a velocidade de detonação efetiva dos explosivos é igual a velocidade de detonação nominal, não havendo perdas. Também não foram considerados furos inclinados nas simulações. O modelo de Kuz-Ram demanda o desvio padrão da perfuração em seu cálculo, exigindo assim um banco de dados prévio, dessa forma, não foram considerados desvios de perfuração.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Método de perfuração

A Figura apresenta a interseção entre a resistência à compressão uniaxial em cada cenário e os diâmetros de furo simulados:

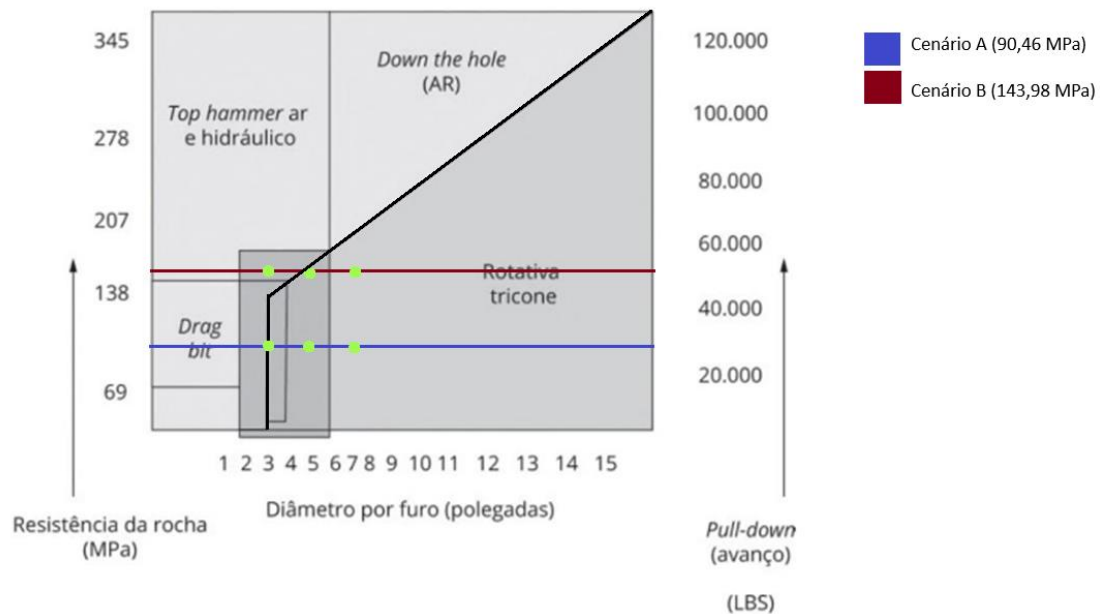


Figura 35 - Cenários simulados no ábaco de perfuração

Fonte: O Autor

Observa-se que para a grande maioria dos casos a perfuração pelo método Rotativo seria indicado, com exceção do Cenário B para furos de 3 polegadas, sendo indicada a perfuração pelo método de Martelo de Superfície. Para furos de 5 polegadas, observa-se que o cenário B se encontra em uma região de fronteira entre método de martelo de superfície e Rotativo, enquanto que o para o Cenário A, a perfuração rotativa é ideal. Já para furos de 7 polegadas, independentemente do cenário, a perfuração rotativa é recomendada.

Ainda assim, os resultados apresentam pouca dispersão, se concentrando em uma região intermediária do ábaco.

## 5.2 Resultados das simulações

Ao todo, somaram-se 36 cenários diferentes simulados, os dados obtidos foram armazenados na Tabela e posteriormente foram criadas dashboards para a análise de dados utilizando o software Power Bi.

