

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**MIZAEEL CORREIA DE LIRA FILHO**

**SOFTWARE EM OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE  
ROCHAS COM EXPLOSIVOS**

**RECIFE**

**2023**

MIZAEI CORREIA DE LIRA FILHO

SOFTWARE EM OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHAS COM  
EXPLOSIVOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao programa de **Bacharelado em Engenharia de Minas** do **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**, como requisito parcial à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Minas**.

**Orientador:**

Prof.<sup>a</sup> Ms. Marinesio Pinheiro de Lima.

**Coorientador:**

Prof. Ms. Rafael Franco e Silva.

Recife - Pernambuco, Agosto de 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lira Filho, Mizael Correia de .

Software em otimização de desmonte de rochas com Explosivos / Mizael  
Correia de Lira Filho. - Recife, 2023.

53 p. : il., tab.

Orientador(a): Marinesio Pinheiro de Lima

Coorientador(a): Rafael Franco e Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Minas -  
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Software. 2. Otimização. 3. Desmonte de Rochas. 4. Explosivos. I. Lima,  
Marinesio Pinheiro de. (Orientação). II. Silva, Rafael Franco e. (Coorientação).  
IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

**MIZAEEL CORREIA DE LIRA FILHO**

**SOFTWARE EM OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHAS COM  
EXPLOSIVOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao programa de **Bacharelado em Engenharia de Minas** do **UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**, como requisito à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Minas**.

**Data de aprovação:**

28/09/2023

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. Marinesio Pinheiro Lima**  
Universidade Federal de Pernambuco

---

**Prof. Artur Angelo Alcântara de Assis**  
Universidade Federal de Pernambuco

---

**Prof. Marcio Luiz de Siqueira Campos Barros**  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força até esse momento. À minha mãe Marinez por acreditar em mim e sempre me prover de tudo dando o melhor de si, a Mirella pelo apoio, paciência e atenção e a toda minha família. Ao meu orientador Marinesio Pinheiro de Lima e ao meu coorientador pela oportunidade de trabalhar com uma pessoa de tanta qualidade, inteligência e ao meu coorientador Rafael Franco e Silva. À todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas do CTG nos quais tive a oportunidade de conhecer e aprender. Aos colegas de graduação.

*Qualquer tecnologia suficientemente avançada  
é indistinguível de magia.*

**Arthur C. Clarke**

## RESUMO

O trabalho abordou o tema "Software na Otimização de Desmonte de Rochas com Explosivos". Foram discutidos os parâmetros do modelo de Kuz-Ram para simular a fragmentação e um programa em Python foi escrito para essa simulação. O programa utiliza uma classe chamada "Database" que se conecta a um banco de dados SQLite e permite inserir, visualizar, atualizar e excluir propriedades de explosivos. No programa principal, uma interface gráfica (GUI) é criada usando a biblioteca Tkinter. A interface possui várias abas, incluindo uma para estimativas, outra para o banco de dados de explosivos e outra para parâmetros de fatores de rocha. O programa também faz cálculos e exibe um gráfico da curva de fragmentação..

**Palavras-chave:** Software, Otimização, Desmonte de Rochas, Explosivos.

## ABSTRACT

The work dealt with the topic "Software for optimization of rock blasting with explosives". The parameters of the Kuz-Ram model for simulating fragmentation were discussed and a Python program for this simulation was written. The program uses a class called "Database" that connects to a SQLite database and allows insertion, display, update, and deletion of explosives properties. In the main program, a graphical user interface (GUI) is created using the Tkinter library. The interface has several tabs, including one for estimates, another for the explosives database, and another for rock factor parameters. The program also performs calculations and displays a graph of the fragmentation curve.

**Keywords:** software, optimization, rock blasting, explosives.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um plano de fogo em uma bancada . . . . .	18
Figura 2.2 – Produtividade x Pilha . . . . .	21
Figura 2.3 – Aproveitamento da onda em relação a inclinação do furo . . . . .	23
Figura 2.4 – Subfuração . . . . .	27
Figura 2.5 – Malha quadrada . . . . .	29
Figura 2.6 – Malha estagiada . . . . .	29
Figura 2.7 – Uso do explosivo como função do índice de blastabilidade . . . . .	36
Figura 2.8 – Ilustração da direção e mergulho das fraturas com relação à face livre. (a) mergulhando para fora da face livre, (b) horizontal, (c) mergulhando para dentro da face livre, (d) paralela à face livre e (e) perpendicular à face livre . . . . .	37
Figura 3.1 – Tela inicial . . . . .	44
Figura 4.1 – Planilha . . . . .	45
Figura 4.2 – Primeira Aba . . . . .	49
Figura 4.3 – Segunda Aba . . . . .	50
Figura 4.4 – Resultado . . . . .	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações entre altura (H) e afastamento (B) . . . . .	19
Tabela 2.2 – Desmonte de bancadas com pequenos diâmetros de furos . . . . .	20
Tabela 2.3 – Relação entre diâmetro e comprimento do tampão . . . . .	25
Tabela 2.4 – Relação entre comprimento do tampão, resistência da rocha e diâmetro do furo (D) . . . . .	26
Tabela 2.5 – Relação entre diâmetro do furo e subfuração . . . . .	28
Tabela 2.6 – Massa específica de vários tipos de explosivos . . . . .	31
Tabela 2.7 – Parâmetros da classificação do índice de blastabilidade de Lilly . . . .	34
Tabela 2.8 – Classificação do fator da rocha . . . . .	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TCC	Trabalho de Conclusão do Curso
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
NBR	Norma Brasileira

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\lambda$	Letra grega Lambda
$\Theta$	Letra grega Theta
$\rho$	Letra grega Rô
$\phi$	Letra grega Phi
$\mu$	Letra grega Mi

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>VÁRIAVEIS DO PLANO DE FOGO . . . . .</b>	<b>17</b>
2.1.1	Altura da bancada . . . . .	19
2.1.2	Diâmetro dos furos . . . . .	20
2.1.3	Inclinação dos furos . . . . .	22
2.1.4	Afastamento . . . . .	23
2.1.5	Espaçamento . . . . .	24
2.1.6	Tampão . . . . .	25
2.1.7	Subfuração . . . . .	27
2.1.8	Desvio de furo . . . . .	28
2.1.9	Malha de perfuração . . . . .	29
<b>2.2</b>	<b>DADOS DO EXPLOSIVO . . . . .</b>	<b>29</b>
2.2.1	Densidade . . . . .	30
2.2.2	Velocidade detonação . . . . .	31
2.2.3	Pressão de detonação . . . . .	32
2.2.4	Energia de um explosivo . . . . .	33
<b>2.3</b>	<b>Maciço rochoso . . . . .</b>	<b>34</b>
2.3.1	Índice de blastabilidade de Lilly . . . . .	34
2.3.2	Fator da rocha . . . . .	36
<b>2.4</b>	<b>Modelo de Simulação de fragmentação de rochas KUZ-RAM .</b>	<b>38</b>
<b>2.5</b>	<b>Trabalhos realizados nessa área . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>2.6</b>	<b>Linguagem de Programação Python . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>2.7</b>	<b>Git e GitHub . . . . .</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>43</b>

4	CASO DE APLICAÇÃO . . . . .	45
4.1	Exemplo numérico . . . . .	49
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	52
	REFERÊNCIAS . . . . .	53

# 1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rocha com explosivos é um processo fundamental nas operações de mineração e construção, que envolve o uso controlado de explosivos para fragmentar a rocha e criar condições adequadas para escavação, perfuração, tratamento de minérios e outras atividades. A otimização dos planos de fogo em desmonte de rocha é essencial para garantir o uso eficiente de explosivos, mantendo os padrões de segurança e minimizando o impacto ambiental.

Um dos fatores-chave na otimização de planos de fogo é a seleção de parâmetros de detonação apropriados, como o tipo de explosivo, diâmetro do furo, afastamento, espaçamento. Esses parâmetros podem ter um impacto significativo na fragmentação do maciço rochoso e na eficiência do desmonte resultante. O uso de explosivos específicos e padrões de perfuração podem melhorar significativamente a fragmentação e reduzir os custos de processamento que se sucedem.

O objetivo deste projeto de pesquisa é desenvolver um software de otimização de plano de fogo usando linguagem de programação Python e modelo Kuz-Ram para desmonte de rocha com explosivos. Este software será uma ferramenta valiosa para engenheiros de mineração melhorarem a eficiência e precisão de suas operações de detonação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 VÁRIAVEIS DO PLANO DE FOGO

