



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**YANNA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR**

**DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS  
DE PLANO DE FOGO E PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO ATRAVÉS DO  
MODELO KUZ-RAM EM DESMONTE DE ROCHAS PARA LAVRA A CÉU  
ABERTO POR BANCADAS**

**CRATEÚS**

**2026**

YANNA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DE  
PLANO DE FOGO E PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO ATRAVÉS DO MODELO  
KUZ-RAM EM DESMONTE DE ROCHAS PARA LAVRA A CÉU ABERTO POR  
BANCADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Campus Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.

Coorientador: Especialista Antonio Airton da Silva Neto

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A233d Aguiar, Yanna Milanez Rodrigues.  
Desenvolvimento de um aplicativo para cálculo de parâmetros de plano de fogo e previsão da fragmentação através do modelo Kuz-Ram em desmonte de rochas para lavra a céu aberto por bancadas / Yanna Milanez Rodrigues Aguiar. – 2026.  
50 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2026.  
Orientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.  
Coorientação: Prof. Esp. Antonio Airton da Silva Neto.
1. Lavra a Céu Aberto. 2. Desmonte de Rochas. 3. Previsão da Fragmentação. 4. Modelo Kuz-Ram. 5. Aplicativo. I. Título.
- 

CDD 622

YANNA MILANEZ RODRIGUES AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DE  
PLANO DE FOGO E PREVISÃO DA FRAGMENTAÇÃO ATRAVÉS DO MODELO  
KUZ-RAM EM DESMONTE DE ROCHAS PARA LAVRA A CÉU ABERTO POR  
BANCADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas do Campus Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.

Coorientador: Especialista Antonio Airton da Silva Neto

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Especialista Antonio Airton da Silva Neto (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Josenildo Isidro dos Santos Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Rafael Chagas Silva  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A Deus.

À minha família, namorado e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me permitir compartilhar este momento com as pessoas que amo.

À minha mãe, Wilcilene Milanez Aguiar Rodrigues, por ter me estimulado a buscar conhecimento desde que tomei consciência da minha própria existência, por participar da minha vida como mãe e pedagoga e ter me ensinado que os estudos são a base de tudo. Agradeço pelo seu apoio constante, que me motivou a buscar uma nova realidade.

À minha irmã, Milena Milanez Rodrigues Aguiar, por ter me auxiliado na graduação, pela assistência em nossos anos de faculdade juntas, sou extremamente grata por sua companhia, senti-me acolhida por você.

Ao meu namorado, Francisco Thalison Sales Macêdo, sou profundamente grata pela sua companhia e apoio. Reconheço a sua ajuda nos momentos difíceis que enfrentei, agradeço por estar presente e me ajudar a encontrar uma solução a cada empecilho enfrentado. Sua confiança em mim é de grande auxílio em minha caminhada, sua ajuda foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da faculdade, em especial Levy, Francisca Eloísa, Tiffany, Samile Vitória, Maria Vitória, Lara e Rodrigo, agradeço pela companhia e ajuda.

Ao Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira e ao Especialista Antonio Airton da Silva Neto, por terem aceitado orientar esta pesquisa. Sou grata por suas orientações pacientes e pelas sugestões dadas ao longo deste trabalho.

“Nada é tão necessário para o homem como a certeza de que está no caminho certo.”  
(TOLSTÓI, 2003, p. 619).

## RESUMO

O desmonte de rocha por meio do uso de explosivos é a operação de lavra responsável pela fragmentação do maciço rochoso em granulometrias menores para as etapas posteriores de carregamento, transporte e beneficiamento mineral, influenciando diretamente na produtividade, segurança e nos custos operacionais. A realização de um plano de fogo de forma segura e eficiente requer um planejamento adequado, fundamentado na análise detalhada de seus parâmetros geométricos, quantidade e tipo de explosivos. Além destes aspectos, outro fator considerado é a fragmentação resultante do desmonte. Por isso a predição da fragmentação gerada é fundamental, pois permite estimar a distribuição granulométrica a fim de reduzir os custos de britagem e transporte. Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um aplicativo em linguagem Python, por meio do pacote de *softwares* Anaconda e editor de código *Visual Studio Code*, com intuito de calcular os parâmetros de plano de fogo do método de lavra em bancadas da mineração a céu aberto e simular a fragmentação aplicando o modelo Kuz-Ram. Desta forma, a presente pesquisa buscou apresentar os parâmetros geométricos de um plano de fogo, aplicar o modelo Kuz-Ram para o cálculo de fragmentação e desenvolver um aplicativo computacional capaz de simular diferentes cenários, resultando nos valores dos parâmetros e na geração da curva de fragmentação. Estima-se que o desenvolvimento do aplicativo sirva como exemplo de aplicação prática da junção de conceitos de programação e engenharia e aplicação para fins acadêmicos.

**Palavras-chave:** desmonte de rochas; plano de fogo; fragmentação; modelo Kuz-Ram; aplicativo computacional.

## ABSTRACT

Rock blasting using explosives is the mining operation responsible for fragmenting the rock mass into smaller particle sizes for subsequent loading, transport, and mineral processing, directly influencing productivity, safety, and operational costs. Executing a blasting plan safely and efficiently requires adequate planning, based on a detailed analysis of its geometric parameters, quantity, and type of explosives. In addition to these aspects, another factor considered is the fragmentation resulting from the blasting. Therefore, predicting the generated fragmentation is fundamental, as it allows for estimating the particle size distribution in order to reduce crushing and transport costs. Given the above, the objective of this research is to develop an application in Python, using the Anaconda software package and a code editor Visual Studio Code, to calculate the blasting plan parameters for the bench mining method in open-pit mining and simulate fragmentation using the Kuz-Ram model. Therefore, this research aims to present the geometric parameters of a blasting plan, apply the Kuz-Ram model for fragmentation calculation, and develop a computer application capable of simulating different scenarios, resulting in parameter values and the generation of the fragmentation curve. It is estimated that the development of the application will serve as an example of the practical application of combining programming and engineering concepts, and as an application for academic purposes.

**Keywords:** rock blasting; blasting plan; fragmentation; Kuz-Ram model; computer application.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostra de ANFO granular da Enaex.....	18
Figura 2 - Emulsão encartuchada.....	19
Figura 3 - Variáveis de um plano de fogo.....	23
Figura 4 - Visual do Anaconda Navigator.....	31
Figura 5 - Etapas de desenvolvimento do aplicativo.....	33
Figura 6 - Visual do editor Visual Studio Code.....	35
Figura 7 - Teste do código preliminar contendo os cálculos básicos no Jupyter Notebook.....	36
Figura 8 - Desenvolvimento do aplicativo no editor Visual Studio Code.....	36
Figura 9 - Etapas de desenvolvimento e geração do aplicativo.....	37
Figura 10 - Interface gráfica do aplicativo desenvolvido em Python e Kivy.....	39
Figura 11 - Dados de entrada necessários para a realização dos cálculos.....	41
Figura 12 - Botões da tela de “Dados Obrigatórios”.....	42
Figura 13 - Opção de exportar dados do plano de fogo.....	42
Figura 14 - Opção de exportar dados da análise de fragmentação.....	42
Figura 15 - Simulação de dados de entrada.....	43
Figura 16 - Valores do plano de fogo calculados pelo aplicativo.....	44
Figura 17 - Gráfico da Curva de Fragmentação.....	45
Figura 18 - Resultado da análise da fragmentação.....	45

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	22
Equação 2.....	23
Equação 3.....	26
Equação 4.....	27
Equação 5.....	27
Equação 6.....	27
Equação 7.....	29
Equação 8.....	29
Equação 9.....	29
Equação 10.....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFO	Óleo Combustível de Nitrato de Amônio
cm	Centímetro
g	Gramma
GPa	Gigapascal
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
Kg	Quilograma
L	Litros
m	Metro
mm	Milímetro
NA	Nitrato de Amônio
s	Segundo
µm	Micrômetro

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1 Explosivos Industriais.....	17
3.1.1 ANFO.....	17
3.1.2 Emulsões.....	19
3.2 Propriedades dos Explosivos.....	20
3.2.1 Densidade do Explosivo.....	20
3.2.2 Energia de Detonação.....	21
3.2.3 Velocidade e Pressão de Detonação.....	21
3.2.4 Sensibilidade à Iniciação.....	22
3.3 Parâmetros Geométricos do Plano de Fogo de Lavra a Céu Aberto.....	22
3.3.1 Afastamento.....	23
3.3.2 Espaçamento.....	24
3.3.3 Diâmetro do Furo.....	24
3.3.4 Altura da Bancada.....	25
3.3.5 Subperfuração.....	25
3.3.6 Profundidade do Furo.....	25
3.3.7 Inclinação do Furo.....	26
3.3.8 Carga de Coluna e Carga de Fundo.....	26
3.3.9 Tampão.....	27
3.4 Modelo de Predição de Fragmentação de Rochas.....	28
3.4.1 Modelagem Empírica e Modelagem Mecanicista.....	28
3.4.2 Modelo de Fragmentação Kuz-Ram.....	28
3.5 Interface Computacional Aplicada à Mineração.....	30
3.5.1 Linguagem de Programação Python.....	31

4 METODOLOGIA.....	33
4.1 Procedimentos.....	33
4.2 Ambiente de Desenvolvimento do Aplicativo.....	34
4.2.1 <i>Desenvolvimento e Geração do Aplicativo</i> .....	35
4.3 Determinação dos Parâmetros do Plano de Fogo.....	37
4.4 Modelo Kuz-Ram.....	38
4.5 Cálculo dos Custos do Desmonte.....	38
4.6 Estrutura do Aplicativo.....	39
4.6.1 <i>Testes de Funcionamento e Limitações Metodológicas</i> .....	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1 Funcionamento do Aplicativo.....	41
5.2 Variáveis de Cálculo.....	41
5.3 Resultado do Cálculo do Plano de Fogo.....	43
5.4 Resultado da Simulação da Fragmentação Aplicando o Modelo Kuz-Ram.....	44
5.5 Análise dos Indicadores de Fragmentação.....	45
5.6 Discussão Geral dos Resultados.....	46
6 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

## 1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rochas por meio do uso de explosivos representa uma etapa essencial e estratégica na mineração, sendo responsável pela fragmentação do maciço rochoso em tamanhos adequados para o carregamento, transporte e subseqüentes operações de beneficiamento. Deste modo, trata-se de um processo determinante no desempenho das operações da mina, uma vez que influencia diretamente a produtividade, a segurança operacional e o custo total por tonelada produzida (OLIVEIRA, 2024).

Em tese, o desmonte de rochas com uso de explosivos envolve etapas de perfuração, carregamento dos explosivos, realização da ligação entre os furos e detonação planejada. Os parâmetros geométricos como afastamento, espaçamento, altura da bancada, diâmetro dos furos e subperfuração, devem ser cuidadosamente dimensionados para garantir uma ruptura eficiente da rocha, respeitando simultaneamente critérios de segurança, controle de vibração e qualidade da fragmentação (BHANDARI, 1997). Ao definir estes parâmetros incorretamente, os resultados possíveis são ultralançamento, formação de repés, desgaste dos equipamentos de escavação, aumento de finos ou fragmentos superdimensionados, afetando diretamente o rendimento das operações de britagem e peneiramento (JIMENO *et al.*, 1990).

Ademais, a etapa de dimensionamento do plano de fogo normalmente exige consultas sucessivas a fórmulas empíricas, tabelas e recomendações técnicas, o que torna o processo repetitivo e mais suscetível a erros de cálculo. Além disso, a necessidade de reavaliar cenários alternativos (variação do tipo de explosivo, geometria dos furos ou características do maciço) aumenta o tempo dedicado ao planejamento, potencializando falhas e dificultando a comparação entre diferentes arranjos. Deste modo, ferramentas computacionais surgem como alternativas fundamentais para otimizar essa etapa, automatizar cálculos, sistematizar informações e proporcionar maior consistência na elaboração de planos de fogo.