Tabela 8 - Resultados das simulações

Cenário	Altura da bancada (m)	Diâmetro do furo (mm)	Explosivo	Afastamento (m)	Espaçamento (m)	P80 (cm)	% menor que 10cm	Razão de carga (g/t)	Área da Malha (m <sup>2</sup> )
A	6	76,2	ANFO	2	2,4	39,96	6,25	258,5	4,8
A	6	127	ANFO	3,3	4	50,74	3,64	232,2	13,2
A	6	178	ANFO	3,6	4,4	38,79	5,87	364,9	15,84
A	10	76,2	ANFO	2	2,4	41,92	5,61	274,3	4,8
A	10	127	ANFO	3,3	4	51,62	3,5	258,5	13,2
A	10	178	ANFO	3,6	4,4	39,13	5,75	411,8	15,84
A	15	76,2	ANFO	2	2,4	44,03	5,01	282,2	4,8
A	15	127	ANFO	3,3	4	53,53	3,22	271,7	13,2
A	15	178	ANFO	3,6	4,4	40,43	5,32	435,2	15,84
A	6	76,2	EMULSÃO	2,2	2,7	41,2	6,32	286,5	5,94
A	6	127	EMULSÃO	3,7	4,5	52,87	3,65	253	16,65
A	6	178	EMULSÃO	4,1	4,9	40,45	5,66	395,5	20,09
A	10	76,2	EMULSÃO	2,2	2,7	42,98	5,76	306,6	5,94
A	10	127	EMULSÃO	3,7	4,5	53,22	3,59	286,5	16,65
A	10	178	EMULSÃO	4,1	4,9	40,3	5,71	455,3	20,09
A	15	76,2	EMULSÃO	2,2	2,7	45,07	5,19	316,7	5,94
A	15	127	EMULSÃO	3,7	4,5	54,93	3,35	303,3	16,65
A	15	178	EMULSÃO	4,1	4,9	41,42	5,36	485,1	20,09
B	6	76,2	ANFO	2	2,3	32,64	10,05	272	4,6
B	6	127	ANFO	3,3	3,8	41,45	5,09	244,1	12,54
B	6	178	ANFO	3,3	3,8	26,46	13,99	480,3	12,54
B	10	76,2	ANFO	2	2,3	34,23	9,58	288,8	4,6
B	10	127	ANFO	3,3	3,8	42,16	5,71	272	12,54
B	10	178	ANFO	3,3	3,8	26,92	13,46	535,1	12,54
B	15	76,2	ANFO	2	2,3	35,97	8,12	297,1	4,6
B	15	127	ANFO	3,3	3,8	43,71	5,26	286	12,54
B	15	178	ANFO	3,3	3,8	27,91	12,4	562,5	12,54
B	6	76,2	EMULSÃO	2,3	2,6	33,77	9,99	300,2	5,98
B	6	127	EMULSÃO	3,8	4,3	43,37	5,8	264,7	16,34

B	6	178	EMULSÃO	3,8	4,3	27,59	13,2	520,9	16,34
B	10	76,2	EMULSÃO	2,3	2,6	35,22	9,17	321,5	5,98
B	10	127	EMULSÃO	3,8	4,3	43,62	5,7	300,2	16,34
B	10	178	EMULSÃO	3,8	4,3	27,77	13,9	590,6	16,34
B	15	76,2	EMULSÃO	2,3	2,6	36,91	8,25	332,2	5,98
B	15	127	EMULSÃO	3,8	4,3	45,01	5,38	318	16,34
B	15	178	EMULSÃO	3,8	4,3	28,64	12,2	625,5	16,34