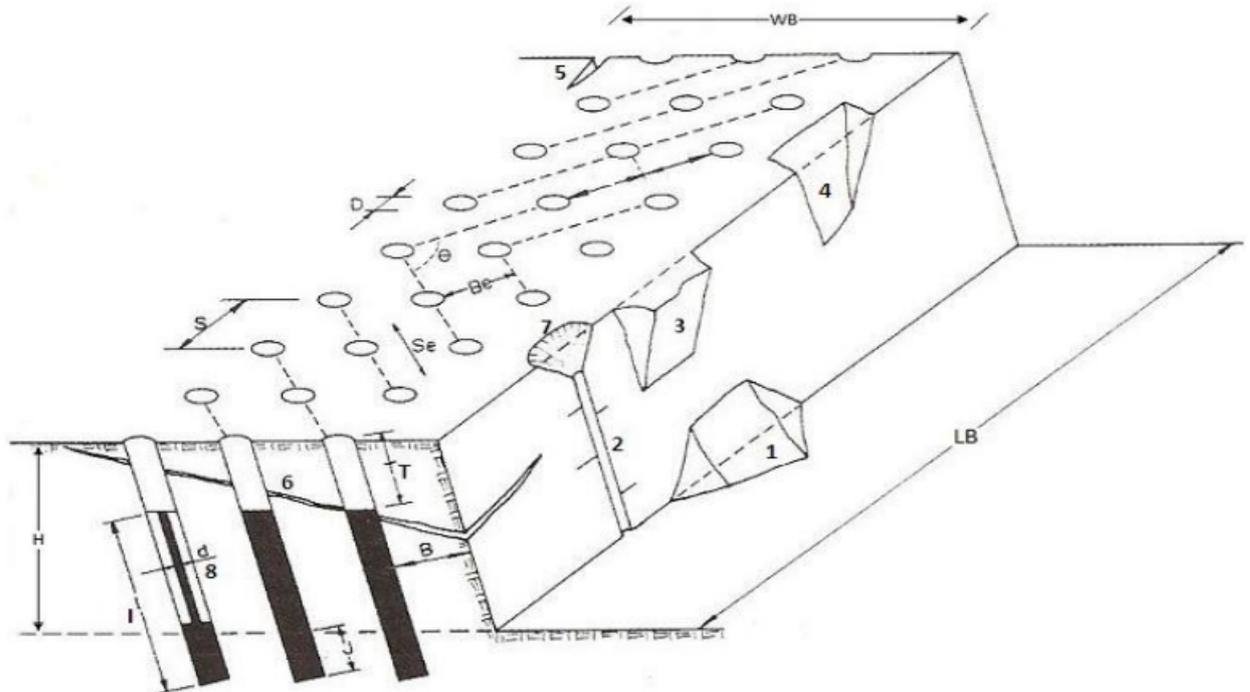
O plano de fogo é uma etapa crucial na mineração e construção que tem como objetivo fragmentar o maciço rochoso por meio do uso de explosivos. Para garantir uma execução bem-sucedida, é necessário levar em consideração diversos parâmetros durante as etapas de planejamento e execução do plano de fogo. Esses parâmetros podem ser amplamente classificados em três categorias: parâmetros do explosivo, parâmetros do maciço rochoso e parâmetros da malha de perfuração.

- Os parâmetros do explosivo são importantes para determinar o tipo de explosivo utilizado, a densidade do explosivo, a velocidade de detonação, a pressão de detonação e a quantidade de explosivo utilizado. A escolha do tipo de explosivo é baseada em diversos fatores, como disponibilidade, custo e requisitos específicos de detonação. A densidade do explosivo afeta a transferência de energia para o maciço rochoso, e a velocidade e pressão de detonação determinam o desempenho do explosivo. A quantidade de explosivo utilizada é calculada com base no tamanho de fragmentação desejado e no tamanho do maciço rochoso a ser fragmentado.
- Os parâmetros do maciço rochoso incluem o tipo de rocha, a resistência da rocha, a orientação e espaçamento das juntas e fraturas naturais. O tipo de rocha é um fator determinante para os requisitos de perfuração e detonação, enquanto a resistência da rocha afeta a fragmentação e a distribuição de tamanho das rochas fragmentadas. A orientação e o espaçamento das juntas, bem como as fraturas naturais, podem influenciar o projeto da detonação, os padrões de perfuração e os tempos de retardo da detonação.
- Os parâmetros da malha de perfuração são aqueles que influenciam diretamente o projeto de detonação, incluindo o diâmetro e profundidade do furo, o espaçamento, carga e tamponamento. O diâmetro e a profundidade do furo são determinados com base no tipo de explosivo, nos parâmetros do maciço rochoso e no tamanho de fragmentação desejado. O espaçamento, afastamento, a carga e o tampão também são parâmetros de projeto importantes que afetam o desempenho da detonação e a distribuição do tamanho da fragmentação.

Em resumo, o plano de fogo é um processo complexo que envolve diversos parâmetros interdependentes. A seleção cuidadosa de cada parâmetro é crucial para garantir

a fragmentação adequada do maciço rochoso e minimizar riscos para os trabalhadores e equipamentos envolvidos.

**Figura 2.1 – Diagrama esquemático de um plano de fogo em uma bancada**



Fonte: Jimeno (2003)

Onde temos:

- H = Altura da bancada
- D = Diâmetro do furo
- L = Comprimento do furo
- d = Diâmetro do explosivo
- B = Afastamento
- S = Espaçamento
- LB = Largura da bancada
- WB = Comprimento da bancada
- Be = Afastamento efetivo
- Se = Espaçamento efetivo

- T = Tampão
- J = Sub-furação
- I = Comprimento de carga
- $\ominus$  = Ângulo de abertura ou saída
- tr = Tempo de retardo
- 1 = Re-pé
- 2 = Furo
- 3 = Cunha
- 4 = Sobrescavação
- 5 = Greta de tração
- 6 = Fraturamento do maciço
- 7 = Cratera
- 8 = Carga desacoplada

### 2.1.1 Altura da bancada

A altura do bancada refere-se à distância vertical entre dois níveis consecutivos em uma mina a céu aberto. A escolha da altura de bancada é uma decisão que deve ser tomada levando-se em consideração questões de ordem técnica e econômica, a saber (SILVA, 2009) :

- As condições de estabilidade da rocha que compõe o maciço e a segurança nas operações de escavação;
- O volume de produção desejado, o qual determinará o tipo e o porte dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte;
- A maximização da eficiência no custo total de perfuração e desmonte.

**Tabela 2.1 – Relações entre altura (H) e afastamento (B)**

H/B	Fragmentação	Onda aérea	Ultralançamentos	Vibração	Comentários
1	Ruim	Severa	Severo	Severa	Quebra para trás. Recalcular plano de fogo
2	Regular	Regular	Regular	Regular	Recalcular se possível
3	Boa	Boa	Bom	Boa	Bom controle e fragmentação
4	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Não há aumento de benefícios para $H/B > 4$

**Fonte: Macedo (2014)**

De Silva (2009) lembramos de algumas considerações para se levar em conta na escolha da altura da bancada:

- Precisão da perfuração diminui à medida que cresce o número de hastes, gerando assim desvios de perfuração.
- Ultralaçamentos devido aos desvios gerados.
- Aumento da altura provoca aumento da razão de carga.
- Aumento da altura gera grandes pilhas de material, exigindo assim a demanda de equipamentos de grande porte.

**Tabela 2.2 – Desmonte de bancadas com pequenos diâmetros de furos**

Altura da bancada (m)	Diâmetro do furo (mm)	Diâmetro do furo (pol.)	Equipamento de carregamento recomendado
8-10	65-90	2,5-3,5	Pá carregadeira
10-15	100-150	4,0-6,0	Escavadeira

**Fonte: Macedo (2014)**

### 2.1.2 Diâmetro dos furos

Considerando um procedimento de engenharia, a escolha do diâmetro do furo é uma das mais importantes tarefas no dimensionamento do plano de fogo, pois a mesma envolve aspectos como a taxa de produção necessária, vibrações, altura de bancadas, fragmentação, custos, entre outros. Segundo Jimeno et al. (2003), os fatores que implicam na escolha do diâmetro são:

- Características da rocha dependendo do material a ser detonado não existe a necessidade de grandes diâmetros e, conseqüentemente, grandes quantidades de explosivos, já que o mesmo é mais friável, menos competente.
- Grau de fragmentação requerida, o diâmetro influencia neste aspecto devido ao fato de que quanto maior for ele, maior será a quantidade de explosivos confinada e, assim, uma maior quantidade de energia será liberada para fragmentar o material. Existe uma correlação entre comprimento de carga (H) e diâmetro (D), que é  $H/D < 60$  onde um incremento no valor de D implica em um aumento de fragmentação. Porém se for  $H/D > 60$  o aumento no valor de D implica em um consumo específico maior.
- Custos de perfuração e desmonte, a diminuição do diâmetro implica em uma quantidade menor de explosivos, envolvendo assim no processo um custo menor no aspecto

da quantidade de explosivos utilizados, porém o custo de perfuração será alto, devido a maior quantidade de furos para equivaler furos de diâmetros maiores.

De acordo com Macedo (2014), o diâmetro influencia indiretamente na dimensão do bloco a ser obtido no desmonte, devido ao fato de o equipamento de limpeza (pá carregadeira) limitar a maior dimensão do bloco. O mesmo sugere a seguinte equação empírica:

$$\Phi = \mu * c \quad (1)$$

Em que:

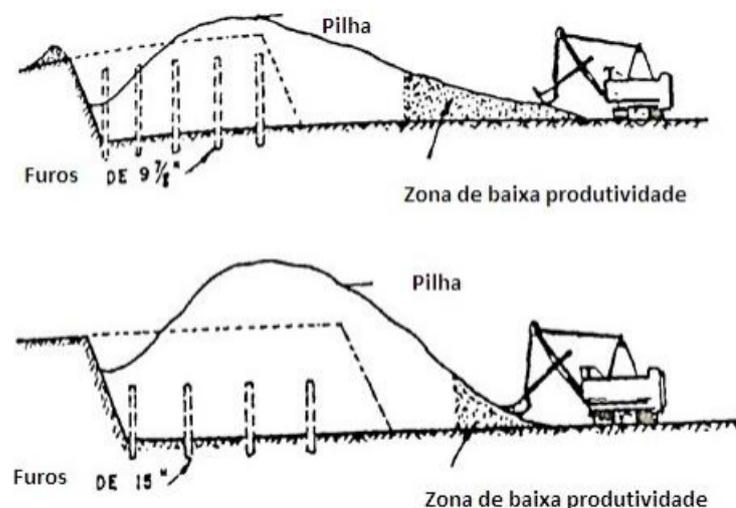
$\Phi$  Diâmetro do furo (polegadas)

$\mu c$  Capacidade da pá carregadeira (jardas cúbicas)

Existe uma relação entre diâmetro do furo e altura da bancada, que gira em torno de 0,5 a 1,25 %.

Em relação à escolha dos equipamentos de carregamento, os diâmetros dos furos influenciam na formação da pilha do material fragmentado, fazendo assim que alguns equipamentos de acordo com a pilha formada tenham baixa ou alta produtividade, conforme a Figura 2.2.

**Figura 2.2 – Produtividade x Pilha**



Fonte: Jimeno (2003)

Em lavra superficial, os diâmetros variam de 50 mm até 380 mm, Jimeno et al. (2003). De forma resumida, algumas vantagens e desvantagens em relação ao diâmetro dos furos são demonstradas a baixo.