Outro aspecto essencial refere-se à fragmentação resultante do desmonte. A distribuição granulométrica dos fragmentos possui papel determinante no desempenho dos circuitos de cominuição, influenciando parâmetros como capacidade de britagem, consumo energético, desgaste de componentes e eficiência de peneiramento. No contexto de abordagens integradas do tipo *Mine-to-Mill*, a adequação da fragmentação pode gerar ganhos expressivos de produtividade, reduzir gargalos no processo e minimizar custos operacionais, reforçando a necessidade de ferramentas capazes de prever o comportamento granulométrico antes da execução do desmonte (CRC ORE, 2013).

Nesta conjuntura, modelos matemáticos de predição de fragmentação desempenham papel central. O modelo Kuz-Ram, baseado em análises empíricas e probabilísticas, permite estimar o tamanho médio dos fragmentos e a distribuição granulométrica a partir dos parâmetros de perfuração, características do explosivo e propriedades do maciço rochoso (CUNNINGHAM, 2005). A possibilidade de aplicar o modelo computacionalmente permite simular diferentes condições de desmonte, proporcionando maior controle técnico no processo de tomada de decisão.

Diante da crescente exigência por eficiência operacional, confiabilidade dos cálculos e agilidade no planejamento, torna-se oportuno o desenvolvimento de ferramentas computacionais dedicadas ao cálculo dos parâmetros do plano de fogo e à predição da fragmentação. Por conseguinte, um aplicativo capaz de reunir esses elementos: automatização dos cálculos, simulação granulométrica e interface amigável, representa uma importante contribuição ao estudo da integração entre programação e engenharia. Ademais, esta ferramenta reforça o potencial da computação como apoio ao planejamento de desmontes, oferecendo uma solução acessível, precisa e de fácil utilização.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um aplicativo computacional para o cálculo dos parâmetros do plano de fogo e a simulação da fragmentação do desmonte por meio do modelo Kuz-Ram em lavra a céu aberto por bancadas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Implementar, em Python, os cálculos necessários para determinar os parâmetros geométricos essenciais de um plano de fogo;
- Realizar o cálculo dos custos do desmonte no aplicativo a partir dos dados de entrada fornecidos pelo usuário;
- Integrar ao aplicativo a capacidade de simular a curva de fragmentação de um desmonte de rochas por explosivos utilizando o modelo Kuz-Ram;
- Desenvolver uma interface simples e funcional que permita ao usuário inserir dados, executar os cálculos e visualizar os resultados de forma prática.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico auxiliará na contextualização da pesquisa, apresentando os conceitos essenciais do estudo para corroborar com o entendimento do tema. Em síntese, serão apresentados os explosivos selecionados, os principais parâmetros geométricos de um plano de fogo a céu aberto, o modelo de predição de fragmentação Kuz-Ram e, finalmente, uma breve explicação sobre a linguagem Python.

#### 3.1 Explosivos Industriais

Os explosivos voltados para utilização civil são denominados de industriais, pois são controláveis, eficientes e mais seguros no manuseio, uma vez que apresentam baixa sensibilidade e uma menor velocidade de detonação. Dentre os explosivos comerciais empregados na mineração, destacam-se os agentes explosivos, utilizados devido à sua boa estabilidade, segurança relativa e desempenho adequado para furos de produção (JIMENO et al., 1990).

Especificamente, os agentes explosivos necessitam de ativação tendo em vista que não possuem explosivos em sua composição (JIMENO et al., 1990). Entretanto, quando combinados com outros componentes, podem se tornar misturas explosivas, como por exemplo, o Óleo Combustível de Nitrato de Amônio (ANFO) e as emulsões.

##### 3.1.1 ANFO

O ANFO é um agente explosivo oxidante composto majoritariamente de nitrato de amônio (NA) e óleo combustível, formando assim uma mistura explosiva. Deste modo, a proporção estequiométrica equivalente é de 95,3% de NA e 5,7% de gás-óleo, o equivalente a 3,7 litros deste último para cada 50 kg de NA (JIMENO *et al.*, 1990). A Figura 1 ilustra um exemplo típico do ANFO empregado em operações de desmonte.

Figura 1 - Amostra de ANFO granular da Enaex



Fonte: Enaex (2025).

Este agente detonante é comercializado em sua forma granular. Além disso, possui aspectos positivos em sua utilização, cabendo destacar: ocupa por inteiro o volume do furo, é altamente insensível ao choque e destaca-se pela minimização de custo dos explosivos (FREITAS; MORAIS, 2020). Contudo, é importante salientar algumas limitações do ANFO: como baixa resistência à água, densidade ( $0,85 \text{ g/cm}^3$ ) e necessidade de um iniciador especial (SILVA, 2009).

De acordo com Jimeno *et al.* (1990) o ANFO possui menor potência em relação a outros explosivos encartuchados, sendo mais indicado para rochas fraturadas; não obstante, apresenta baixo desempenho em rochas compactas devido a sua baixa velocidade de detonação. Ademais, para maciços muito fraturados, libera um grande volume de gases, até  $970 \text{ L/Kg}$ , quando iniciado corretamente (JUCÁ FILHO, 2022).

Outrossim, o ANFO deve ser aplicado preferencialmente em furos com diâmetro acima de  $50 \text{ mm}$ , uma vez que em diâmetros menores a velocidade de detonação diminui e pode acarretar uma deflagração (JIMENO *et al.*, 1990). Todavia, grandes diâmetros reduzem a sensibilidade do ANFO, sendo mais indicado para furos com diâmetros na faixa de  $150 \text{ mm}$  (JUCÁ FILHO, 2022).

Destaca-se que o baixo custo do ANFO é o principal atrativo para empresas de mineração de pequeno porte. Porém, a sua utilização pode ocasionar gastos adicionais se comparado o uso de outros explosivos, condicionados pelas desvantagens supracitadas (ARAÚJO, 2020). Assim, é de suma importância uma análise prévia para um possível emprego do ANFO em um desmonte de rochas de forma adequada.

### 3.1.2 Emulsões

As emulsões são compostas pelos seguintes constituintes: 77,3% de nitrato de amônio, 16,7% de água, 4,9% de óleo diesel e 1,1% de agentes emulsificantes (SILVA, 2009). Trata-se de uma mistura bifásica, em que uma solução aquosa de nitrato de amônio encontra-se dispersa em óleo combustível, característica fundamental para sua estabilidade e desempenho. Essa proporção pode variar, assim como podem ser adicionados sensibilizantes. Ademais, as emulsões podem ser classificadas principalmente em dois tipos: encartuchadas e bombeadas (a granel) (MEYER; KÖHLER; HOMBURG, 2016).

A emulsão encartuchada, Figura 2, é assim denominada quando embalada industrialmente. Por outro lado, se a emulsão for aplicada diretamente nos furos, sem embalagem, é classificada como bombeada (ARAÚJO, 2020). As emulsões explosivas sobressaem-se por serem versáteis, resistentes à água e segurança no manuseio, com destaque na forma encartuchada, tida como ideal para operações subterrâneas (MEYER; KÖHLER; HOMBURG, 2016).

Figura 2 - Emulsão encartuchada



Fonte: Enaex (2025).

De acordo com Olofsson (1990), as emulsões explosivas destacam-se principalmente por apresentarem elevada velocidade de detonação (VOD), superior à de misturas granulares como o ANFO, o que favorece uma transmissão de energia mais eficiente ao maciço rochoso, especialmente em rochas de alta competência.

Além disso, as emulsões explosivas apresentam elevada estabilidade físico-química devido à estrutura bifásica formada por microgotículas de solução oxidante dispersas em uma fase oleosa, característica que reduz a segregação e garante desempenho constante até o momento da detonação (MEYER; KÖHLER; HOMBURG, 2016).

Dessa forma, as emulsões são explosivos encartuchados ou bombeáveis podendo ser utilizadas em ambientes úmidos e alagados por apresentarem resistência à água, proporcionando segurança e eficiência nas operações (RICARDO; CATALANI, 2000). Conforme Oliveira (2024), por possuírem estrutura homogênea facilitam a etapa de carregamento em furos com diferentes orientações e profundidades e atendem com eficiência às demandas do desmonte de rochas.

Portanto, segundo Gomes *et al.* (2000), recomenda-se a aplicação de emulsões em projetos que requerem previsibilidade na fragmentação e mitigação de impactos ambientais, preferencialmente em operações de grande porte pela confiabilidade e capacidade de adaptação.

## **3.2 Propriedades dos Explosivos**

Conforme Olofsson (1990), a eficiência do desmonte pode ser otimizada ajustando os parâmetros do plano de fogo ao tipo maciço rochoso. Logo, a fim de escolher o melhor produto para cada ambiente, é necessário conhecer e analisar as propriedades dos explosivos como densidade, energia de detonação, velocidade e pressão de detonação e sensibilidade.

Igualmente, as finalidades do plano de fogo devem ser avaliadas tendo em vista as características do maciço rochoso (qualidade da rocha, litologia, geologia, permeabilidade, propriedades estruturais, físicas, mecânicas e químicas, etc.), na busca por atingir a eficiência do desmonte com uma boa fragmentação e manter a segurança em sua aplicação. Desta forma, tais propriedades afetam o resultado da fragmentação e, de acordo com esta análise, pode-se ter uma influência no resultado do desmonte.

### **3.2.1 Densidade do Explosivo**

Segundo Jimeno *et al.* (1990), a densidade é um parâmetro crítico para o desempenho dos agentes explosivos, se muito baixa, tornam-se extremamente sensíveis, com

risco de acionamento antes do tempo previsto, se muito alta, podem potencialmente adquirir insensibilidade e não detonarem. Além disso, os tipos de explosivos podem variar ao longo da coluna perfurada para o desmonte, uma vez que as cargas de coluna requerem explosivos menos densos, já as cargas de fundo do furo necessitam de explosivos mais densos, pois exigem mais energia para se fragmentar.

Ademais, a densidade de parte majoritária dos explosivos industriais produzidos varia de 0,8 a 1,6 g/cm<sup>3</sup> e é um fator preponderante para o cálculo de carga necessária para o desmonte (JIMENO *et al.*, 1990). É importante salientar que, caso o propósito seja gerar uma fragmentação com granulometrias menores, os explosivos devem ser mais densos uma vez que geram mais energia. Além disso, Silva (2009), argumenta que furos com presença de água precisam de explosivos com densidade superior a 1 g/cm<sup>3</sup> para não flutuar.

### **3.2.2 Energia de Detonação**

A energia de detonação disponível diz respeito a quantidade de efeitos mecânicos que o explosivo é capaz de produzir. Consoante Silva (2009), geralmente, a energia que um explosivo libera é útil para pulverizar e romper a rocha, além de causar outros efeitos como vibração do terreno e sobrepressão atmosférica. Essa energia está diretamente ligada à composição e a densidade de cada produto, ademais, espera-se que esta supere a resistência da rocha, garantindo a quebra eficiente e uniforme do material (OLIVEIRA, 2024).

### **3.2.3 Velocidade e Pressão de Detonação**

A velocidade de detonação (VOD) corresponde à velocidade de propagação da onda no interior do explosivo. Caracterizando-se como parâmetro da taxa de liberação de energia durante o processo de detonação e dita a capacidade do explosivo de liberar energia em um curto intervalo de tempo. De acordo com Jimeno *et al.* (1990), os fatores que influenciam na VOD são os seguintes: densidade, diâmetro da perfuração, grau de confinamento da carga explosiva, iniciação e qualidade do explosivo.