## 5.2.1 Cenário A

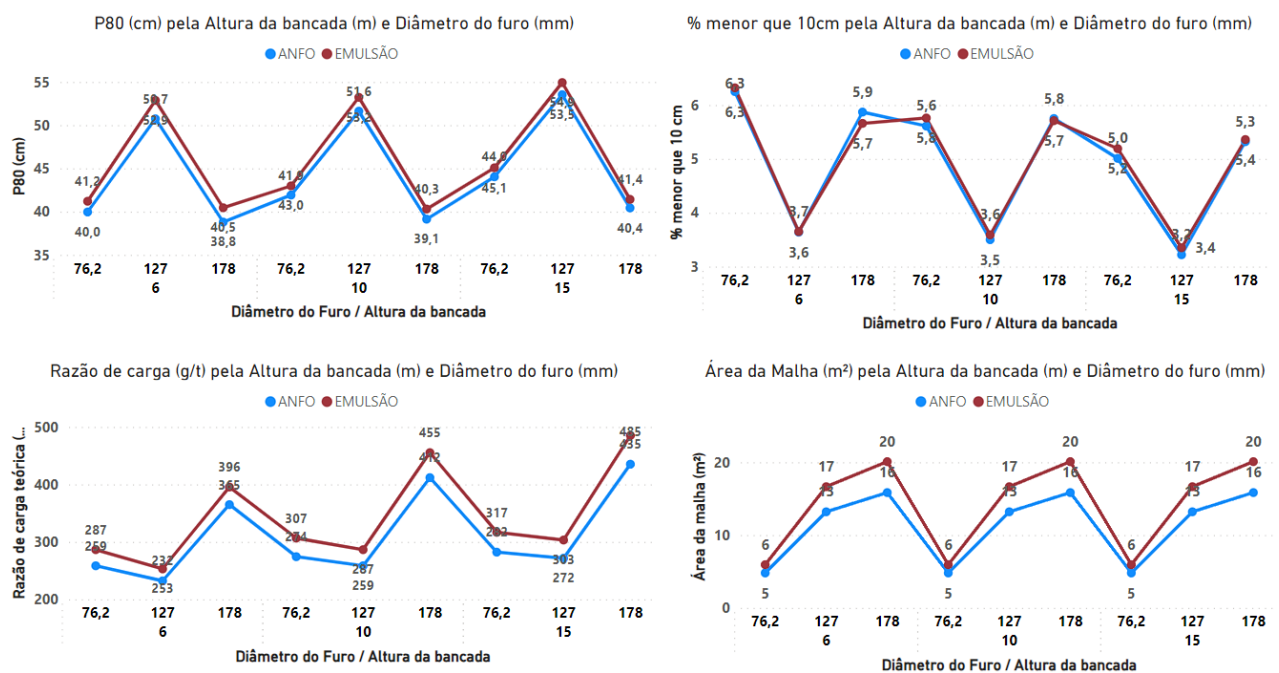


Figura 36 - Resultado do cenário A

- Utilizando ANFO

O cenário A com a utilização do ANFO em termos de granulometria, apresentou seus maiores valores para o diâmetro de furo de 127mm. Os diâmetros de 76,2 mm e 178 mm no geral não apresentaram diferenças significativas no P80, tendo sua maior variação nas bancadas de 15 metros (3,6 cm). Em termos de porção menor que 10 cm o diâmetro de 127 mm também se apresentou discrepante com relação aos demais, com uma porcentagem menor. Com relação a razão de carga,

os maiores valores registrados foram para o diâmetro de 178 mm e os menores para 127 mm, sempre aumentando gradualmente com o incremento na altura da bancada para bancadas de mesma altura. Quanto a área de perfuração, o menor valor registrado foi para o diâmetro de 76,2 mm. Já para 127 mm e 178 mm a diferença entre as áreas foi de 2,6 m<sup>2</sup>.

- Utilizando Emulsão

Para o Cenário A, utilizando emulsão, nenhum dos valores apresentou uma diferença de comportamento considerável em comparação ao cenário anterior. Apresentou-se um leve aumento com relação ao P80, um acréscimo considerável com relação à área da malha de perfuração. Com relação a razão de carga, todos os valores receberam um incremento positivo, devido ao aumento da densidade do explosivo. Nota-se que o parâmetro que menos sofreu impacto com relação a mudança de explosivo foi a porcentagem menor que 10 cm.

No geral, o cenário que utiliza ANFO, apresenta os maiores custos potenciais de perfuração, pois apresenta menores áreas em comparação com a Emulsão. Em compensação, a utilização de emulsão acarreta no aumento da razão de carga do plano de fogo. O maior incremento registrado foi para a bancada de 15 metros e diâmetro de 178 mm (50 g/t). Em termos granulométricos (P80 e porção menor que 10 centímetros), a mudança de explosivo não apresenta grandes impactos.