- Diâmetros menores:
  - Vantagens: Melhor fragmentação da rocha devido à melhor distribuição dos explosivos; nível de vibração é menor; menores danos causados na rocha remanescente.
  - Desvantagens: Mais furos são perfurados para uma mesma área comparando-se à utilização de diâmetros maiores; maior tempo de perfuração.
  
- Diâmetros maiores:
  - Vantagens: É utilizada uma quantidade menor de furos comparando-se à utilização de diâmetros menores; menor quantidade de explosivo por furo utilizado; menor tempo de perfuração.
  - Desvantagens: A distribuição granulométrica gerada é pior em relação a diâmetros menores. A seleção do diâmetro depende da produção horária, do ritmo de escavação, altura da bancada e da resistência.

### 2.1.3 Inclinação dos furos

De acordo com Silva (2009), a inclinação dos furos é proveniente do ângulo de perfuração utilizado pela perfuratriz em relação à vertical, proporcionando assim ao desmonte vantagens e desvantagens ao utilizar este método.

Vantagens:

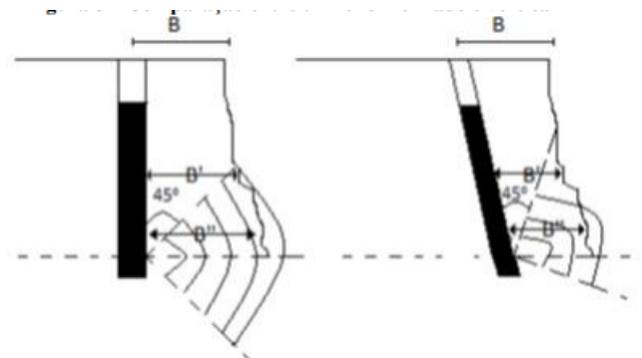
- Melhor fragmentação e menor espalhamento da pilha, já que o afastamento calculado na superfície permanece mais uniforme ao longo do furo.
- Aumenta a eficiência da utilização da energia do explosivo, devido à onda de choque ter maior parte refletida do que em um furo vertical.
- Menor será a subfuração, fazendo assim com que se aproveite melhor a energia do explosivo, levando em consideração uma diminuição do nível de vibrações produzido.

Desvantagens:

- Maior dificuldade no posicionamento das perfuratrizes.
- Aumento do comprimento do furo em relação ao furo vertical.
- Maior desgaste dos equipamentos.
- Dificuldade de posicionamento das perfuratrizes e em manter o paralelismo da perfuração.

A Figura 2.3 mostra uma comparação do aproveitamento da onda refletida entre um furo inclinado e vertical.

**Figura 2.3 – Aproveitamento da onda em relação a inclinação do furo**



Fonte: Macedo (2014)

#### 2.1.4 Afastamento

De acordo com Macedo (2014), afastamento é a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra. De todas as dimensões do plano de fogo essa é a mais crítica. Algumas situações podem ocorrer:

- Afastamento muito pequeno - A rocha é lançada a uma considerável distância da face. Os níveis de pulsos de ar são altos e a fragmentação poderá ser excessivamente fina.
- Afastamento muito grande - A sobrecavação (backbreak) na parede é muito severa.
- Afastamento excessivo - Grande emissão de gases dos furos contribuindo para um ultra lançamento dos fragmentos rochosos a distâncias consideráveis, crateras verticais, alto nível de onda aérea e vibração do terreno.

Outras variáveis do plano de fogo são mais flexíveis e não produzirão efeitos drásticos nos resultados tais como os produzidos pelo erro na estimativa da dimensão do

afastamento. O valor do afastamento ( $A$ ) é função do diâmetro dos furos, das características das rochas e dos tipos de explosivos utilizados. Os valores do afastamento oscilam entre 33 e 39 vezes o diâmetro do furo, dependendo da resistência da rocha e da altura da carga de fundo. Uma fórmula empírica e bastante útil para o cálculo do afastamento ( $A$ ) é expressa por:

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

sejam:

- $\rho_e$  = densidade do explosivo ( $g/cm^3$ );
- $\rho_r$  = densidade da rocha ( $g/cm^3$ );
- $d_e$  = diâmetro do explosivo (mm).

### 2.1.5 Espaçamento

De acordo com Macedo (2014), o espaçamento entre os furos é determinado com base no tipo de rocha que está sendo detonada, na fragmentação desejada, no tamanho da carga explosiva e em outros fatores. Geralmente, um espaçamento menor leva a uma melhor fragmentação, mas também aumenta a quantidade de explosivos necessária e pode aumentar o risco de ultra-lançamento e vibração. Um espaçamento maior pode reduzir a quantidade de explosivos necessária, entretanto também pode resultar em fragmentação deficiente e desperdício de energia.

- No caso de bancada baixa ( $H_b/A < 4$ ), dois casos devem ser observados:
  - Caso em que os furos de uma linha são iniciados instantaneamente:

$$E = 0,33(H_b + 2A)$$

- Caso em que os furos são detonados com retardo:

$$E = \frac{H_b + 7A}{8}$$

- No caso de bancada alta ( $H_b/A > 4$ ), dois casos devem ser observados:
  - Caso em que os furos de uma linha são iniciados instantaneamente:

$$E = 2A$$

- Caso em que os furos são detonados com retardo:

$$E = 1,4A$$

Vale destacar que o espaçamento nunca deve ser menor que o afastamento, caso contrário, o número de matacões será excessivo. Além disso podemos ressaltar que as Malhas Alongadas possuem elevada relação  $E/A$ , geralmente acima de 1,75 que são indicadas para rochas friáveis/macias.

### 2.1.6 Tampão

Segundo Macedo (2014), o tampão é a região superior do furo onde não se faz o preenchimento com carga explosiva, e sim com material inerte como: resíduos da perfuração, areia, brita entre outros. Este tem como objetivo confinar os gases da detonação para que uma melhor fragmentação ocorra no maciço rochoso.

Caso o tamponamento seja insuficiente, os gases gerados pela detonação serão expostos à atmosfera prematuramente causando problemas relacionados a ondas aéreas e ultra-lançamentos. Já para o caso em que o tamponamento for excessivo os ultra-lançamentos serão menores, porém matacões e quebra para trás serão maiores.

Quando utilizado material para tamponamento com tamanho de  $1/25$  do diâmetro do furo, consegue-se uma redução de 41% no comprimento do tampão. Na prática, os comprimentos ótimos de tampão aumentam conforme a competência e qualidade da rocha diminuem, variando entre 20 e 60 vezes o diâmetro do furo. A Tabela 3 mostra a relação entre diâmetro e comprimento do tampão.

**Tabela 2.3 – Relação entre diâmetro e comprimento do tampão**

Diâmetro do furo (mm)	Granulometria (mm) (D/25)	Comp. do tampão (mm) (20*D)	Comp. do tampão (mm)(60*D)
50	2	1000	3000
60	2,4	1200	3600
70	2,8	1400	4200
80	3,2	1600	4800
90	3,6	1800	5400
100	4	2000	6000
110	4,4	2200	6600
120	4,8	2400	7200
130	5,2	2600	7800

140	5,6	2800	8400
150	6	3000	9000
160	6,4	3200	9600
170	6,8	3400	10200
180	7,2	3600	10800
190	7,6	3800	11400
200	8	4000	12000

Fonte: Jimeno et al. (2003) apud Macedo (2014)

Segundo Jimeno (2003) apud Macedo (2014), pode-se calcular o tamanho do tampão através da seguinte fórmula:

$$T = K_t * B \quad (2)$$

Em que:

- T = Tampão (m)
- B = Afastamento (m)
- $K_t$  = Constante (0,7 a 1)

Jimeno et al. (2003) apud Macedo (2014), sugerem a Tabela 4 para cálculo do tampão, relacionando comprimento do tampão, resistência da rocha e diâmetro do furo (D).

Tabela 2.4 – Relação entre comprimento do tampão, resistência da rocha e diâmetro do furo (D)

	Resistência da Rocha (MPa)		
	Branda (< 70)	Médio-Dura (70-80)	Muito Dura (> 180)
Tampão	40*D	32*D	25*D

Fonte: Jimeno (2003) apud Macedo (2014)

A fórmula para cálculo do comprimento do tampão é:

$$T = 1,265 * \frac{B * VD}{VC} * \sqrt{\frac{\rho_e}{\rho_s}} \quad (3)$$

Em que:

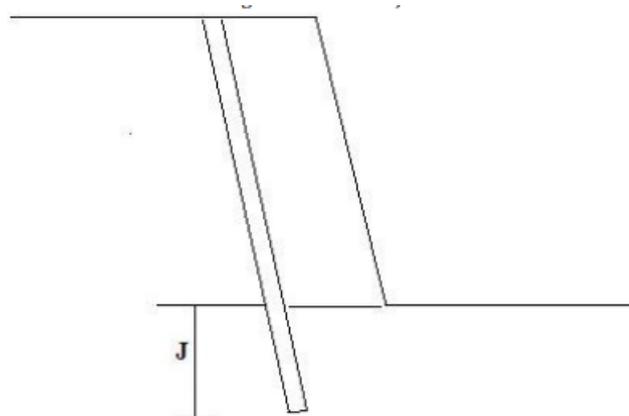
- $T$  = Tampão (m)
- $B$  = Afastamento (m)
- $VD$  = Velocidade de detonação (m/s)
- $VC$  = Velocidade sísmica de propagação do maciço rochoso (m/s)
- $\rho_e$  = Densidade do explosivo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $\rho_s$  = Densidade do material constituinte do tampão ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 2.1.7 Subfuração

Segundo Jimeno et al. (2003) apud Macedo (2014), subfuração corresponde à área do furo que excede o nível da bancada. Sua presença é fundamental sempre que se pretende fragmentar a porção de rocha localizada na parte inferior da bancada. Na ausência da subfuração, haverá a formação de um ressalto, conhecido como repé. Quando esse fenômeno ocorre, torna-se indispensável realizar uma perfuração secundária para fragmentar o repé, acarretando um aumento substancial nos custos associados a essa fase do processo.