Diante disso, a VOD é um índice que relaciona o desempenho do explosivo com a pressão produzida no furo através da detonação, uma vez que é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação (SILVA, 2009). Para calcular a pressão no fundo do furo a Equação 1 pode ser aplicada:

$$PF = \rho \times \frac{VOD^2}{4} \times 10^{-6} \quad (1)$$

Onde:

PF = pressão produzida no furo ao acoplar completamente o explosivo ao furo, GPa;

$\rho$  = densidade do explosivo, g/cm<sup>3</sup>;

VOD = velocidade de detonação, m/s.

### 3.2.4 Sensibilidade à Iniciação

Este parâmetro está relacionado à reação imposta por um explosivo para iniciar o processo de detonação. No caso dos agentes explosivos, essa sensibilidade é controlada e só ocorre por meio de um detonador, dado que isso ocorre por serem explosivos estáveis (GOMES *et al.*, 2000; JIMENO *et al.*, 1990). Logo, é fundamental que haja a ação de uma grande quantidade de energia em um curto intervalo de tempo para iniciar a reação. Contudo, faz-se necessário que o iniciador seja empregado adequadamente e que o explosivo seja sensível suficiente, alcançando a detonação. Caso contrário, se houver a iniciação inadequada, a consequência será a deflagração adicionada a uma explosão reduzida (RICARDO; CATALANI, 2000).

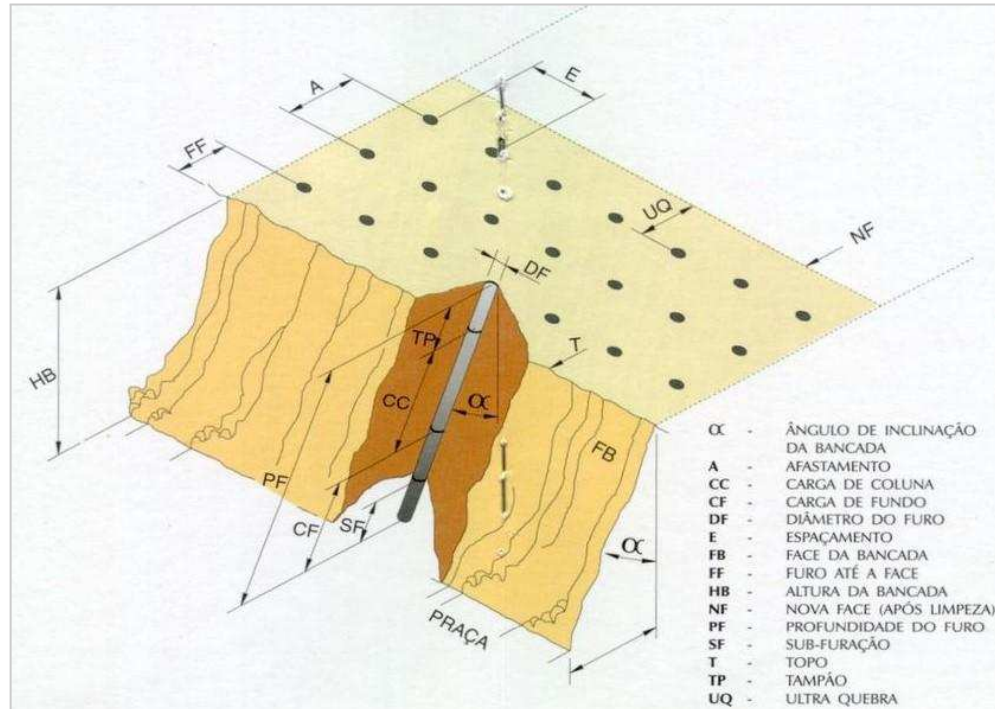
Por conseguinte, quanto maior a insensibilidade do explosivo, maior será a energia necessária para o iniciador provocar a detonação. Os acessórios de iniciação servem tanto para iniciar quanto para controlar a detonação, objetivando a obtenção do resultado desejado, conforme os padrões técnicos e de segurança, permitindo o controle de iniciação e sequenciamento do plano de fogo e da coluna de explosivos. Os iniciadores mais conhecidos são: cordel detonante, estopim de segurança, espoleta simples, espoleta elétrica, espoleta eletrônica, nonel e os reforçadores (GOMES *et al.*, 2000).

### 3.3 Parâmetros Geométricos do Plano de Fogo de Lavra a Céu Aberto

Um projeto de plano de fogo exige análise e planejamento detalhado a fim de alcançar uma fragmentação eficiente, evitar desperdício de explosivos e efeitos severos da vibração, dentre outros fatores. Outrossim, é importante compreender quais os seus parâmetros e como estes afetam o resultado do desmonte de rochas, considerando as características do maciço rochoso. Posto isso, para alcançar uma fragmentação uniforme e reduzir impactos no ambiente, é necessário adaptar as dimensões geométricas do plano de

fogo para aprimorar o uso dos explosivos (OLIVEIRA, 2024). A Figura 3 apresenta os parâmetros geométricos de um plano de fogo.

Figura 3 - Variáveis de um plano de fogo



Fonte: Silva (2019).

### 3.3.1 Afastamento

O afastamento, B, é compreendido como a distância, medida em metros, entre a primeira linha de furos e a face livre da bancada ou a menor distância entre as linhas de furos. A função desse parâmetro é controlar a quantidade de rocha a ser deslocada, se o afastamento for excessivo, ocorre a má fragmentação da rocha, se muito reduzido, causa excesso de energia e fragmentação pulverulenta. Portanto, nota-se que a eficiência da fragmentação da rocha relaciona-se diretamente à distância do afastamento adotado (JIMENO *et al.*, 1990).

Outrossim, de acordo com a Equação 2, proposta por Bhagat *et al.* (2020), a determinação do afastamento depende da Designação de Qualidade da Rocha (RQD), do diâmetro do furo, da densidade do explosivo e da densidade da rocha.

$$B = \frac{g}{RQD} \times d^{0,7} \times \sqrt{\frac{\rho}{\gamma}} \quad (2)$$

Sendo:

- B = Afastamento, m;
- g = constante gravitacional, 9,8 m/s<sup>2</sup>;

- RQD = Designação de Qualidade da Rocha;
- $d$  = diâmetro do furo, m;
- $\rho$  = densidade do explosivo, Kg/m<sup>3</sup>;
- $\gamma$  = densidade da rocha, Kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2 *Espaçamento*

Tem-se como espaçamento,  $E$ , a distância entre furos da mesma linha, em metros. Este parâmetro afeta diretamente a uniformidade da fragmentação, de forma semelhante ao afastamento (JIMENO *et al.*, 1990). Quanto menor a distância maior a fragmentação, distâncias maiores acarretam má fragmentação da rocha (RICARDO; CATALANI, 2000). Por conseguinte, o primeiro caso pode gerar formação de repé enquanto o segundo caso deriva a formação de frente irregular na nova face livre da bancada remanescente.

Segundo Silva (2009), o espaçamento deve ser maior que o afastamento e nunca menor. Ambos os parâmetros se relacionam diretamente, Silva (2009) propõe que o espaçamento para furos iniciados instantaneamente é igual a 2 vezes o afastamento, e 1,4 vezes o afastamento para furos detonados com retardo. Além disso, para rochas friáveis a relação  $E/B$  é de 1,75.

### 3.3.3 *Diâmetro do Furo*

Define-se o diâmetro do furo ( $D$ ) como a largura do furo perfurado na rocha, influenciando na quantidade de explosivos necessários e de energia liberada por metro de furo. Em primeira análise, Jimeno *et al.* (1990) sugere que as características do maciço rochoso, a altura da bancada, o comprimento das cargas de explosivo, o grau de fragmentação desejado, o equipamento de perfuração disponível, a escala de produção de material fragmentado e os custos das operações de perfuração e desmonte determinam o diâmetro ideal do furo.

Em segunda análise, o diâmetro pode afetar o custo da operação. Diâmetros pequenos são vantajosos na distribuição uniforme do explosivo. Entretanto, os custos de perfuração e carregamento serão altos, além de exigir mais mão de obra e tempo prolongado de execução. Em contrapartida, o aumento do diâmetro do furo é vantajoso por aumentar a velocidade de detonação dos explosivos, gerar um desmonte mais eficiente, elevar o desempenho da escavadeira e reduzir os custos gerais de perfuração e detonação (JIMENO *et*

*al.*, 1990).

### **3.3.4 Altura da Bancada**

A altura da bancada,  $H$ , é a altura do banco de rocha a ser desmontado, ou seja, é a distância vertical entre a praça e o topo da bancada, em metros. Dessa forma, a determinação da altura  $H$  deve visar a maximização do rendimento do desmonte, adequando-o aos equipamentos de carregamento, buscar reduzir os custos de perfuração e aumentar a estabilidade do talude remanescente. Entretanto, para o desmonte de bancadas muito altas, alguns problemas como desvios de furos, baixa eficiência da fragmentação da rocha, geração de fortes vibrações e projeções podem ocorrer (JIMENO *et al.*, 1990). Sob outra perspectiva, uma bancada muito baixa aumenta os custos operacionais e condiciona o equipamento a trabalhar abaixo da sua capacidade ideal.

### **3.3.5 Subperfuração**

Entende-se como subperfuração,  $S$ , o comprimento perfurado abaixo da praça de bancada e tem como função evitar a criação de repé ou mesmo da formação irregular da nova face livre da bancada. Silva (2009) defende a importância da análise prévia desse parâmetro, pois a formação de repé exige perfurações secundárias de acabamento, irrompendo em custos a mais, desgaste dos equipamentos e acarreta em riscos aos operários.

Também chamada de subperfuração de furo, é a profundidade adicional perfurada abaixo do nível de desmonte planejado. Gomes *et al.* (2000) recomenda valores entre 0,3 m a 1,0 m em função da altura de bancada e do tipo de rocha, com intuito de garantir que toda a rocha até o fundo da bancada seja fragmentada durante o desmonte.

### **3.3.6 Profundidade do Furo**

A profundidade do furo,  $H_f$ , é o comprimento total perfurado, sendo maior que a altura da bancada, uma vez que deve-se considerar a subperfuração e a inclinação para medir este parâmetro. Conforme Silva (2009), o aumento da inclinação faz com que o comprimento do furo aumente, porém, a subperfuração diminui. Utilizando a Equação 3 encontra-se  $H_f$ .

$$Hf = \frac{Hb}{\cos \alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \times S \quad (3)$$

Em que:

- Hf = profundidade do furo (m);
- Hb = altura da bancada (m);
- $\alpha$  = ângulo de inclinação do furo (graus);
- S = subperfuração (m).

### 3.3.7 Inclinação do Furo

Acerca da inclinação dos furos no desmonte de bancadas, Jimeno *et al.* (1990) propõe que a perfuração inclinada deve ser ponderada em cada caso, de acordo com suas especificidades, visto que esse método possui vantagens e desvantagens que afetam toda a operação. Diante disso, as vantagens mais evidentes de furos inclinados são: a redução de *overbreak*, menor consumo de explosivos, aumento do desempenho das carregadeiras por não gerar bancadas altas e maior estabilidade de taludes, por exemplo (JIMENO *et al.*, 1990).

Entretanto, as desvantagens são tão pertinentes quanto e cabem ser citadas, como por exemplo, maior chance de desvio de furos com o aumento da coluna de perfuração, maior desgaste dos equipamentos e elevação do tempo de inatividade, uma vez que o processo requer atenção e controle rigorosos (JIMENO *et al.*, 1990).