## 5.2.2 Cenário B

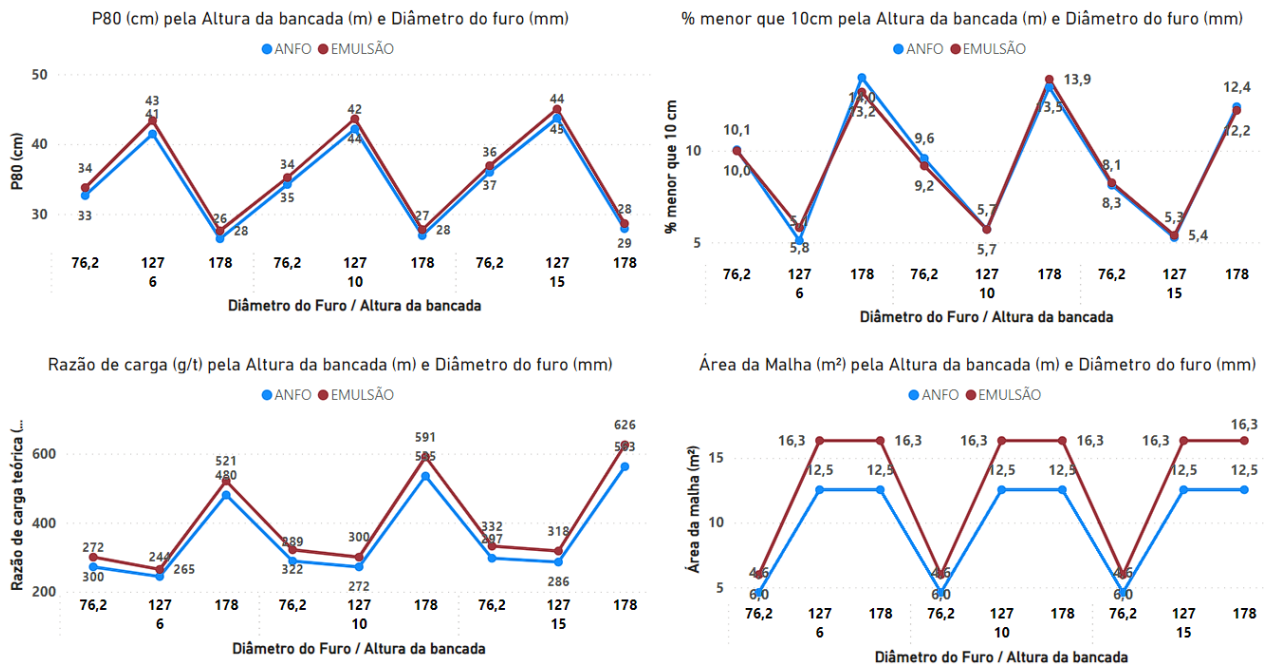


Figura 37 - Resultados do cenário B

- Utilizando ANFO

O cenário B é caracterizado principalmente por um considerável acréscimo na resistência à compressão uniaxial da rocha em comparação ao cenário A, o que afetou diretamente no cálculo dos planos de fogo. Com essa mudança era esperada certa alteração em todos os outros resultados.

Utilizando ANFO, percebe-se que o diâmetro de 178 mm apresentou os menores resultados em relação ao P80, indicando uma fragmentação muito mais efetiva com relação aos outros diâmetros. O diâmetro de 178 mm também apresentou o maior potencial para fragmentação excessiva dentre os cenários, possuindo uma porcentagem de material abaixo de 10 cm chegando a 14% para bancadas de 6 metros. Nas situações em que foi utilizado o diâmetro de furo de 127 mm, observa-se a situação contrária, com um P80 médio de 42,47 cm variando muito pouco com a alteração da altura das bancadas.

Em termos de Razão de Carga, os maiores valores foram registrados para o diâmetro de 178 mm, apresentando uma ordem de grandeza de duas vezes os

menores valores, registrados para 127 mm. Esses resultados indicam uma relação inversamente proporcional entre a razão de carga e o P80.