Caso a escolha do comprimento da subfuração for menor que o necessário, o principal acontecimento será o aparecimento de repé. Já na escolha de um comprimento maior que o necessário, os acontecimentos serão: um aumento nos custos de perfuração; aumento no nível de vibração; fragmentação excessiva na parte inferior da bancada. A Figura 2.4 mostra a representação da subfuração em uma bancada.

**Figura 2.4 – Subfuração**



**Fonte: Macedo (2014)**

Fórmula para o cálculo da subfuração:

$$J = 0,3B \quad (4)$$

Em que:

- J = Sub-furação
- B = Afastamento

Segundo Jimeno (2003) apud Macedo (2014), pode-se calcular a subfuração através da seguinte fórmula

$$J = K_j * B \quad (5)$$

Em que:

- J = Subfuração (m)
- B = Afastamento (m)
- $K_j$  = Constante (0,2 a 0,4)

Jimeno et al.(2003) sugere a Tabela 5 para cálculo da subfuração (J)

**Tabela 2.5 – Relação entre diâmetro do furo e subfuração**

	Diâmetro do furo (D) (mm)	
	D. do furo (mm)	D. do furo (pol.)
	180-250	250 - 450
Subfuração (J)	$(7 - 8)*D$	$(5 - 6)*D$

Fonte: Jimeno et al. (2003)

### 2.1.8 Desvio de furo

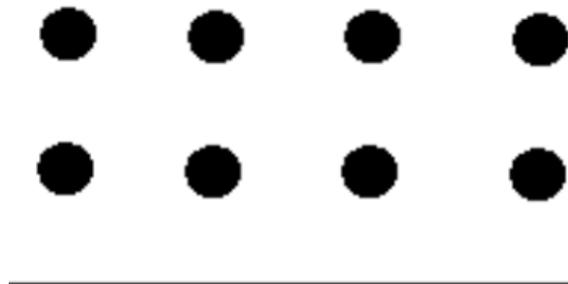
Segundo Jimeno et al. (2003), o desvio de furo é um problema comum em perfurações, especialmente em rochas duras e heterogêneas. Ele ocorre quando o furo não é perfurado na direção correta, desviando da trajetória planejada e prejudicando a eficiência e segurança da detonação. O desvio pode ser causado por diversos fatores, como a qualidade do equipamento de perfuração, a habilidade do operador, as características da rocha e etc.

Para evitar ou minimizar o desvio de furo, é necessário adotar medidas preventivas, como o uso de equipamentos adequados e em bom estado, o treinamento dos operadores, a análise geológica e geotécnica do maciço rochoso, o controle da qualidade da perfuração, entre outros.

### 2.1.9 Malha de perfuração

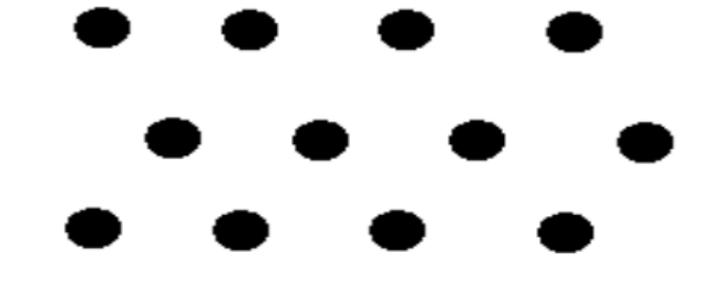
Segundo Macedo (2014), em desmonte de rochas de bancadas a geometria das malhas de perfuração utilizadas são, quadradas (Figura 2.5) ou estagiada (Figura ??).

Figura 2.5 – Malha quadrada



Fonte: Macedo (2014)

Figura 2.6 – Malha estagiada



Fonte: Macedo (2014)

## 2.2 DADOS DO EXPLOSIVO

Segundo Macedo (2014), explosivo é toda substância ou mistura de substâncias físico-químicas, que ao iniciado corretamente se transforma totalmente ou parcialmente em gases em um período muito curto de tempo, gerando uma grande quantidade de calor. Classificam-se explosivos quanto à aplicação e desempenho em :

- **Explosivos primários**, são explosivos extremamente sensíveis que geram uma onda de choque capaz de iniciar a massa explosiva.

- **Explosivos secundários**, que são os explosivos responsáveis pelo desmonte de rochas em si, são os iniciados pelo explosivo primário.

Quanto ao desempenho são classificados em:

- **Deflagrantes** que possuem velocidade menor que 1000m/s.
- **Detonantes** que possuem velocidade maior que 1000m/s, e geram grandes quantidades de gases a elevadas temperaturas.

A escolha do explosivo é uma etapa de muitos cuidados, pois deve-se olhar as propriedades das rochas a se fragmentar como também os explosivos disponíveis no mercado, com o intuito de evitar desperdício e conseguir um desmonte com baixo custo.

Os explosivos mais utilizados em desmonte de bancadas são:

- **ANFO**: que é uma mistura de 94% de nitrato de amônia com 6% de óleo diesel aproximadamente.
- **Emulsão**: que é uma mistura de 75% de nitrato de amônia, 6% de óleo diesel, 18% de água e 1% de emulsificante.

### 2.2.1 Densidade

De acordo com Macedo (2014), a densidade é definida como o peso específico do explosivo e é a relação entre a massa e o volume dessa massa, medida em  $\text{g/cm}^3$ . A densidade dos explosivos comerciais varia de 0,60 a 1,45  $\text{g/cm}^3$  e é determinada por sua composição, tamanho de grão e a densidade dos componentes.

A densidade de um agente explosivo pode ser um fator crítico, pois se muito baixa torna-se sensível ao cordel detonante, iniciando a carga de explosivo ao longo do furo antes que se inicie o reforçador, normalmente localizado no fundo do furo. Do contrário, quando a densidade é alta, esse agente torna-se insensível e não detona. Além disso, a densidade de um explosivo é um fator importante para o cálculo da quantidade de carga necessária em um desmonte. Como regra geral, no fundo dos furos onde se necessita de maior concentração de energia para o arranque da rocha, utiliza-se explosivos mais densos como os gelatinosos e hidrogéis, enquanto que em cargas de coluna, requerem explosivos menos densos, a base de ANFO, de acordo com Cunha (2014)

**Tabela 2.6 – Massa específica de vários tipos de explosivos**

Tipo	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Dinamite granulada	0,8 – 1,4
Dinamite gelatina	1,0 – 1,7
Lama encartuchada	1,1 -1,3
Lama a granel	1,1 – 1,6
ANFO	0,8 – 1,0
ANFO derramado	0,8 – 0,9
ANFO encartuchado	1,1 – 1,2
ANFO pesado	1,1 – 1,4

**Fonte: Cunha (2014)**

A concentração linear da carga  $q_1$ , em um furo de diâmetro  $D$  e uma densidade  $\rho_e$ , é calculada a partir da equação:

$$q_1(kg/m) = 7,854 * 10^{-4} * \rho_e * D^2 \quad (6)$$

EM que:

- $\rho_e$  = densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>)
- $D$  = Diâmetro de carga (mm)

De acordo com Silva (2009), quando os furos apresentam uma grande profundidade, um fenômeno que pode estar presente é a variação da densidade do explosivo ao longo desses furos como consequência do aumento de pressão. A figura X mostra as curvas correspondentes à densidade de carregamento ou efetiva em função da altura para uma emulsão com uma densidade de 1,02 g/cm<sup>3</sup> e uma densidade básica de 1,35 g/cm<sup>3</sup>, carregada em furos de 250 mm de diâmetro. Além disso, explosivos com densidade igual ou inferior a 1 não devem ser utilizados em furos que contenham água. Em detonações, em que uma fina fragmentação é desejada, recomenda-se um explosivo de maior densidade. Para rochas fragmentadas in situ, ou onde não é requerida uma fragmentação demasiada, um explosivo de baixa densidade será suficiente.

### 2.2.2 Velocidade detonação

Em Silva (2009), a velocidade de detonação (VOD) de um explosivo é a velocidade com a qual a reação se propaga através do explosivo, e em desmonte, isto significa ao

longo da coluna de explosivo no furo. Cada tipo de explosivo tem sua própria velocidade de detonação, que depende dos seus componentes químicos, densidade, confinamento e diâmetro da carga.

Atualmente, a velocidade de detonação (VoD) é a única propriedade de detonação que pode ser determinada facilmente nos furos. Provavelmente, por essa razão, tem-se atribuído uma grande importância a essa velocidade.

A VOD controla a taxa em que a energia do explosivo é liberada e, por consequência, a proporção da energia de choque em relação às parcelas que compõem a energia total. Um explosivo com uma VOD relativamente baixa libera sua energia total com uma taxa mais lenta e uma proporção maior da energia total, normalmente, está em forma de pressão de gás. Já um explosivo de alta velocidade é considerado de alta energia de choque ou brisância. Quanto mais alta a VOD, maior é a capacidade do explosivo de quebrar a rocha.

De acordo com Silva (2009) a medição da velocidade de detonação dos explosivos tem os seguintes objetivos:

- Determinar a velocidade de detonação do explosivo, para que, a partir da mesma, seja calculada a pressão produzida no furo durante a detonação;
- Comparar o desempenho do explosivo quando iniciado com diferentes escorvas, acessórios e diferentes materiais utilizados para o confinamento do tampão;
- Verificar se os explosivos e acessórios estão detonando de acordo com o valor fornecido pelos fabricantes.

### 2.2.3 Pressão de detonação

A pressão de detonação é a pressão exercida dentro da frente de detonação, ou seja, é a pressão da onda de detonação enquanto percorre a carga explosiva. Essa pressão é a principal responsável por gerar uma onda de choque na rocha circundante à carga explosiva. A magnitude dessa onda reflete a energia de choque do explosivo, sendo seu efeito responsável pela fratura da rocha (CUNHA, 2014).