### 3.3.8 Carga de Coluna e Carga de Fundo de Furo

Usualmente, é aplicado mais de um explosivo em uma mesma coluna de furo, como consequência da composição do maciço rochoso, muitas vezes considerado heterogêneo. Logo, para haver ruptura desse maciço são necessárias energias distintas ao longo da coluna perfurada, por isso, são aplicados explosivos com densidades específicas para o fundo e o meio do furo, por exemplo.

A carga de fundo contém os explosivos com maior densidade, por serem mais energéticos são imprescindíveis para deslocar a parte da rocha mais presa (SILVA, 2009). Já a carga de coluna abarca os explosivos com densidades baixas por necessitar de menos energia (JIMENO *et al.*, 1990). Consoante Silva (2019), as equações abaixo representam o cálculo do comprimento destas duas cargas, respectivamente.

- Comprimento da carga de fundo  $L_{cf}$ , Equação 4:

$$L_{cf} = 0,3 \times (L_f - T) \quad (4)$$

Em que:

$L_{cf}$  = Comprimento da carga de fundo (m);

$L_f$  = Comprimento do furo (m);

$T$  = Tampão (m).

- Comprimento da carga de coluna  $L_{cc}$ , Equação 5:

$$L_{cc} = L_f - L_{cf} - T \quad (5)$$

Onde:

$L_{cc}$  = Comprimento da carga de coluna (m);

$L_f$  = Comprimento do furo, soma das cargas de fundo e de coluna (m);

$L_{cf}$  = Comprimento da carga de fundo (m);

$T$  = Tampão (m).

### 3.3.9 Tampão

O tampão,  $T$ , é compreendido como a parte superior do furo integrada com material como terra ou areia a fim de confinar os gases dos explosivos. Segundo Jimeno *et al.* (1990), a sua função é reter os gases produzidos no momento da detonação e promover a fragmentação da rocha plenamente. Outrossim, o afastamento afeta o tampão, caso o tampão seja maior que o afastamento, há riscos de ultralançamento, no entanto, se o contrário for verdadeiro, ocorrerá a formação de matações (SILVA, 2009). A altura do tampão pode ser calculada por meio da Equação 6:

$$T = 0,7 \times A \quad (6)$$

Em que:

$T$  = Tampão (m);

$A$  = Afastamento (m).

Acerca do material utilizado ao tamponar o furo, o mais indicado é a pedra britada, pois é angular em suas arestas, criando um encaixe melhor (JIMENO *et al.*, 1990; GOMES *et al.*, 2000). Por conseguinte, reduz as chances de escape prematuro dos gases, propagando melhor a energia dos explosivos pela rocha, aumentando o grau de fragmentação e reduzindo ultralançamentos. A escolha da pedra britada auxilia na criação de uma barreira mais resistente à compressão, o que resulta em aumento da segurança e qualidade do desmonte (JIMENO *et al.*, 1990).

### **3.4 Modelo de Predição de Fragmentação de Rochas**

A aplicação do desmonte por explosivos tem como finalidade fragmentar em tamanhos menores a rocha, de forma eficiente e em escala, com redução do tempo de execução (JIMENO *et al.*, 1990). Posto isto, a predição da fragmentação das rochas tem como função conseguir prever, com precisão admissível, a granulometria resultante do desmonte.

Adicionalmente, a escolha de um modelo de predição de fragmentação viabiliza a estimativa da distribuição granulométrica resultante da fragmentação, de acordo com o plano de fogo (JIMENO *et al.*, 1990). A eficiência dos modelos de predição é dada por meio da comparação entre o resultado previsto e a fragmentação real.

#### ***3.4.1 Modelagem Empírica e Modelagem Mecanicista***

Segundo Cunningham (2005), prever a fragmentação proveniente do desmonte de rochas auxilia na adequação deste material ao sistema de mineração, minimizando as frações não rentáveis, diminuindo os custos e aumentando o valor de rentabilidade do produto.

De acordo com Cunningham (2005, p. 201)

[...] As abordagens se dividem em dois grandes grupos: modelagem empírica, que infere fragmentação mais fina a partir de maior entrada de energia, e modelagem mecanística, que rastreia a física da detonação e o processo de transferência de energia em rochas bem definidas para layouts de detonação específicos, derivando toda a gama de resultados de detonação.

Entretanto, Cunningham (2005) descreve que a modelagem mecanicista enfrenta dificuldades em sua aplicação no cotidiano da mineração por apresentar longos tempos de execução e dificuldades de averiguar dados relacionados ao plano de fogo e à rocha.

#### ***3.4.2 Modelo de Fragmentação Kuz-Ram***

Segundo Cunningham (2005), o modelo de fragmentação Kuz-Ram é possivelmente a abordagem mais aplicada, até então, para avaliar a fragmentação por detonação, em virtude de sua simplicidade em coletar dados de entrada e relacionar o plano de fogo com o resultado da fragmentação. Este é um modelo empírico, criado na década de 1980.

Desde então passou a ser empregado por ser de fácil aplicação. Entretanto, com o decorrer do tempo, Kuz-Ram passou por alterações, já que a expectativa do modelo mecanicista prevalecesse não obteve progresso.

Conforme Cunningham (2005), é válido evidenciar que aplicar corretamente a modelagem requer levar em consideração os parâmetros que influenciam na fragmentação, a limitação da medição do resultado da detonação e o grau de dificuldade em dimensionar os efeitos do desmonte com uso de explosivos. Ademais, o modelo Kuz-Ram se baseia nas seguintes equações:

→ A Equação 7, adaptada do modelo de Kuznetsov (1973), é utilizada para a estimativa da fragmentação:

$$Xm = AK^{-0,8} \cdot Q_0^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{RWS}\right)^{19/30} \quad (7)$$

Em que:

- $Xm$ : Tamanho médio dos fragmentos (cm);
- $A$ : Fator de rocha, dependerá das características geomecânicas do maciço;
- $K$ : Razão de carga ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );
- $Q_0$ : Carga de explosivo no furo (Kg);
- $RWS$ : Energia relativa por massa efetiva do explosivo.

→ A Equação 8, adaptada de Rosin-Rammler (1933), estima a distribuição de fragmentos:

$$R = e^{(-0,693 \cdot \left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n)} \quad (8)$$

Sendo:

- $R$ : Fração retida (não passante) por uma malha de tamanho  $x$ ;
- $X$ : Abertura da peneira (cm);
- $X_{50}$ : Tamanho médio dos fragmentos (cm);
- $n$ : Índice de uniformidade de Cunningham.

→ O índice de uniformidade é dado pela Equação 9:

$$n = \left[2, 2 - 14 \frac{B}{D}\right] \cdot \left[1 + \frac{(S/B)}{2}\right]^{0,5} \cdot \left[\left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(\text{abs} \cdot \frac{BCL-CCL}{L} + 0, 1\right) \cdot \frac{L}{H}\right] \quad (9)$$

Onde:

- $n$ : Índice de uniformidade de Cunningham;
- $B$ : Afastamento (m);
- $D$ : Diâmetro do furo (m);

- *S*: Espaçamento (m);
- *W*: Desvio do furo (mm);
- *abs*: Valor absoluto;
- *BCL*: Comprimento da carga de fundo (m);
- *CCL*: Comprimento da carga de coluna (m);
- *L*: Comprimento da carga (m);
- *H*: Altura da bancada (m).

→ A Equação 10 é aplicada no modelo Kuz-Ram a fim de ajustar a energia relativa de diferentes explosivos:

$$E = \left[ \frac{VOD_e}{VOD_n} \right]^2 \cdot RWS \quad (10)$$

Onde:

- *E*: Fator de energia efetiva relativa por massa do explosivo;
- *VOD<sub>e</sub>*: Velocidade de detonação do explosivo em uso (m/s);
- *VOD<sub>n</sub>*: Velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s);
- *RWS*: Energia relativa por massa efetiva do explosivo.

A Equação 10 determina o fator de energia efetiva relativa por massa do explosivo (*E*) expressando, em função da velocidade de detonação do explosivo utilizado, quanto da energia é transmitida para fragmentação. Por conseguinte, facilita a seleção de explosivos que otimizam o custo-benefício e a obter o grau de fragmentação desejado.

Por fim, Cunningham (2005) propõe ser pertinente considerar os efeitos macros do desmonte com uso de explosivo e focar no desempenho relativo ao invés dos resultados absolutos. Assim, esta modelagem é a base para avaliar os parâmetros e os efeitos ao alterar as variáveis como também a distribuição de tamanhos dos fragmentos.

No que tange às limitações desta modelagem, há subestimação de finos gerados no desmonte, logo, o modelo não consegue mensurar a proporção real de finos, não oferece uma adequada previsibilidade para os fragmentos finos (< 10 mm). Notoriamente, os resultados da modelagem Kuz-Ram não são absolutos. Todavia, conseguem indicar possíveis fragmentações provenientes de um plano de fogo.

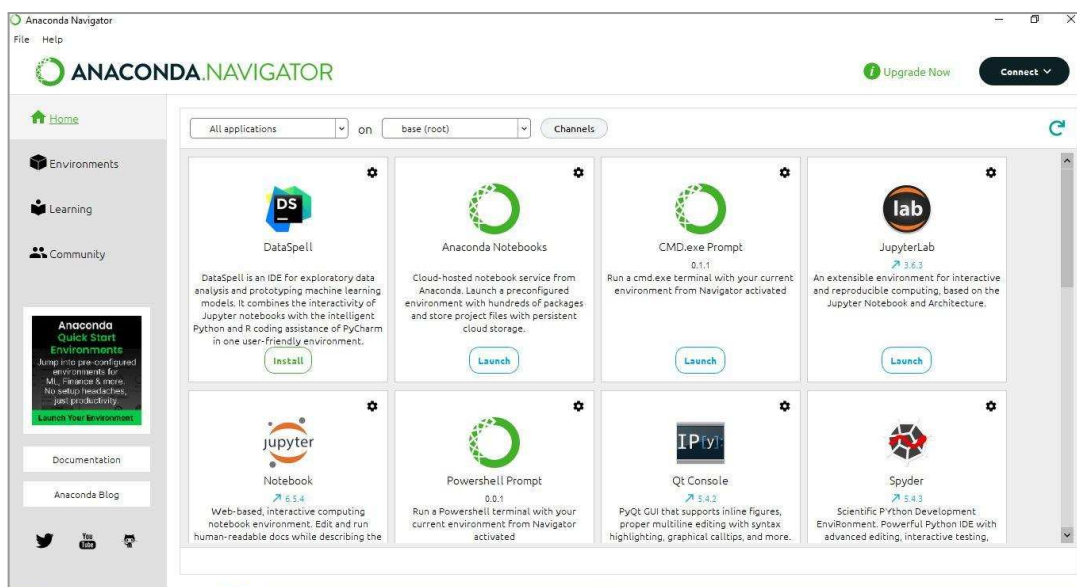
A modelagem baseada no método Kuz-Ram pode ser implementada por meio de ferramentas computacionais, utilizando diferentes Ambientes de Desenvolvimento Integrado (IDEs), cada um com suas respectivas interfaces e recursos específicos.

### 3.5 Interface Computacional Aplicada à Mineração

O pacote de *software* Anaconda é uma distribuição de Python voltada para ciência de dados que inclui ferramentas de Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) gratuitas. O Anaconda é um interpretador de Python e gerencia pacotes Conda que facilitam a criação de ambientes virtuais por meio das bibliotecas presentes no mesmo e conta com alguns pacotes pré-instalados como o JupyterLab Notebook, o Matplotlib, o NumPy, dentre outros (VAUGHAN, 2023).

Vaughan (2023) salienta que o uso do Anaconda é vantajoso ao ser aplicado no processo de aprendizado e utilização do Python por cientistas, em virtude de permitir análises exploratórias e visualização de dados de modo interativo e intuitivo. Aliás, para facilitar o uso, o pacote de *software* conta com o Anaconda Navigator (Figura 4), sendo uma interface gráfica já incluída na distribuição Anaconda. Deste modo, é possível gerenciar os pacotes, ambientes e ferramentas sem necessitar da utilização dos comandos no terminal.