Com relação a área da malha (Afastamento x Espaçamento), os cálculos chegaram a valores iguais para diâmetros de 127 mm e 178 mm, ambos 12,5 m<sup>2</sup>. Para 76,5 mm, a área da malha foi de 4,6 m<sup>2</sup>.

- Utilizando Emulsão

Apresentou no geral um comportamento muito parecido em relação ao ANFO, manifestando discrepâncias principalmente em relação a razão de carga, sendo um pouco maior, e na área da malha de perfuração, sendo consideravelmente maior.

### **5.3 Comparação entre cenários**

Para o Cenário A, a variação da altura das bancadas representou um impacto significativo apenas na razão de carga, enquanto a variação no diâmetro dos furos promoveu efeitos significativos em todos os parâmetros. Observa-se uma disparidade dos desmontes com furos de 127 mm para com os demais, apresentando uma fragmentação substancialmente mais grossa, menor porcentagem de material “fino”, menores valores de razão de carga e áreas de malha com valores intermediários em relação aos demais.

Nesse contexto, o diâmetro de 127 mm pode culminar em desmontes mais baratos, pois utilizariam menos explosivo (menor razão de carga), e gastos intermediários com perfuração e acessórios. Porém, com uma fragmentação consideravelmente menos efetiva. Desmontes com diâmetro de 76,2 mm são a alternativa mais cara, pois sua malha mais fechada pode representar maiores gastos com perfuração e acessórios de detonação. Se faz necessária uma análise de custos aprofundada especialmente para os desmontes com diâmetro de 178 mm, por apresentarem os maiores gastos potenciais com explosivos, porém menores gastos de perfuração e acessórios.

O Cenário B apresentou resultados similares ao Cenário A, com relação ao impacto causado pela variação do diâmetro do furo e altura da bancada nos parâmetros analisados. A principal diferença entre os Cenários se dá nas áreas de malhas de perfuração calculadas para os diâmetros de 127 mm e 178 mm, que apresentam o

mesmo valor, configurando um cenário de custos similar em termos de perfuração e acessórios de detonação.

A variação do explosivo utilizado também impactou nos resultados encontrados, apresentando emulsão com valores relativamente maiores de P80 em comparação ao ANFO, malhas de perfuração mais abertas, maiores valores de razão de carga. Em termos de porcentagem de finos, a variação no explosivo utilizado não acarretou em mudanças consideráveis.

## 6 CONCLUSÕES

Conforme pontuado, não foram considerados erros de perfuração, utilização de furos inclinados, perdas de energia dos explosivos e orientação das descontinuidades do maciço por falta de dados. Devido às considerações e simplificações aplicadas aos cenários, as simulações foram executadas em um ambiente que não representa o real. Para aplicações práticas, dados específicos de cada caso contribuirão positivamente para a robustez e precisão do modelo de Kuz-Ram.

Em termos porcentagem de material menor que 10 cm, os resultados encontrados no Cenário B podem ser considerados relativamente precisos mesmo quando comparado ao modelo de fragmentação TCM por se tratar de uma rocha dura (143, 98 MPa). Não se pode dizer o mesmo do Cenário A, recomendando-se assim a realização de simulações de curva granulométrica pelo modelo TCM em desmontes em que haja predominância desta litologia.

No geral os Cenários estudados apresentaram diferenças significativas em seus resultados, fato esse decorrente principalmente da diferença de resistência a compressão uniaxial da rocha.

Alterações na altura das bancadas representaram:

- Pouco impacto na fragmentação
- Impacto considerável na Razão de Carga
- Nenhum impacto na geometria do plano de fogo

Já alterações no diâmetro do furo:

- Grande impacto em todos os dados de interesse

De forma geral podemos pontuar para o cenário A:

- Menor Razão de carga teórica;
- Fragmentação mais grosseira;
- Malhas mais abertas.

Já para o cenário B:

- Maior razão de carga teórica;
- Fragmentação mais fina;
- Malhas mais fechadas (iguais para 127mm e 178mm de diâmetro).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, P. F. A.; SAMPAIO, J. A. Lítio. IN: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 585-603.