A pressão de detonação é uma função da densidade do explosivo e da velocidade de detonação. A equação (2) usualmente aceita para o cálculo da pressão de detonação (Pd), em MPa, é dada por:

$$PF = \rho \frac{VOD^2}{4} 10^{-6} \quad (7)$$

sendo:

- PF = pressão produzida no furo, quando o explosivo está completamente acoplado ao furo (GPa);
- $\rho$  densidade do explosivo (g/cm<sup>3</sup>);
- VOD = velocidade de detonação de um explosivo confinado (m/s).

De acordo com Silva (2009), uma das formas de se verificar o desempenho de um explosivo é comparar a pressão produzida no furo com a resistência dinâmica do maciço rochoso. Caso a pressão produzida no furo durante a detonação não supere a resistência dinâmica da rocha, esta não será fragmentada, fazendo com que a energia não utilizada no processo de fragmentação e deslocamento da rocha, se propague no terreno sob a forma de vibração.

#### 2.2.4 Energia de um explosivo

De acordo com Silva (2009) A finalidade da aplicação de um explosivo em um desmonte é gerar trabalho útil. A energia liberada pelo explosivo em um furo é utilizada da seguinte forma: pulverização da rocha nas paredes do furo, rompimento da rocha, produção de calor e luz, movimento da rocha, vibração do terreno e sobrepressão atmosférica. No passado, a energia de um explosivo era medida em função da porcentagem de nitroglicerina (NG) contida no mesmo. Um explosivo que possuía 60% de (NG) em peso era qualificado como tendo força de 60%. Acontece que os explosivos modernos, especialmente os agentes detonantes, não possuem NG nas suas formulações, daí a necessidade de se estabelecer um novo padrão de comparação. Na atualidade, os seguintes conceitos são utilizados:

- **RWS - Relative Weight Strength (Energia relativa por massa):** é a energia disponível por massa de um explosivo x, comparada com a energia disponível para mesma massa de um explosivo tomado como padrão. Normalmente o ANFO é tomado como o explosivo padrão. O cálculo do RWS é feito através da seguinte expressão:

$$RWS = \frac{ET_x}{ET_p} \quad (8)$$

Onde:

- $ET_x$  = Energia termoquímica do explosivo
- $ET_p$  = Energia termoquímica padrão(ANFO)

- **RBS - Relative Bulk Strength (Energia relativa por volume):** é a energia disponível por volume de um explosivo x, comparada com a energia disponível por igual volume de um explosivo tomado como padrão. Isto é:

$$RBS = \frac{ET_x}{ET_p} * \frac{\rho_x}{\rho_p} = RWS \frac{\rho_x}{\rho_p} \quad (9)$$

Onde:

- $\rho_x$  = Densidade do explosivo
- $\rho_p$  = Densidade do explosivo padrão(ANFO)

## 2.3 MACIÇO ROCHOSO

Não existem na literatura tentativas teóricas de definição dos parâmetros de detonação baseados em simples propriedades do maciço rochoso, devido à complexidade da rocha, como material, e da detonação, como processo. De qualquer forma, tem havido muitas tentativas de se definir a blastabilidade das rochas baseadas em observações de casos particulares de desmonte de rochas. A maioria destas tentativas trata a rocha como um material homogêneo e frágil (SILVA, 2014).

### 2.3.1 Índice de blastabilidade de Lilly

Lilly (1986) desenvolveu um índice de blastabilidade baseado na densidade e orientação das descontinuidades, densidade e dureza da rocha. O índice foi correlacionado com a razão de carga para detonação em minas a céu aberto de minério de ferro. Os parâmetros de caracterização de Lilly estão descritos na tabela 7.

**Tabela 2.7 – Parâmetros da classificação do índice de blastabilidade de Lilly**

	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Descrição do maciço rochoso	Friável, Blocado, Maciço	10, 20, 50
JPS	Orientação das fraturas	Pequeno (<0,10m), Intermediário (0,10 a 1m), Grande (>1m)	10, 20, 50
Continua na próxima página			

Tabela 2.7 – Continuação da página anterior

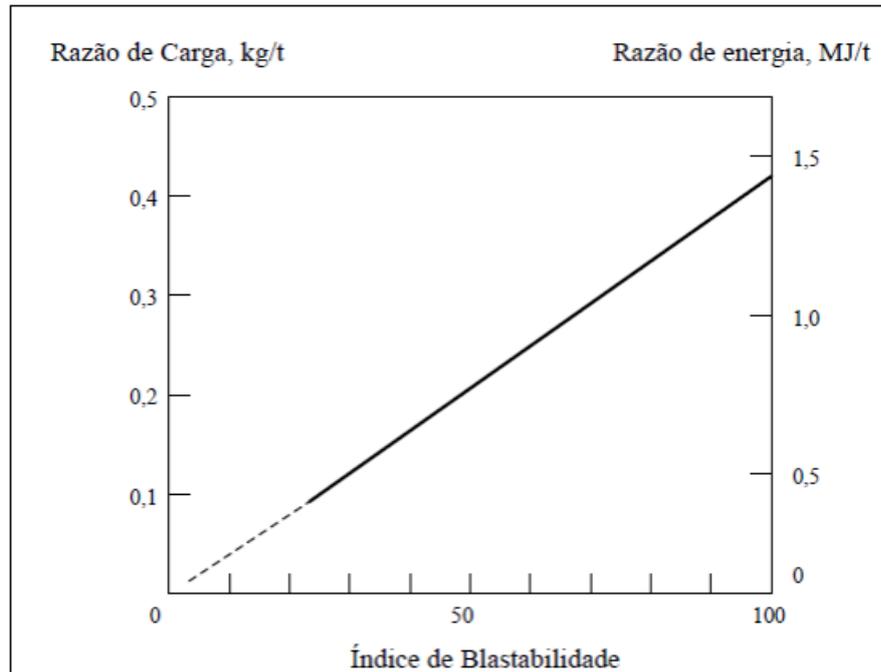
	Descrição	Classificação	Índice
JPO	Orientação do plano das fraturas	Horizontal, Mergulhado para fora da face livre, Direção perpendicular à face livre, Mergulhado para dentro da face	10, 20, 30, 40
SGI	Influência da densidade (d: densidade da rocha intacta, g/cm <sup>3</sup> )	SGI = 25d - 50	
H	Dureza de Mohr	1 a 10	

Fonte: Lilly (1986)

$$BI = 0,5(RMD + JPS + JPO + SGI + H) \quad (10)$$

Para usar o modelo Lilly como uma ferramenta de projeto de desmonte é necessário desenvolver uma correlação entre o índice de blastabilidade e a razão de carga requerida para a quebra do maciço rochoso. Esta correlação é específica para cada local e deve ser desenvolvida a partir de dados históricos de uma série de detonações, sobre várias condições. Dados históricos das minas localizadas no nordeste da Austrália foram usados para a construção da curva: razão de carga de ANFO x índice de blastabilidade, como mostra a Figura 2.7. Tipicamente, essas minas são de grande escala e operação com escavadeiras. O ANFO é o explosivo primário utilizado. Um valor BI de 100 refere-se à rocha extremamente resistente, maciça e densa (densidade de 4,0 g/cm<sup>3</sup>). O eixo com o fator de energia foi adicionado ao gráfico de Lilly para permitir comparações com outros explosivos (HUSTRULID, 1999).

Figura 2.7 – Uso do explosivo como função do índice de blastabilidade



Fonte: Lilly (1986)

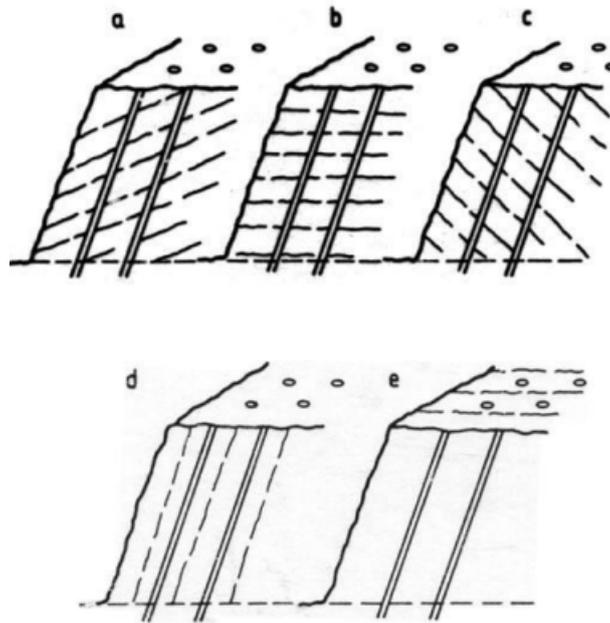
### 2.3.2 Fator da rocha

Para melhor quantificar o índice de blastabilidade proposto por Lilly (1986), foram feitas algumas alterações e proposta a seguinte equação para representar o fator da rocha:

$$A = 0,06(RMD + RDI + HF) \quad (11)$$

Os diferentes fatores estão definidos na tabela 8. Normalmente, o fator da rocha  $A$  varia de 1 para as rochas de fácil fragmentação, até 12 para as rochas extremamente difíceis de se detonar. A Figura 2.8 ilustra as principais orientações das descontinuidades com relação à face livre da detonação.