Figura 4 - Visual do Anaconda Navigator



Fonte: Anaconda (2025).

Outrossim, Vaughan (2023) defende que a linguagem Python é adequada para cálculos e análises científicas e o Anaconda facilita o uso para projetos científicos. A aplicação destas ferramentas é recomendado para análises de dados experimentais e simulações em engenharia. Assim, as vantagens da integração de ambos auxilia na execução de análises estatísticas, simulação, modelagem e otimização de processos, permitindo a visualização de dados em tempo real.

### ***3.5.1 Linguagem de Programação Python***

Segundo Da Silva e Silva (2019), a linguagem Python foi criada em 1989 na Holanda por Guido van Rossum, lançada em 1991 após a finalização do projeto de criação e teste. Esta linguagem de programação é de alto nível, caracterizada por sua legibilidade e sintaxe clara, que facilita o aprendizado e a manutenção do código. Desta forma, é empregada em ambientes acadêmicos e industriais.

A linguagem de programação Python foi produzida para ser simples e ágil, seguindo a metodologia de Desenvolvimento Rápido de Aplicações (RAD). É uma metodologia direcionada na atenuação dos desperdícios a fim de aprimorar a linguagem do código e diminuir o tempo e custos de produção (DA SILVA; SILVA, 2019). De acordo com Menezes (2010), as vantagens de utilizar a linguagem Python concerne a facilidade de leitura e escrita do código, a funcionalidade em diferentes sistemas operacionais sem muitas mudanças no código e integração fácil com outras linguagens.

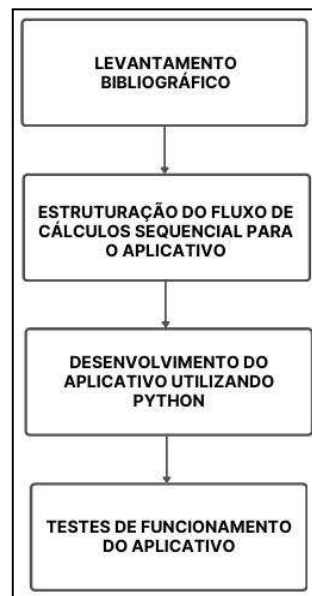
No que tange às aplicações do Python, pode-se afirmar a automação de tarefas, desenvolvimento web, ciência e análise de dados, inteligência artificial (IA), machine learning, desenvolvimento de jogos, processamento de imagens, simulações científicas e cálculos matemáticos. Contudo, consoante Da Silva e Silva (2019), a linguagem Python possui algumas limitações por ser uma linguagem interpretada, tornando-se mais lenta que linguagens compiladas em aplicações que exigem alta performance computacional.

Apesar de apresentar algumas desvantagens, Da Silva e Silva (2019) defendem que tais limitações não inviabilizam o uso da linguagem Python em projetos acadêmicos e científicos, visto que podem ser dribladas com uso de bibliotecas otimizadas com o propósito de manter a eficiência e a facilidade de desenvolvimento da linguagem. Outrossim, é possível testar ideias e algoritmos de engenharia e integrá-los a outros softwares e bancos de dados se houver necessidade.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa fundamenta-se no desenvolvimento de um aplicativo computacional capaz de calcular os parâmetros de um plano de fogo e simular a fragmentação pelo modelo Kuz-Ram para desmonte de rochas. O fluxograma apresentado na Figura 5 lista os procedimentos seguidos para o desenvolvimento do aplicativo.

Figura 5 - Etapas de desenvolvimento do aplicativo



Fonte: Autoria própria.

Os conceitos apresentados anteriormente na fundamentação teórica foram aplicados nesta etapa metodológica, tais como os parâmetros geométricos do plano de fogo e o modelo de previsão de fragmentação Kuz-Ram. Os conceitos serviram como base técnica para o desenvolvimento das análises e cálculos necessários ao projeto a fim de garantir a correlação entre os aspectos teóricos descritos e a aplicação prática proposta neste trabalho.

### 4.1 Procedimentos

Conforme descrito anteriormente na Figura 5, os procedimentos foram divididos em etapas sequenciais para o desenvolvimento do aplicativo. Segue abaixo:

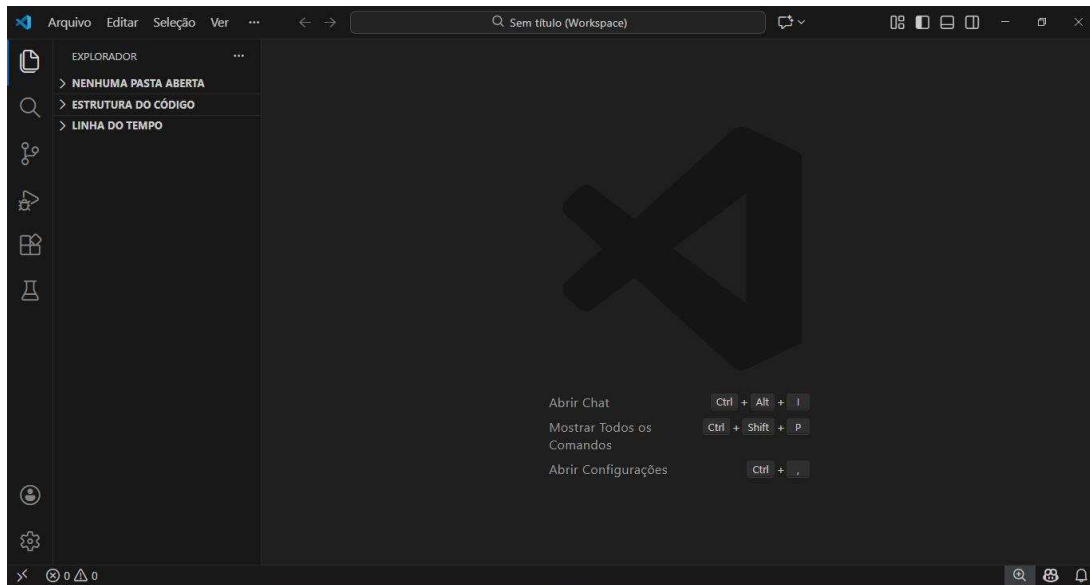
- A princípio, foi feito o levantamento de base bibliográfica por meio de pesquisas em livros, artigos e trabalhos científicos a fim de fundamentar os cálculos dos parâmetros geométricos do plano de fogo e os elementos que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram.

- Em seguida, definiram-se os principais parâmetros para o cálculo do plano de fogo em bancadas, tendo em vista a aplicabilidade prática e a adesão às condições típicas de lavra a céu aberto.
- Após a seleção de parâmetros essenciais do cálculo do plano de fogo, definiu-se o modelo Kuz-Ram que será empregado para o cálculo de fragmentação.
- Posteriormente, estruturou-se um fluxo de cálculos sequencial para o aplicativo, delimitando os dados de entrada obrigatórios, dependências dos parâmetros e a ordem de processamento das equações.
- Os cálculos incluíram os parâmetros de plano de fogo, seguidos dos custos do desmonte e, por fim, as equações do modelo Kuz-Ram para geração do gráfico e cálculo do  $X_{50}$ ;
- Na etapa seguinte, foi desenvolvida a interface gráfica do aplicativo utilizando para a interface gráfica a biblioteca *Kivy* no editor *Visual Studio Code* e a linguagem *Python*, permitindo que o usuário insira os dados de entrada e visualize os parâmetros calculados.
- Por fim, foram realizados testes com o objetivo de verificar os resultados gerados pelo aplicativo e ajustar inconsistências lógicas ou na interface do sistema caso seja necessário.

## 4.2 Ambiente de Desenvolvimento do Aplicativo

Em primeira análise, para o desenvolvimento do aplicativo foi empregado o pacote de softwares Anaconda com bibliotecas específicas como Jupyter Notebook, com aplicação da linguagem de programação computacional Python. O aplicativo Jupyter Notebook foi necessário para a criação do código tanto do plano de fogo quanto da simulação da curva de fragmentação. Desta forma, foi possível testar e integrar ambos os códigos.

Todavia, para a geração de um aplicativo a partir de códigos desenvolvidos em Python no ambiente Anaconda, o desenvolvimento do aplicativo propriamente, foi realizado no editor *Visual Studio Code* e a utilização da biblioteca *Kivy* para a geração da interface gráfica, Figura 6.

Figura 6 - Visual do editor *Visual Studio Code*

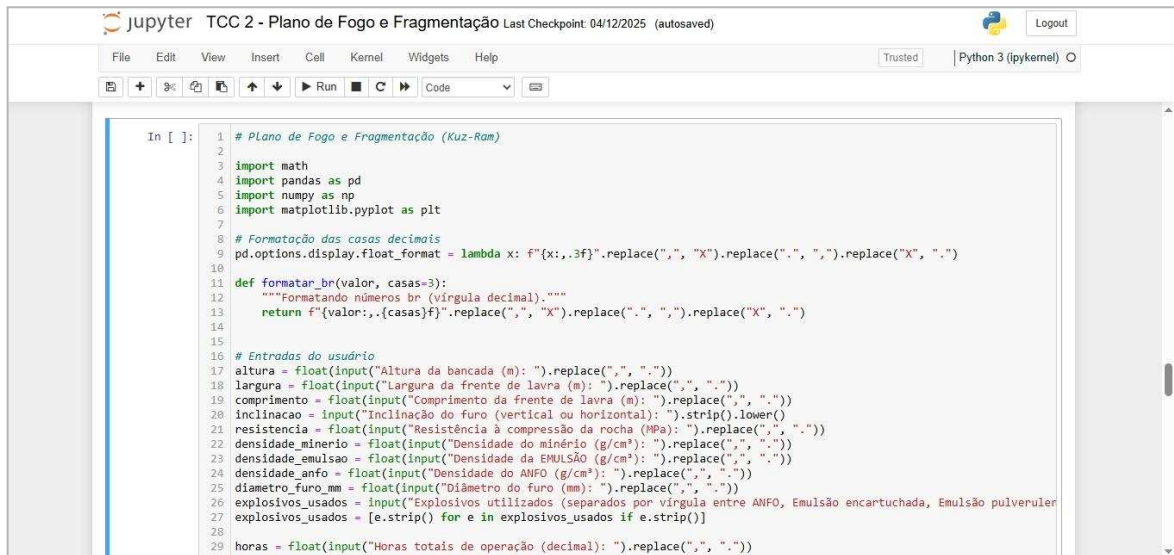
Fonte: *Visual Studio Code*, 2025.

A escolha pelo editor justificou-se por sua maior flexibilidade no gerenciamento de projetos estruturados, suporte a múltiplos arquivos, integração direta com ambientes virtuais e compatibilidade ampliada com bibliotecas destinadas à construção de interfaces gráficas. Ou seja, o Anaconda atua como base para desenvolvimento inicial do código, enquanto o *Visual Studio Code* e o Python constituem o núcleo de implementação do aplicativo. Deste modo, o usuário final interage com o código sem a necessidade de acessar o script.

#### ***4.2.1 Desenvolvimento e Geração do Aplicativo***

A princípio, alguns trechos do código foram desenvolvidos e testados no Jupyter Notebook a fim de verificar o comportamento das equações, checar a consistência dos parâmetros implementados e validar resultados intermediários (Figura 7). Deste modo, esta etapa inicial permitiu confirmar que os cálculos dos parâmetros do plano de fogo e do modelo Kuz-Ram estavam funcionando corretamente antes da construção do aplicativo definitivo.