Chaves, M. L. S. C., & Dias, C. H. (2022). **Lítio em Minas Gerais: mineralogia, depósitos e estágios de geração de espodumênio na Província Pegmatítica Oriental Brasileira**. *Terræ Didactica*, 18(Publ. Contínua), 1-10, e022040. doi: 10.20396/td.v18i00.8671078.

CHAVES, Mário Luiz de Sá Carneiro; SCHOLZ, Ricardo; DANIEL ATENCIO, Daniel; JOACHIM KARFUNKEL, Joachim. **ASSEMBLÉIAS E PARAGÊNESES MINERAIS SINGULARES NOS PEGMATITOS DA REGIÃO DE GALILÉIA (MINAS GERAIS)**. *Geociencias*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 143-161, jan. 2005.

DJORDJEVIC, N. A two-component model of blast fragmentation In: *The AusIMM Proceedings*, Austrália: Brisbane, 1999, p. 9-13.

DUTRA, J. I. G. **Perfuração e Desmonte de Rochas: Notas de aula**. 2011,  
HARTMAN, H.L. – **SME Mining Engineering Handbook**. Littleton, Colorado: Aime, 1992.

JAQUES, Daniel Silva. Rock mass classification applied to Volta Grande underground mine site, Nazareno, Minas Gerais. 2014. 202 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

JIMENO, C.L.; JIMENO, E.L.; CARCEDO, F.J.A.; **Drilling and Blasting of Rocks**. Nova York. 2º Edição.1987;

JOHNSTON Jr., W.D. **Beryl-tantalite pegmatites of Northeastern Brazil**. *Geological Society of América Bulletin*, v.56,p.1015-1070, 1945a..

JOHNSTON Jr., W.D. **Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil**. DNPM/DFPM (Boletim 72). Rio de Janeiro, 85p.1945b.

KIM, D. J. et al. Prediction Model of Drilling Performance for Percussive Rock Drilling Tool. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.

LUZ, A. B. et al. (2003). **Pegmatitos do Nordeste: diagnóstico sobre o aproveitamento racional e integrado**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. 49p.

MOORE, J.E. **Lavra de pegmatitos tantalíferos e gluciníferos no Nordeste do Brasil**. DNPM/DFPM (Boletim n. 71). Rio de Janeiro, 51p., 1945.

MORAIS, Juarez Lopes de; GRIPP, Maria de Fátima Andrade. **Fundamentos Para Simulação Dos Desmontes De Rocha Por Explosivos**. 2004.

PAES, Vinícius José de Castro et al. (Orgs.). **Avaliação do potencial do lítio no Brasil: área do Médio Rio Jequitinhonha, nordeste de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2016. 273 p.

RODRIGUES, Inês Sofia Feio. **Avaliação de novas matérias-primas para emulsões explosivas encartuchadas e a granel**. Orientador: Maria Beatriz Carrasquinho Afonso. 2018. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) - Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2018. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/53045>. Acesso em: 3 nov. 2023.

SÁ, J.H. da Silva. (1977). Pegmatitos litiníferos da região de Itinga - Araçuaí, Minas Gerais. Disponível em INIS: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:20007425](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:20007425)

SALOMÃO, Pedro Emílio Amador; BORGES, Edson Aparecido Gonçalves. Extração de Lítio nos municípios de Itinga e Araçuaí no Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 1, 29 out. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1798>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/338312342\\_Extracao\\_de\\_Litio\\_nos\\_municipios\\_de\\_Itinga\\_e\\_Aracuai\\_no\\_Vale\\_do\\_Jequitinhonha\\_em\\_Minhas\\_Gerais](https://www.researchgate.net/publication/338312342_Extracao_de_Litio_nos_municipios_de_Itinga_e_Aracuai_no_Vale_do_Jequitinhonha_em_Minhas_Gerais). Acesso em: 18 out. 2023.

SANTOS, Tatiana Barreto dos. Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação de propriedades dos maciços rochosos. 2015. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SILVA, Valdir Costa e. **Desmonte de Rochas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 334 p. ISBN 9788579753367.