Figura 2.8 – Ilustração da direção e mergulho das fraturas com relação à face livre. (a) mergulhando para fora da face livre, (b) horizontal, (c) mergulhando para dentro da face livre, (d) paralela à face livre e (e) perpendicular à face livre



Fonte: Lilly(1986)

Tabela 2.8 – Classificação do fator da rocha

	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Descrição do 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	Oversize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção e mergulho com relação a 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)		

Fonte: Silva (2009)

## 2.4 MODELO DE SIMULAÇÃO DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS KUZ-RAM

Neste modelo as propriedades das rochas, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas usando cinco equações que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram (LILLY, 1986):

- **Teoria de quebra** : a quantidade de quebra que ocorre com uma conhecida quantidade de energia de um explosivo que pode ser estimada usando a equação de Kuznetsov (1973).

$$X_{50} = A \left[ \frac{V_o}{Q_e} \right]^{0.80} Q_e^{\frac{1}{6}} \left[ \frac{E}{115} \right]^{\frac{-19}{30}} \quad (12)$$

Onde:

- $X_{50}$  é o tamanho médio de partícula (cm);
  - A é o fator da rocha;
  - $V_o$  é o volume de rocha desmontada por furo ( $m^3$ );
  - $Q_e$  é a massa do explosivo utilizado (kg) e representa a energia relativa em massa (RWS);
  - E representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparado ao ANFO (ANFO=100).
- **Teoria da distribuição do tamanho das partículas de Rosin-Rammler:** a distribuição do tamanho das partículas da rocha fragmentada pode ser determinada a partir do tamanho médio, se o modelo de quebra é conhecido

$$P = 100 \left[ 1 - e^{-0.693 \left( \frac{x}{X_{50}} \right)^n} \right] \quad (13)$$

- P é o percentual passante;
- X é o tamanho da malha da peneira;
- n é o índice de uniformidade.

- **Teoria de detonação do explosivo:** a quantidade de energia liberada pelo explosivo é calculada usando a equação de Tidman.

$$E = \left( \frac{VOD_e}{VOD_n} \right)^2 RWS \quad (14)$$

Onde:

- E é a energia efetiva relativa por massa do explosivo;
  - $VOD_e$  é a velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo);
  - $VOD_n$  é a velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s);
  - RWS representa a energia por massa relativa ao ANFO (%).
- **Correlação dos parâmetros do plano de fogo de Cunningham (2005):** existe uma correlação entre as várias configurações dos planos de fogo e o modelo de fragmentação da rocha.

$$n = \left[ 2.2 - 14 \left( \frac{B}{D} \right) \right] \left[ \frac{\left( 1 + \frac{S}{B} \right)}{2} \right]^{0.5} \left[ \left( 1 - \frac{W}{B} \right) \frac{L}{H} \right] \quad (15)$$

Onde:

- B é o afastamento (m);
- S é o espaçamento (m);
- D é o diâmetro do furo (mm);
- W é o desvio padrão da perfuração (m);
- L é o comprimento total de (m);
- H é a altura do banco (m).

Quando se utiliza dois explosivos no furo (carga de fundo e carga de coluna) a equação é modificada para:

$$n = \left[ 2.2 - 14 \left( \frac{B}{D} \right) \right] \left[ \frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right]^{0.5} \left\{ \left( 1 - \frac{W}{B} \right) \left[ \text{abs} \frac{BCL - CCL}{L} + 0.1 \right]^{0.1} \left( \frac{L}{H} \right) \right\} \quad (16)$$

Onde:

- BCL é o comprimento da carga de fundo (m);
- CCL é o comprimento da carga de coluna (m);
- abs é o valor absoluto referente a  $(BCL - CCL)/L$ .

- Correlação dos tipos de rochas de Lilly (1986): as propriedades e características do maciço rochoso interferem no resultado da fragmentação da detonação. A classificação geomecânica de Lilly, e posteriormente modificada por Cunningham, é utilizada no modelo de fragmentação de Kuz-Ram.

$$A = 0.06(RMD + RDI + HF) \quad (17)$$

Onde:

- A é o fator rocha;
- RMD é obtido a partir da classificação geomecânica de Lilly.

E os demais parâmetros são obtidos com o auxílio das equações:

$$RDI = 25d - 50 \quad (18)$$

$$HF = \frac{E}{3} \quad \text{se } E < 50 \text{ GPa} \quad (19)$$

$$HF = \frac{UCS}{5} \quad \text{se } E > 50 \text{ GPa} \quad (20)$$

Onde:

- D é a densidade da rocha;
- E representa o módulo de Young (GPa);
- UCS a resistência à compressão uniaxial da rocha (MPa).

A classificação completa para a obtenção do fator da rocha foi apresentada na tabela 4, na página 38.

## 2.5 TRABALHOS REALIZADOS NESSA ÁREA

Em Moraes et al. (2004) é apresentado um modelo de simulação para fragmentação de desmontes por explosivos, desenvolvido a partir de uma revisão bibliográfica dos modelos Kuz-Ram e TCM. O simulador, SIMBLAST, foi testado nas minas de minério de ferro e cobre de Carajás e utilizado para reduzir a geração de finos em detonações de hematita dura e determinar planos de fogo para adequação da fragmentação na britagem primária do cobre. Dados de campo e laboratório foram utilizados para garantir confiabilidade nos resultados. Alterações no plano de fogo foram recomendadas para reduzir a geração de finos em detonações de hematita dura e a curva simulada apresentou boa aderência com a curva determinada pela fotoanálise na detonação de granito na mina de cobre de Sossego.

Em Morin e Ficarazzo (2006) é desenvolvido um simulador baseado a partir de uma revisão bibliográfica do modelo de Kuz-Ram e dos métodos de Monte Carlo que pudesse fornecer uma estimativa razoável da fragmentação de explosões para o projeto de detonações em minas a céu aberto. O simulador Monte Carlo pode ser usado para alcançar projetos de fragmentação consistentes para diferentes massas de rocha ou otimizar a fragmentação para maximizar o desempenho de circuitos de britagem e moagem. No entanto, uma das desvantagens da simulação é que é necessário uma grande quantidade de dados de campo, o que pode ser caro e demorado para coletar. Mas com um pouco de esforço, muitas dessas informações podem ser coletadas durante as operações regulares de perfuração e desmonte. Em resumo, o simulador desenvolvido neste estudo parece desempenhar bem o seu papel, mas é necessário mais trabalho para validar completamente esta abordagem e verificar sua utilidade e aplicabilidade a longo prazo.

## 2.6 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

Python é uma linguagem de programação popular e versátil, criada em 1991 por Guido van Rossum em homenagem ao grupo de comédia britânico Monty Python. Segundo as palavras do próprio criador Rossum et al. (1995), o pressuposto era criar uma linguagem de programação fácil de aprender e ler. Desde então, Python cresceu para se tornar uma das linguagens de programação mais utilizadas em uma ampla gama de aplicações, incluindo desenvolvimento de software, análise de dados e aprendizado de máquina (MCKINNEY, 2012).

Python é uma linguagem multiparadigma, o que significa que ela suporta diferentes abordagens de programação, incluindo programação imperativa, orientada a objetos e funcional. Por ser orientada a objetos, permite que o desenvolvedor crie estruturas de código mais organizadas, reutilizáveis e de fácil manutenção. Além disso, Python é uma linguagem de programação interpretada, o que significa que o código é executado diretamente, sem a necessidade de um processo de compilação (MCKINNEY, 2012).

Para desenvolvimento de software, a biblioteca padrão do Python fornece uma ampla gama de ferramentas, incluindo o módulo tkinter para desenvolvimento de interfaces gráficas de usuário, o módulo matplotlib para visualização de dados em gráficos, e os módulos pandas e numpy para manipulação e análise de dados (MCKINNEY, 2012).

O módulo tkinter fornece uma interface simples para a criação de interfaces gráficas de usuário em Python. O tkinter é baseado na biblioteca Tk, que foi originalmente desenvolvida para a linguagem Tcl. O módulo fornece uma ampla gama de widgets gráficos, incluindo botões, caixas de texto e menus, que podem ser facilmente integrados em um aplicativo Python.

Para visualização de dados, o módulo `matplotlib` é bastante utilizado, fornece uma ampla gama de gráficos, incluindo gráficos de linha, barra e dispersão. O módulo é altamente personalizável e pode ser usado para criar gráficos complexos e visualizações de dados.

Já os módulos `pandas` e `numpy` são amplamente utilizados para manipulação e análise de dados em Python. De acordo com McKinney (2012), o `pandas` é uma biblioteca de análise de dados de código aberto que fornece estruturas de dados flexíveis e poderosas para manipulação de dados. O `numpy`, por sua vez, é uma biblioteca de computação científica que fornece uma ampla gama de ferramentas para trabalhar com arrays multidimensionais e matrizes.

Em resumo, Python é uma linguagem de programação versátil e poderosa, que pode ser usada em uma vasta gama de aplicações. Com sua extensa variedade de bibliotecas e módulos, Python é particularmente adequado para desenvolvimento de software e análise de dados.

## 2.7 GIT E GITHUB

Git é um sistema de controle de versão distribuído bastante utilizado para gerenciar projetos de software. Ele permite que desenvolvedores trabalhem em equipe em um mesmo projeto, acompanhando as alterações realizadas em cada arquivo e revertendo mudanças quando necessário. O Git também possibilita a criação de branches para trabalhar em funcionalidades isoladas e o merge dessas branches ao final do desenvolvimento.

Já o GitHub é uma plataforma online que utiliza o Git como base para hospedar repositórios de código. Ela permite que desenvolvedores colaborem em projetos open source ou privados, contribuindo com código, realizando revisões, reportando problemas e solicitando modificações. Além disso, o GitHub oferece diversas funcionalidades, como integração com ferramentas de CI/CD, gerenciamento de issues e pull requests, e organização de projetos em boards e milestones.

### 3 METODOLOGIA

Na introdução, deste trabalho, foram discutidos: a importância do processo de desmonte com o uso de explosivos e sua aplicação, foi citado o modelo de Kuz-Ram que se baseia segundo parâmetros e permite simular o desmonte para tentar prever a curva granulométrica resultante.

A seguir foi feita uma revisão bibliográfica falando sobre os parâmetros do plano de fogo, do explosivo, dos parâmetros da rocha, do modelo de previsão de fragmentação criado por Claude Cunningham (Kuz-Ram), sobre a linguagem de programação Python que foi utilizada no desenvolvimento do software, juntamente com o sistema de controle de versão GIT.