Figura 7 - Teste do código preliminar contendo os cálculos básicos no Jupyter Notebook



```

jupyter TCC 2 - Plano de Fogo e Fragmentação Last Checkpoint: 04/12/2025 (autosaved)
File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python 3 (pykernel)

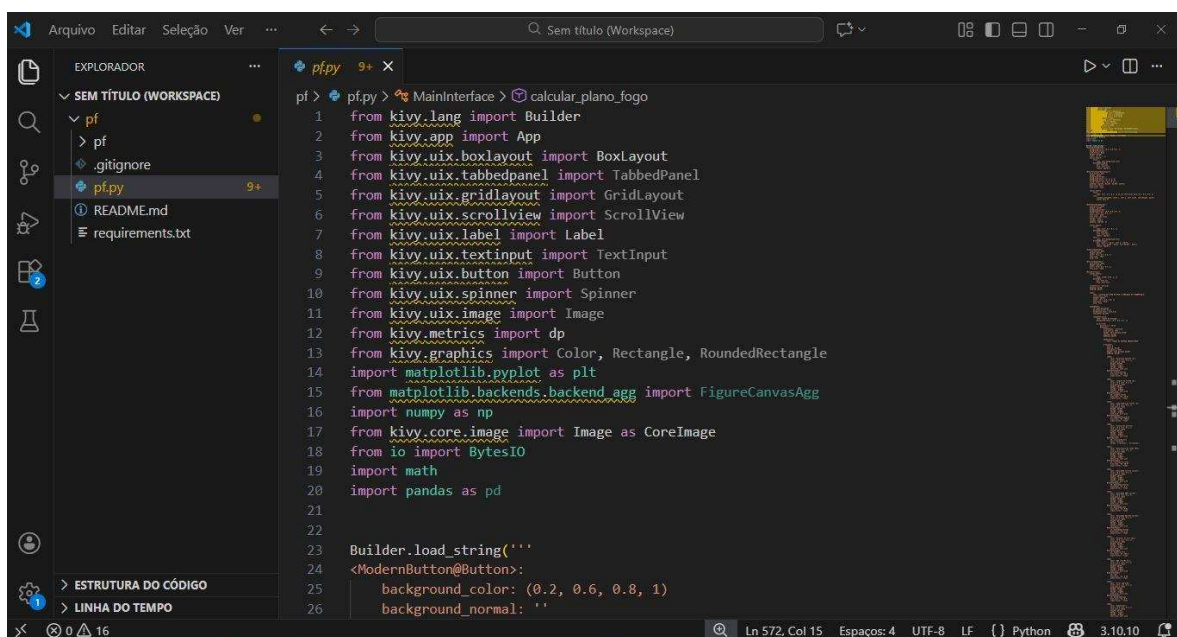
In [ ]:
1 # Plano de Fogo e Fragmentação (Kuz-Ram)
2
3 import math
4 import pandas as pd
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 # Formatação das casas decimais
9 pd.options.display.float_format = lambda x: f"{x:,.3f}".replace(",","X").replace(".",",").replace("X",".")
10
11 def formatar_br(valor, casas=3):
12     """Formatando números br (vírgula decimal)."""
13     return f"{valor:,.{casas}f}".replace(",","X").replace(".",",").replace("X",".")
14
15
16 # Entradas do usuário
17 altura = float(input("Altura da bancada (m): ").replace(",","."))
18 largura = float(input("Largura da frente de lavra (m): ").replace(",","."))
19 comprimento = float(input("Comprimento da frente de lavra (m): ").replace(",","."))
20 inclinacao = input("Inclinação do furo (vertical ou horizontal): ").strip().lower()
21 resistencia = float(input("Resistência à compressão da rocha (MPa): ").replace(",","."))
22 densidade_minerario = float(input("Densidade do minério (g/cm³): ").replace(",","."))
23 densidade_emulsao = float(input("Densidade da EMULSÃO (g/cm³): ").replace(",","."))
24 densidade_anfo = float(input("Densidade do ANFO (g/cm³): ").replace(",","."))
25 diametro_furo_mm = float(input("Diâmetro do furo (mm): ").replace(",","."))
26 explosivos_usados = input("Explosivos utilizados (separados por vírgula entre ANFO, Emulsão encartuchada, Emulsão pulverulenta): ").strip()
27 explosivos_usados = [e.strip() for e in explosivos_usados.split(",")]
28
29 horas = float(input("Horas totais de operação (decimal): ").replace(",","."))

```

Fonte: Jupyter Notebook, 2025.

Após a validação e refinamento dos códigos no Jupyter Notebook, o desenvolvimento do aplicativo ocorreu no editor *Visual Studio Code*, utilizando a linguagem Python e a biblioteca *Kivy* para a criação da interface gráfica. Posteriormente, a implementação contemplou a organização dos módulos responsáveis pelos cálculos, a integração da lógica do modelo Kuz-Ram e a construção da interface que permitiu ao usuário inserir dados e visualizar os resultados processados pelo sistema, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Desenvolvimento do aplicativo no editor *Visual Studio Code*



```

Arquivo Editar Seleção Ver ... Sem título (Workspace)
EXPLORADOR
SEM TÍTULO (WORKSPACE)
  pf
  pf
  .gitignore
  pf.py 9+
  README.md
  requirements.txt

ESTRUTURA DO CÓDIGO
LINHA DO TEMPO

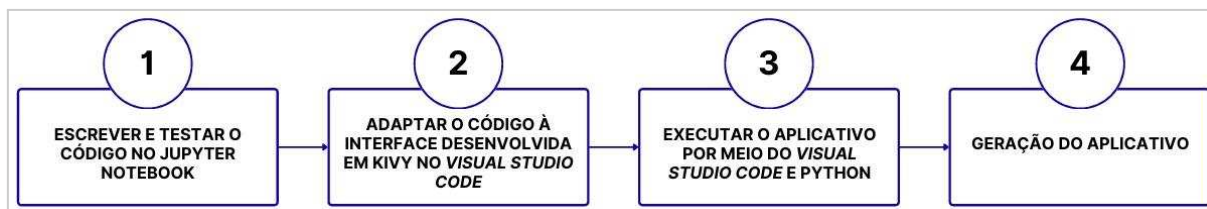
pf.py 9+
1 from kivy.lang import Builder
2 from kivy.app import App
3 from kivy.uix.boxlayout import BoxLayout
4 from kivy.uix.tabbedpanel import TabbedPanel
5 from kivy.uix.gridlayout import GridLayout
6 from kivy.uix.scrollview import ScrollView
7 from kivy.uix.label import Label
8 from kivy.uix.textinput import TextInput
9 from kivy.uix.button import Button
10 from kivy.uix.spinner import Spinner
11 from kivy.uix.image import Image
12 from kivy.metrics import dp
13 from kivy.graphics import Color, Rectangle, RoundedRectangle
14 import matplotlib.pyplot as plt
15 from matplotlib.backends.backend_agg import FigureCanvasAgg
16 import numpy as np
17 from kivy.core.image import Image as CoreImage
18 from io import BytesIO
19 import math
20 import pandas as pd
21
22
23 Builder.load_string('''
24 <ModernButton@Button>:
25     background_color: (0.2, 0.6, 0.8, 1)
26     background_normal: ''

```

Fonte: *Visual Studio Code*, 2025.

Por fim, o presente trabalho que conta com a validação do Jupyter Notebook e implementação no editor *Visual Studio Code*, este fluxo assegura que os códigos rodem corretamente, sejam revisados os cálculos e que a interface final seja funcional e intuitiva. A Figura 9 ilustra as etapas para a geração do aplicativo.

Figura 9 - Etapas de desenvolvimento e geração do aplicativo



Fonte: Autoria própria.

Diante do exposto, o aplicativo atendeu ao objetivo: ser uma ferramenta prática para a aplicação dos conceitos descritos na pesquisa.

### 4.3 Determinação dos Parâmetros do Plano de Fogo

Conforme mencionado anteriormente, a criação do plano de fogo exige uma série de cálculos como a análise de parâmetros essenciais para o dimensioná-lo. Ao ajustar os cálculos de acordo com as especificidades da operação, é possível atingir um desmonte eficiente. Destarte, alguns dos cálculos fundamentais são: afastamento (B), espaçamento (E), tampão (T), entre outros.

Por meio destes parâmetros, segundo Silva (2009), é possível calcular a carga total (CT) somando a carga de fundo mais a carga de coluna e o volume de rocha por furo (V) obtido pela multiplicação entre a altura da bancada pelo afastamento e pelo espaçamento. Assim, o cálculo dos valores supracitados permite computar a quantidade de explosivos utilizados por volume de rocha, por exemplo, promovendo um desmonte controlado.

Portanto, como visto anteriormente, o cálculo adequado dos parâmetros do plano de fogo é essencial pois influencia na eficiência da fragmentação do maciço rochoso, redução de custos operacionais, produtividade das atividades de lavra, segurança na operação, na redução de vibração e ruído. Finalmente, nota-se que é possível prever o resultado do desmonte de rochas e é possível aplicar esses cálculos para facilitar o planejamento de lavra e a previsibilidade do processo.

#### 4.4 Modelo Kuz-Ram

O modelo de predição de fragmentação aplicado nesta pesquisa será o Kuz-Ram em razão da facilidade de aplicação desta modelagem. As equações deste modelo relacionam alguns parâmetros do plano de fogo, como também a energia do explosivo, volume de rocha, que são obtidos ao calcular o plano de fogo. Como demonstrado anteriormente, com as informações obtidas no resultado do desmonte, juntamente com as características básicas do maciço rochoso, é possível gerar a curva de fragmentação, possibilitando, assim, uma estimativa do tamanho médio dos fragmentos.

Posto isto, as equações utilizadas foram:

- a Equação 7, de fragmentação, adaptada de Kuznetsov (1973);
- a Equação 8, de distribuição de fragmentos, adaptada de Rosin-Rammler (1933);
- a Equação 9, do índice de uniformidade; e
- a Equação 10, aplicada no modelo Kuz-Ram a fim de ajustar a energia relativa de diferentes explosivos.

Cunningham (2005) defende que o modelo Kuz-Ram é de fácil aplicação, requer dados acessíveis e permite a previsão da fragmentação esperada. Posto isto, a escolha deste modelo visa facilitar a integração no aplicativo e a execução de dados simulados.

#### 4.5 Cálculo dos Custos do Desmonte

Realizou-se o cálculo dos custos do desmonte no aplicativo a partir dos dados de entrada fornecidos pelo usuário, considerando os principais componentes envolvidos na operação de desmonte por explosivos. Buscou-se integrar os custos diretos relacionados ao consumo de explosivos e os custos operacionais associados à execução do desmonte, possibilitando a obtenção do custo total e do custo específico por volume de rocha desmontada.

De início, o custo do explosivo foi determinado a partir da massa total de explosivo calculada no plano de fogo e do preço unitário do explosivo selecionado pelo usuário. Em seguida, foram considerados os custos fixos operacionais, compostos pelos custos horários de mão de obra, equipamentos e combustível, os valores são informados pelo usuário em termos de custo por hora de operação e multiplicados pelo tempo total de operação previsto para o desmonte. A soma desses componentes resultou no custo fixo total associado à

atividade.

Já o custo total do desmonte foi então calculado pela soma do custo do explosivo e dos custos fixos operacionais. Por fim, o aplicativo determinou o custo específico do desmonte por metro cúbico de rocha, obtido pela razão entre o custo total calculado e o volume de rocha desmontada estimado no plano de fogo. Finalmente, destaca-se que os cálculos de custos do desmonte foram implementados no aplicativo com caráter estimativo, visando fornecer ao usuário uma aproximação dos custos associados à operação.

#### 4.6 Estrutura do Aplicativo

O aplicativo foi desenvolvido e organizado de forma a garantir clareza no fluxo de processamento das informações. Deste modo, sua estrutura contempla:

- A entrada de dados para coletar as informações fornecidas pelo usuário, como mostra a Figura 10;
- O cálculo de parâmetros geométricos do plano de fogo, como o afastamento e o espaçamento;
- A simulação de fragmentação, baseada no modelo Kuz-Ram;
- A visualização dos resultados, apresentando os valores calculados e a curva granulométrica simulada.

Figura 10 - Interface gráfica do aplicativo desenvolvido em Python e Kivy

Fonte: Autoria própria.

Esta sequência de organização permitiu que os cálculos fossem feitos respeitando as dependências entre os parâmetros.

#### ***4.6.1 Testes de Funcionamento e Limitações Metodológicas***

A partir do desenvolvimento do programa computacional, foram realizados testes de funcionamento a fim de verificar a estabilidade do mesmo e a correta integração entre os módulos implementados. Assim, realizaram-se testes com diferentes dados de entradas, avaliando o comportamento da interface gráfica. Esta etapa possibilitou a identificação e correção de inconsistências no fluxo de processamento, certificando que o aplicativo operasse conforme previsto e atendesse aos objetivos propostos para o TCC II.

Todavia, destaca-se a ausência de validação dos resultados por meio de dados de literatura ou de campo. Por conseguinte, salienta-se que os resultados apresentados referem-se exclusivamente ao desempenho e ao funcionamento interno do aplicativo, não substituindo análises operacionais reais em ambientes de mineração e/ou ajustes empíricos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos e discussão a partir da aplicação do aplicativo, focando no cálculo dos parâmetros do plano de fogo e na simulação da fragmentação por meio da modelagem empírica Kuz-Ram.

### 5.1 Funcionamento do Aplicativo

Em primeira análise, o aplicativo computacional desenvolvido apresentou funcionamento estável durante os testes realizados, permitindo a inserção dos dados de entrada pelo usuário e a execução dos cálculos de forma contínua. Ademais, a interface gráfica, construída com a biblioteca *Kivy*, possibilitou a interação do usuário com o sistema de maneira intuitiva, reunindo em duas telas os campos de entrada e a visualização dos resultados obtidos, respectivamente.

Durante a execução, o fluxo de processamento ocorreu de forma sequencial, houve inicialmente a coleta de informações fornecidas pelo utilizador, seguida pelo cálculo dos parâmetros geométricos do plano de fogo e custos, por fim, pela aplicação do modelo Kuz-Ram para simular a curva de fragmentação. Os resultados obtidos são exibidos na própria interface criada.

### 5.2 Variáveis de Cálculo

Os dados de entrada são os parâmetros necessários para realizar os cálculos, a Figura 11 mostra os campos de entrada de dados (*inputs*):

Figura 11 - Dados de entrada necessários para a realização dos cálculos

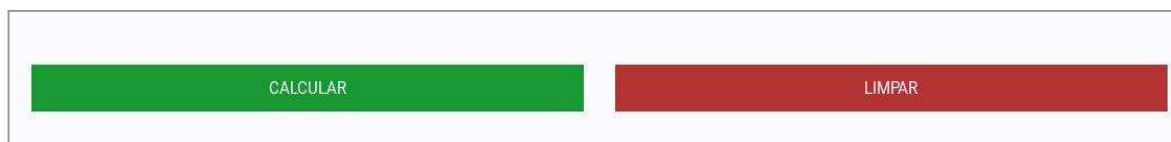
Altura da bancada (m):	<input type="text" value="Ex: 15.0"/>	Largura da frente (m):	<input type="text" value="Ex: 50.0"/>
Comprimento da frente (m):	<input type="text" value="Ex: 100.0"/>	Inclinação do furo:	<input type="text" value="vertical"/>
Resistência da rocha (MPa):	<input type="text" value="Ex: 50.0"/>	Densidade minério (g/cm³):	<input type="text" value="Ex: 2.7"/>
Densidade ANFO (g/cm³):	<input type="text" value="Ex: 0.82"/>	Densidade Emulsão (g/cm³):	<input type="text" value="Ex: 1.25"/>
Diâmetro do furo (mm):	<input type="text" value="Ex: 150.0"/>	RQD (fração 0-1):	<input type="text" value="Ex: 0.75"/>
Horas operação:	<input type="text" value="Ex: 8.0"/>	Explosivos:	<input type="text" value="ANFO"/>
Custo/h mão de obra (R\$/h):	<input type="text" value="Ex: 40.0"/>	Custo/h equipamentos (R\$/h):	<input type="text" value="Ex: 100.0"/>
Custo/h combustível (R\$/h):	<input type="text" value="Ex: 100.0"/>		

Fonte: Autoria própria.

Ademais, os explosivos utilizados para o cálculo de plano de fogo foram o ANFO, a emulsão encartuchada e a emulsão pulverulenta, assim, o usuário consegue escolher apenas

um ou dois destes explosivos por vez. Após o preenchimento dos dados obrigatórios, como mostrado na Figura 12, pode-se clicar no botão “Calcular” para os valores calculados serem exibidos na aba “Resultados” ou em “Limpar” e a tela de dados será limpa e poderá ser preenchida novamente.

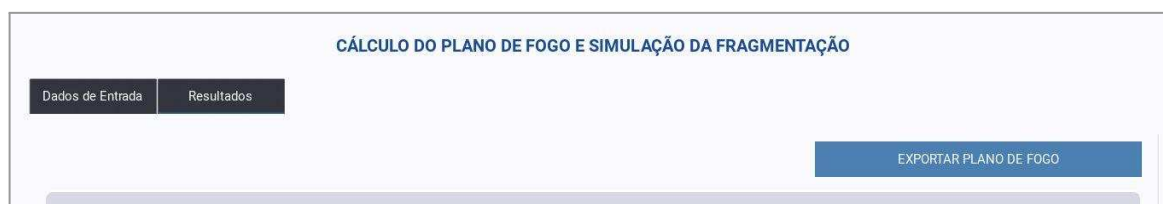
Figura 12 - Botões da tela de “Dados Obrigatórios”



Fonte: Autoria própria.

A interface gráfica possibilita o preenchimento dos dados e a visualização dos resultados pelo usuário e a exportação destes dados em forma de arquivo *Comma-Separated Values* (CSV), contudo, apenas os dados tabulares são possíveis de serem exportados neste formato excluindo, assim, o gráfico de fragmentação. A Figura 13 mostra o espaço na aba “resultados” que permite exportar os dados do plano de fogo:

Figura 13 - Opção de exportar dados do plano de fogo



Fonte: Autoria própria.

A Figura 14 exibe o espaço na aba “resultados” que permite exportar os dados de análise da fragmentação:

Figura 14 - Opção de exportar dados da análise de fragmentação



Fonte: Autoria própria.

A primeira saída de resultado é a tabela com os valores dos parâmetros geométricos e os custos, seguida do gráfico de simulação da fragmentação e finalizando com a tabela de análise da fragmentação.

### 5.3 Resultado do Cálculo do Plano de Fogo

A partir dos dados previamente definidos, o aplicativo foi capaz de calcular automaticamente os principais parâmetros geométricos do plano de fogo em bancadas, seguindo os cálculos abordados no capítulo 3 deste trabalho. Após a inserção das informações necessárias, entre os parâmetros obtidos destacam-se o afastamento, o espaçamento, as cargas de furo, a subperfuração e o tampão.

No exemplo simulado, considerou-se uma bancada com altura de 10 m, frente de lavra com 30 m de comprimento e 25 m de largura, diâmetro de furo de 102 mm e inclinação vertical. As propriedades da rocha foram representadas por resistência à compressão de 120 MPa, densidade de 3,6 g/cm<sup>3</sup> e valor de RQD igual a 0,55. Como agente explosivo, foi selecionado o ANFO, com densidade de 0,8 g/cm<sup>3</sup>. A Figura 15 apresenta a simulação dos dados de entrada:

Figura 15 - Simulação de dados de entrada

Sistema de Cálculo de Plano de Fogo

**CÁLCULO DO PLANO DE FOGO E SIMULAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO**

Dados de Entrada | Resultados

**DADOS DE ENTRADA OBRIGATÓRIOS**

Altura da bancada (m):	10	Largura da frente (m):	25
Comprimento da frente (m):	30	Inclinação do furo:	vertical
Resistência da rocha (MPa):	120	Densidade minério (g/cm <sup>3</sup> ):	3.6
Densidade ANFO (g/cm <sup>3</sup> ):	0.8	Densidade Emulsão (g/cm <sup>3</sup> ):	1.15
Diâmetro do furo (mm):	102	RQD (fração 0-1):	0.55
Horas operação:	6	Explosivos:	ANFO
Custo/h mão de obra (R\$/h):	120	Custo/h equipamentos (R\$/h):	380
Custo/h combustível (R\$/h):	95		

CALCULAR | LIMPAR

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que todos os campos foram preenchidos, contudo, como apenas o explosivo ANFO é aplicado neste exemplo, a densidade da emulsão, mesmo informada, não é incluída no cálculo. Em seguida, a Figura 16 apresenta os valores calculados pelo aplicativo incluindo os parâmetros geométricos, bem como os cálculos de custo total e o custo por metro cúbico:

Figura 16 - Valores do plano de fogo calculados pelo aplicativo

Explosivo	ANFO
Afastamento (m)	2,550
Espaçamento (m)	3,060
Subperfuração (m)	2,000
Tampão (m)	1,275
Lcf (m)	3,927
Lcc (m)	0,765
Quantidade de furos	108
Volume rocha (m <sup>3</sup> )	7.500,000
Massa explosivo total (kg)	9.001,485
Custo total (R\$)	49.117,424
Custo por m <sup>3</sup> (R\$/m <sup>3</sup> )	6,549

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos neste exemplo incluem o afastamento de 2,55 m, espaçamento de 3,06 m, subperfuração de 2,00 m e tampão de 1,275 m. É possível observar o comprimento da carga de fundo e carga de coluna, gerando a estimativa da carga de explosivo total por furo.

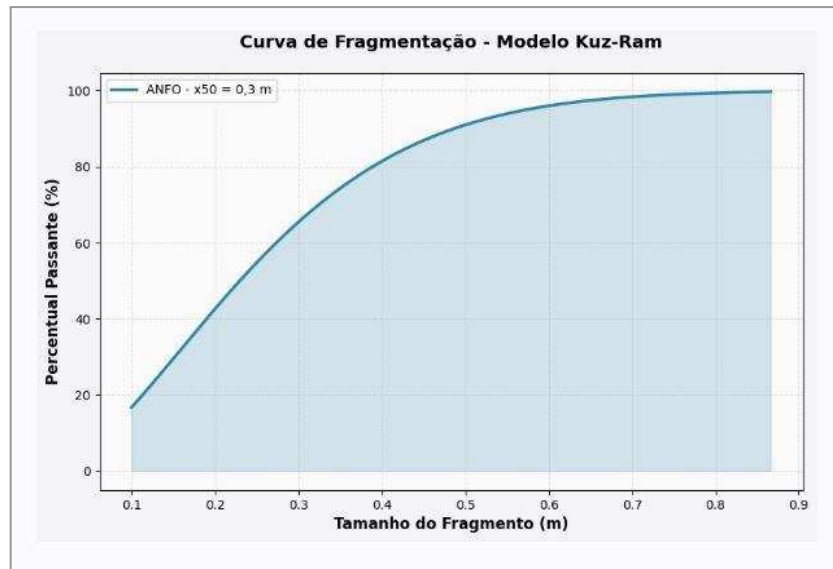
Além disso, com base na geometria da frente de lavra e dos parâmetros calculados, o sistema determinou a quantidade total de 108 furos, seguido de um volume de rocha desmontada de 7.500 m<sup>3</sup> e uma massa total de explosivo da ordem de 9.001 Kg, aproximadamente. O custo total do desmonte foi estimado em R\$ 49.117,42, tendo como custo específico de R\$ 6,55 por metro cúbico de rocha desmontada.