O restante do trabalho dedica-se a apresentar:

- Orientações gerais para o uso da primeira versão do software;
- Apresentação de um exemplo numérico;
- É apresentada a possibilidades de novas versões do programa.

MineSoft é um software de lavra a céu aberto que em seu atual estágio de desenvolvimento faz simulação de curva granulométrica de desmonte de rochas, desenvolvido na linguagem Python. Atualmente, focado na operação unitária de desmonte.

Em sua primeira versão, o programa permite que os usuários simulem curvas granulométricas distintas a partir do modelo mais básico de Kuz-Ram. A Figura 9 ilustra a tela inicial do programa, onde o usuário poderá insere os dados de entrada (inputs) e terá como saída (output) a curva granulométrica, além de outras informações sobre a simulação.

Figura 3.1 – Tela inicial

MineSoft by Mizael Correia

Estimacao da curva Banco de dados dos explosivos Documentação

### Dados do explosivo

Explosivo da carga de fundo

Densidade do explosivo da carga de fundo 0.0

Força peso da carga de fundo 0.0

Altura da carga de fundo 0.0

Explosivo da carga de coluna

Densidade do explosivo da carga de coluna 0.0

Força peso da carga de coluna 0.0

### Variáveis controláveis

Diametro do furo (pol.) 0.0

Altura de bancada (m.) 0.0

Afastamento (m.) 0.0

Espaçamento (m.) 0.0

Sub-furação (m.) 0.0

Tampão (m.) 0.0

Desvio de furo (m.) 0.0

Malha de perfuração

### Propriedades da rocha

Fator da rocha 0.0  [Mais informações!](#)

Densidade da rocha (kg/m3) 0.0

[Simular curva granulométrica](#)

Fonte: Autor (2023).

## 4 CASO DE APLICAÇÃO

No caso em questão, ao analisar um projeto de desmonte em uma operação de mineração a céu aberto, encontramos um banco de dados de explosivos armazenados em planilhas do Excel que precisam ser copiados e colados em outra planilha para prever como a rocha será fragmentada após o desmonte - isso é baseado no cálculo de uma equação, o modelo Kuz-Ram.

Figura 4.1 – Planilha

1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	Previsão de fragmentação para desmonte de rochas							Obs: Na Pedreira Esperança, há resistências localizadas a aproximadamente 400 m de distância do local da detonação.								
3	Espaços a serem preenchidos															
4	Espaços calculados			JF = JPS + JPA												
5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
7	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
8	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
9	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
11	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
12	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
13	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
15	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
16	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
17	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
18	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
19	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
22	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
23	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
24	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
25	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Fonte: Jairo (2016).

Como podemos, então, resolver o problema?

Em vez de continuar usando arquivos do Excel para armazenar os dados dos explosivos e realizar cálculos, consideramos a possibilidade de criar uma interface gráfica do usuário (GUI) para desktop que pudesse lidar com os dois principais processos para obter uma curva granulométrica:

A GUI foi construída com Tkinter, que oferece diversas funcionalidades para aplicativos desktop.

1 - Inserção, visualização, atualização e exclusão de dados em uma tabela de banco de dados, uma vez que temos um banco de dados SQLite, podemos realizar várias operações:

```

1
2 class Database:
3     def __init__(self, db):
4         """

```

```

5     Connects to the dbase.
6     Args:
7         db (.db file): path of the db file
8     """
9     # Connect to db
10    self.conn = sqlite3.connect(db, check_same_thread= False)
11    # Allow to execute statements
12    self.c = self.conn.cursor()
13    # Make sure that the table for explosives exist
14    self.c.execute(
15        "CREATE TABLE IF NOT EXISTS explosives \
16            (id INTEGER PRIMARY KEY, name FIXED,\
17            density FLOAT, VOD INTEGER,\
18            Deton_Pressure FLOAT, Energy FLOAT, Weigth_S FLOAT)"
19        )
20
21    def insert(self, name, density, vod, detpre, energy, wes):
22        """
23        Insert properties for a new explosive. This comes from
24        some input boxes Args:
25            name (str) : Name of the explosive
26            density(float) : Density of the ..
27            vod (float) : Velocity of detonation
28            detpre (float) : Detonation Pressure
29            energy (float) : Energy
30            wes (float) : Weigh pressure compared to ANFO
31        """
32        # First one for id
33        self.c.execute(
34            "INSERT INTO explosives VALUES (NULL, ?, ?, ?, ?, ?, ?)",
35            (name, density, vod, detpre, energy, wes)
36        )
37        self.conn.commit()
38
39    def view(self):
40        """ Show row data from explosives table in the GUI"""
41        self.c.execute(
42            "SELECT * from explosives"
43        )

```

```

44     # Show them in a list - this is the best way
45     # to show data in Tkinter TODO: might be another though
46     rows = self.c.fetchall()
47     return rows
48
49 def update(self, id, name, density, vod, detpre, energy, wes):
50     """ Will update the database if row added from insert method"""
51     self.c.execute(
52         "UPDATE explosives SET name = ?, density = ?, \
53         VOD = ?, Deton_Pressure =?, Energy = ?, \
54         Weigth_S = ? WHERE id = ?",
55         (name, density, vod, detpre, energy, wes, id)
56     )
57     self.conn.commit()

```

---

**Autor (2023)**

2- Cálculo de todas as variáveis do modelo Kuz-Ram, embora só o frontend do software seja descrito aqui.

Para calcular as variáveis necessárias para o modelo Kuz-Ram, foi preciso extrair os dados da tabela de explosivos do banco de dados SQLite. Em seguida, esses dados foram usados para calcular as variáveis de acordo com as equações do modelo Kuz-Ram. O código Python abaixo mostra a função utilizada para calcular as variáveis e armazená-las em uma tabela separada no banco de dados:

---

```

1
2 def solve_kuz_ram():
3     h_column = float(textbh.get()) - float(textstem.get()) +
4     float(textsd.get())
5     # Tons/hole
6     ton_hole = float(textbi.get()) * float(textsi.get()) *
7     float(textbh.get())
8     * float(textrd.get())
9     # Height of explosive that is in the column
10    (this is different dfor the bottom)
11    h_explosiv_column = h_column - float(texthf.get())
12    # Q for bottom as well for column
13    # Texthf is height of explosive at the bottom
14    bottom_charge = 0.5067 * float(

```

```

15     text_dens.get()
16     ) * (float(hole_diameter_text.get()) **2) * float(texthf.get())
17 column_charge = 0.5067 * float(
18     textdec.get()
19     ) * (float(hole_diameter_text.get()) **2) * h_explosiv_column
20 subdrilling_charge = 0.5067 * text_dens.get() * (
21     float(hole_diameter_text.get()) **2
22     ) * float(textsd.get())
23 # total Q, stemming is included
24 total_charge = bottom_charge + column_charge
25 # total Q, stemming is not included
26 total_charge_nostem = total_charge - subdrilling_charge
27 # WS of the whole hole
28 total_weight_strenght = 100*(
29     float(textweb.get()) * (bottom_charge - subdrilling_charge) +
30     float(textwec.get()) * column_charge
31     )/(bottom_charge + column_charge - subdrilling_charge)
32 # Power factor, which is in gr/ton
33 power_factor = total_charge * 1000 / ton_hole
34 # 50 prob which is in mm
35 # textrf is rockfactor
36 # textrd is rockdensity
37 d_50 = float(textrf.get()) * 10 * (
38     (ton_hole / (float(textrd.get()) * total_charge)
39     )**0.8
40     ) * (total_charge **(1/6)) *
41     ((115/total_weight_strenght) ** 0.633)
42 # Uniformity index
43 if pattern_text.get() == "Staggered":
44     pattern_value = 1.1
45 else:
46     pattern_value = 1
47 uniform_index = pattern_value * (
48     (
49     h_column - float(textsd.get())
50     )/float(textbh.get()) * (
51     2.2 - 14 * float(textbi.get())/
52     (float(hole_diameter_text.get()) * 25.4)
53     ) *(

```

```

54         (1 + float(textsi.get())/float(textbi.get()))/2
55     ) ** 0.5 * (1 - (float(textdd.get())/
56     float(textbi.get())) * (
57         abs(bottom_charge - column_charge) /
58         (bottom_charge+column_charge) + 0.1
59     ) ** 0.1
60     )
61     uniform_index = round(uniform_index, 2)
62     #Particular size
63     particular_size = d_50 / (0.693 ** (1/uniform_index))
64     particular_size = round(particular_size, 0)

```

Autor (2023)

#### 4.1 EXEMPLO NUMÉRICO

Essa seção se dedica a apresentar um exemplo de uma simulação, onde foram utilizados valores hipotéticos. A Figura 4.2 ilustra a inserção dos parâmetros de entrada do modelo.

Figura 4.2 – Primeira Aba

The screenshot shows the 'Primeira Aba' (First Tab) of the MineSoft software. The interface is divided into three main sections, each highlighted with a colored border:

- Dados do explosivo (Blue border):** This section contains input fields for explosive data. It includes dropdown menus for 'Explosivo da carga de fundo' and 'Explosivo da carga de coluna', and numerical input fields for 'Densidade do explosivo da carga de fundo', 'Força peso da carga de fundo', 'Altura da carga de fundo', 'Densidade do explosivo da carga de coluna', and 'Força peso da carga de coluna', all set to 0.0.
- Variáveis controláveis (Red border):** This section contains input fields for controllable variables. It includes numerical input fields for 'Diâmetro do furo (pol.)', 'Altura de bancada (m.)', 'Afastamento (m.)', 'Espaçamento (m.)', 'Sub-furação (m.)', 'Tampão (m.)', and 'Desvio de furo (m.)', all set to 0.0. It also has a dropdown menu for 'Malha de perfuração'.
- Propriedades da rocha (Green border):** This section contains input fields for rock properties. It includes numerical input fields for 'Fator da rocha' and 'Densidade da rocha (kg/m3)', both set to 0.0. There is a 'Mais informações!' button next to the 'Fator da rocha' field and a 'Simular curva granulométrica' button at the bottom.

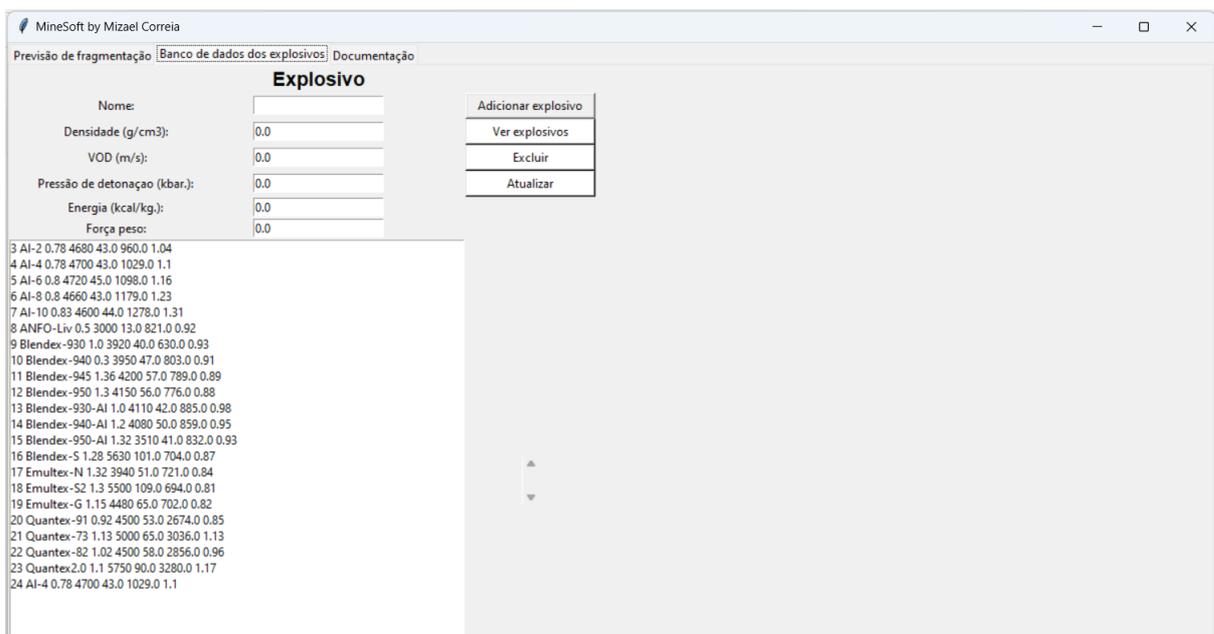
Fonte: Autor (2023)

Destacado em verde na Figura 4.2, estão as propriedades da rocha, o fator de rocha pode ser obtido a partir da classificação geomecânica do maciço rochoso, Tabela 1,

a ser desmontado ao lado do campo Fator da rocha há um botão com uma interrogação “?”. Ao clicar nesse botão uma abrirá janela que permitirá classificar o maciço e, sendo a rocha já caracterizada, deve ser informada sua densidade.

Destacados em azul na Figura 4.2, estão os parâmetros do explosivo que já estão carregados em um banco de dados que pode ser acessado na segunda aba, bastando só preencher a altura da carga de fundo. A Figura 4.3 ilustra a segunda aba onde é possível ver os explosivos já adicionados, excluir ou adicionar algum novo.

**Figura 4.3 – Segunda Aba**

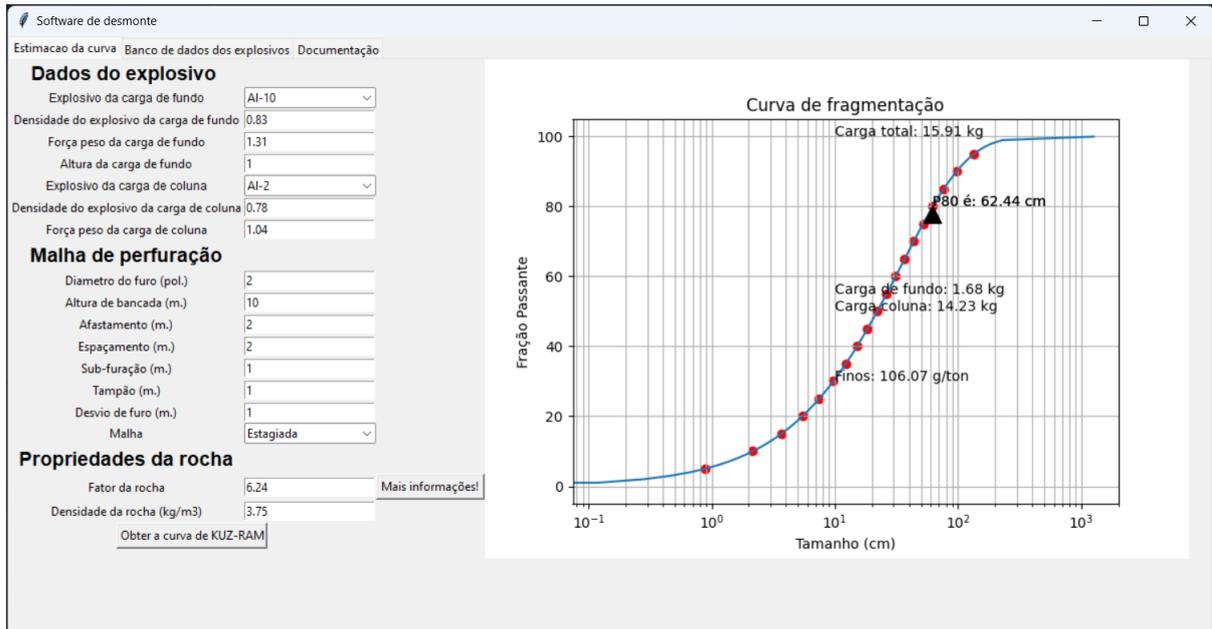


**Fonte: Autor(2023).**

Destacados em vermelho na Figura 4.2, estão os parâmetros da bancada que são diâmetro do furo, altura da bancada, afastamento, espaçamento, sub-furação, tampão, desvio de furo, e o tipo de malha que pode ser quadrada ou estagiada.

A Figura Figura 4.4 mostra o resultado da simulação (curva granulométrica) e outras informações da simulação são apresentadas: quantidade explosivo na coluna, no fundo, total, o tamanho passante em 80% e a quantidade de finos gerados considerando tamanhos menos que 10 cm.

Figura 4.4 – Resultado



Fonte: Autor (2023).

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A criação do software para simulação de desmonte de rochas torna este projeto relevante, uma vez que permitirá apresenta diversas vantagens em relação ao método tradicional de planejamento manual ou por planilhas do Excel. Uma das principais vantagens é a possibilidade de simulação virtual do desmonte, permitindo que os engenheiros possam visualizar e analisar diferentes cenários antes da execução do desmonte.

Na sua primeira versão, o Software MineSoft apresenta apenas o modelo Kuz-Ram implementado, o qual possui limitações como a baixa capacidade de prever fragmentos finos, não levar em consideração os tempos de retardo e só pode ser implementado para desmontes a céu aberto.

A expectativa futura é de que esse programa seja ampliado, aperfeiçoado e aprofundado, incorporando novos modelos matemáticos, incluindo versões mais recentes de Kuz-Ram que levem em consideração outros parâmetros, bem como modelos que possam ser aplicados a diferentes tipos de desmonte, como o subaquático e o subterrâneo. Adicionalmente, espera-se que haja um cálculo mais preciso do custo do desmonte, previsão de onda de choque e ultralaçamento, além de uma sequência de iniciação que leve em conta os retardos. Uma sugestão é a implementação de um algoritmo de aprendizado de máquina para determinar a sequência mais adequada. Outro ponto relevante é a otimização do plano de fogo, utilizando técnicas de pesquisa operacional, bem como a visualização em 3D do banco a ser desmontado e da pilha resultante por meio do sistema BIM. Com tais melhorias, o programa alcançará um nível mais sofisticado e eficiente, proporcionando benefícios significativos para o processo de desmonte e suas aplicações em diversas áreas.

## REFERÊNCIAS

- CUNHA, E. B. **Avaliação do desmonte de rochas com explosivos por análise de imagens digitais**. Goiás, Brasil: [s.n.], 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas).
- CUNNINGHAM, C. The kuz-ram fragmentation model—20 years on. In: EUROPEAN FEDERATION OF EXPLOSIVES ENGINEERS, ENGLAND. **Brighton conference proceedings**. [S.l.], 2005. v. 2005, p. 201–210.
- FILHO, J. J. d. M. **Estimativa da granulometria resultante de desmonte de rocha utilizando o método de Kuz-ram**. Pernambuco: [s.n.], 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas).
- HUSTRULID, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining, Vol 1**. [S.l.]: Balkema, 1999.
- JIMENO, L. F.; SÁNCHEZ, C. C.; JIMENO, C. L. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Madrid, Espanha: Paraninfo, 2003.
- KUZNETSOV, V. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. **Soviet Mining Science**, p. 144–148, 1973.
- LILLY, P. An empirical method of assessing rock massing blastability. In: **Large Open Pit Mining Conference**. The AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, Austrália: [s.n.], 1986. p. 89–92.
- MACEDO, C. E. M. **OTIMIZAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS NO DESMONTE DE BANCADAS COM EXPLOSIVOS**. Goiás: [s.n.], 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas).
- MCKINNEY, W. **Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2012.
- MORAIS, J. L. de et al. Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos. Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- MORIN, M. A.; FICARAZZO, F. Monte carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the kuz-ram model. **Computers & geosciences**, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 352–359, 2006.
- ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. et al. **Python reference manual**. [S.l.]: Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- SILVA, A. C. S. S. **Simulação e Análise da Fragmentação do Desmonte de Rochas na Pedreira Herval - Barreiros - PE**. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineralúrgica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, 2014.
- SILVA, V. C. Curso de min 210—operações mineiras. **Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas**, 2009.