Portanto, nota-se que estes resultados demonstram a capacidade do aplicativo de integrar os parâmetros geométricos, as propriedades do explosivo e os custos operacionais em uma única interface. Deste modo, permite ao usuário obter rapidamente uma visão quantitativa do plano de fogo proposto.

#### 5.4 Resultado da Simulação da Fragmentação Aplicando o Modelo Kuz-Ram

Com os parâmetros do plano de fogo definidos, o aplicativo utilizou o modelo empírico Kuz-Ram para simular a fragmentação do desmonte. Na Figura 17, é possível observar o resultado da simulação da fragmentação utilizando a modelagem Kuz-Ram, o tamanho médio dos fragmentos,  $X_{50}$ , foi arredondado para o valor de 0,3 m.

Figura 17 - Gráfico da Curva de Fragmentação



Fonte: Autoria própria.

Acima, na Figura 17, está o resultado da curva granulométrica gerada, na qual é possível observar a distribuição percentual acumulada dos fragmentos em função do tamanho. A curva apresenta comportamento contínuo e crescente, indicando a coerência matemática da implementação do modelo e a correta integração entre os módulos de cálculo do plano de fogo e da fragmentação.

### 5.5 Análise dos Indicadores de Fragmentação

Além da curva granulométrica, o aplicativo fornece indicadores adicionais para análise da fragmentação, como os valores do material passante correspondentes aos tamanhos de fragmentos associados a 20% (P20), 50% (P50) e 80% (P80). Para o exemplo analisado, foram obtidos valores de P20 igual a 0,115 m, P50 igual a 0,289 m e P80 igual a 0,520 m. A Figura 18 exibe a tabela de análise da fragmentação gerada pelo aplicativo:

Figura 18 - Resultado da análise da fragmentação

P80 (m)	0,520
P50 (m)	0,289
P20 (m)	0,115
Índice de Uniformidade	2,1
Eficiência Fragmentação	Boa

Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 18, o índice de uniformidade calculado foi igual a 2,1,

indicando uma distribuição relativamente uniforme dos fragmentos simulados. Com base nesses resultados, o aplicativo classificou a eficiência da fragmentação como “boa”, fornecendo ao usuário uma interpretação qualitativa do desempenho do desmonte simulado.

Salienta-se que a classificação qualitativa da fragmentação adotada no aplicativo foi definida com base nos critérios apresentados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM, 2018), que relaciona o desempenho da fragmentação aos tamanhos característicos dos fragmentos obtidos no desmonte. A classificação dos estágios de britagem primária valores do tamanho médio dos fragmentos ( $X_{50}$ ) inferiores a aproximadamente 0,50 m são associados a uma fragmentação considerada adequada ou boa para operações de lavra a céu aberto, por favorecerem o carregamento, o transporte e a britagem subsequente (CETEM, 2018).

Como referência, o aplicativo foi projetado para classificar a fragmentação como “Boa” quando o valor calculado de  $X_{50}$  for inferior ou igual a 0,50 m, e como “Regular” quando esse valor superar o limite definido. Deve-se enfatizar que esta classificação tem caráter indicativo e visa fornecer ao usuário apenas uma interpretação quantitativa dos resultados da simulação, não substitui análises operacionais ou validações em campo.

## **5.6 Discussão Geral dos Resultados**

Destarte, os resultados obtidos a partir do exemplo de execução demonstram que o aplicativo desenvolvido é capaz de calcular de forma integrada os parâmetros do plano de fogo e simular a fragmentação do desmonte utilizando o modelo Kuz-Ram. Observa-se que a resposta do sistema às entradas fornecidas indica coerência lógica entre os módulos implementados, bem como estabilidade no processamento dos cálculos e na geração do resultado gráfico.

Embora os valores apresentados não tenham sido validados por meio de dados de campo ou comparações com a literatura, como especificado anteriormente, o aplicativo cumpre o objetivo proposto de servir como uma ferramenta computacional para estudo e simulação preliminar de desmontes em lavra a céu aberto. Deste modo, a ferramenta desenvolvida mostra-se adequada para fins acadêmicos e como base para futuras extensões e aprimoramentos.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um aplicativo computacional em linguagem *Python*, utilizando o ambiente *Anaconda* e o editor *Visual Studio Code*, capaz de calcular os principais parâmetros de um plano de fogo em lavra a céu aberto por bancadas e simular a fragmentação resultante por meio da aplicação do modelo Kuz-Ram. Os resultados obtidos demonstraram que este objetivo foi atingido, uma vez que o aplicativo desenvolvido demonstrou ser capaz de realizar os cálculos necessários de forma automática e integrada, além de gerar a curva granulométrica e os principais indicadores de fragmentação.

Foi possível reunir e organizar os principais parâmetros geométricos envolvidos no dimensionamento de um plano de fogo em lavra a céu aberto por bancadas, estruturando um conjunto coerente de dados de entrada para o aplicativo. Esta etapa garantiu que os cálculos implementados estivessem alinhados com as práticas consagradas da engenharia de desmonte.

Um dos aspectos mais importantes nesta pesquisa foi a integração entre conceitos de engenharia de minas e programação computacional, resultando em uma ferramenta funcional e de fácil utilização. A interface gráfica desenvolvida em linguagem *Python*, com a extensão da biblioteca *Kivy*, possibilitou ao usuário a inserção dos dados de entrada e a visualização clara dos resultados obtidos, sem a necessidade de acesso ao código-fonte.

Os resultados apresentados não foram validados por meio de dados de campo ou comparações com a literatura, todavia, o aplicativo cumpriu o papel de ferramenta de apoio ao estudo e à simulação preliminar de desmontes em mineração. As limitações associadas à natureza empírica do modelo Kuz-Ram e à dependência da qualidade dos dados de entrada devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Logo, é importante ressaltar que os cálculos foram realizados apenas para fins de análise teórica.

Como continuidade desta pesquisa, sugerem-se como trabalhos futuros a implementação de outros modelos de fragmentação para ampliar o aplicativo, ademais, a validação dos resultados com dados de campo, a geração automática de relatórios, por exemplo. Estas extensões podem contribuir para ampliar a aplicabilidade da ferramenta em estudos e análises operacionais na mineração. Nesta perspectiva, o presente trabalho estabelece uma base para o desenvolvimento de soluções computacionais mais completas voltadas ao planejamento e à análise de desmontes em mineração.

## REFERÊNCIAS

ANACONDA, INC. **Anaconda Documentation**. Disponível em: <<https://www.anaconda.com/docs/main>>. Acesso em: 30 mai. 2025.

ARAUJO, Andrêza Leite de. **Desmonte de rocha com o uso de explosivos: estudo de caso em trecho da Ferrovia Nova Transnordestina**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, Cajazeiras, 2020.

BHAGAT, N. K. et al. **Blasting technique for stabilizing accident-prone slope for sustainable railway route**. Current Science, v. 118, n. 6, p. 901-909, 2020. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/340232602\\_Blasting\\_Technique\\_for\\_Stabilizing\\_Accident-Prone\\_Slope\\_for\\_Sustainable\\_Railway\\_Route](https://www.researchgate.net/publication/340232602_Blasting_Technique_for_Stabilizing_Accident-Prone_Slope_for_Sustainable_Railway_Route)>. Acesso em: 12 jun. 2025.

BRASIL. **Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)**. *Desmonte de rochas*. In: **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap. 4. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/antigo/images/capitulos/2018/capitulo4-2.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2025.

CUNNINGHAM, C.V.B. **The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on**. African Explosives Limited, Modderfontein, South Africa, Brighton Conference Proceedings, 2005. Disponível em: <<https://www.smctestesting.com/documents/mine-to-mill/The%20kuz%20ram%20fragmentation%20model%20%20years%20on.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2025.

DA SILVA, Rogério Oliveira; SILVA, Igor Rodrigues Sousa. **Linguagem de programação Python. Tecnologias em Projeção**, v. 10, n. 1, p. 55-71, 2019. Disponível em: <<https://projecaociencia.com.br/index.php/Projecao4/article/view/1359/1064>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

ENAEX. **Anfomax**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/anfomax/>. Acesso em: 7 jun. 2025.

ENAEX. **Emulsão encartuchada**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/emulsao-encartuchada/>. Acesso em: 8 jun. 2025.

FREITAS, Márcia Eliane Pereira de; MORAIS, Douglas Souza. Comparação da eficiência entre os explosivos emulsão bombeada e ANFO no processo de desmonte de rochas: um estudo de caso. **Revista Multidisciplinar da Faculdade do Noroeste de Minas**, [S. l.], v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: [https://revistas.icesp.br/index.php/FINOM\\_Humanidade\\_Tecnologia/article/download/1110/815](https://revistas.icesp.br/index.php/FINOM_Humanidade_Tecnologia/article/download/1110/815). Acesso em: 3 jun. 2025.

GOMES, R. C.; LIMA, H. M.; FERNANDES, M. M. **Desmonte de rochas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

JIMENO, C. L; JIMENO, E. L; GARCÍA, P. **Manual de perforacion y voladura de rocas**. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 1990.

JUCÁ FILHO, Alberto Jaques Aragão. **Métodos de controle aplicados na mitigação dos efeitos danosos provocados pelas vibrações resultantes do desmonte de rochas com uso de explosivos: uma revisão**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Crateús, 2022.

KIVY ORGANIZATION. **Kivy Documentation**. Disponível em: <<https://kivy.org/doc/stable/>>. Disponível em: 24 out. 2025.

KUZNETSOV, V. M. **The mean diameter of the fragments formed by blasting rock**. Soviet Mining Science, 1973.

MENEZES, Nilo Ney Coutinho. **Introdução à programação com Python**. São Paulo: Novatec, p. 34, 2010. Disponível em: <<https://s3.novatec.com.br/capitulos/capitulo-9788575222508.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

MEYER, Rudolf; KÖHLER, Josef; HOMBURG, Axel. **Explosives**. 6. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.

MICROSOFT. **Visual Studio Code Documentation**. Disponível em: <<https://code.visualstudio.com/docs>>. Disponível em: 24 out. 2025.

OLIVEIRA, Philipe Viana. **Desenvolvimento de software para desmonte de rochas com análise da influência do diâmetro do furo e da densidade do explosivo no volume de rocha desmontada**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2024.

OLOFSSON, S. O. **Applied explosives technology for construction and mining**. Ärla, Suécia: Nora Boktryckeri Ab., 1990.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Documentation**. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/>>. Disponível em: 24 out. 2025.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação de Rocha**. 3. ed. rev. e ampliada. São Paulo: Editora Pini, 2007.

SILVA, V. C. **Curso de Min 210 – Operações Mineiras**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP, 2009.

SOUZA, Danielle Esteves Torres de. **Modelos de fragmentação Kuz-Ram e TCM: estudo comparativo dos modelos de fragmentação empregados na previsão granulométrica da rocha desmontada por explosivos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

THE COOPERATIVE RESEARCH CENTRE FOR OPTIMISING RESOURCE EXTRACTION (CRC ORE). **Understanding Mine to Mill**. Queensland: Sir James Foots Building, Universidade de Queensland, 2013. 96 p. Disponível em: <UNDERSTANDING - MINE TO MILL>. Acesso em: 07 maio 2025.

VAUGHAN, Lee. **Python Tools for Scientists: An Introduction to Using Anaconda, JupyterLab, and Python's Scientific Libraries**. No Starch Press, 2023.