



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



**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**

PHILIFE VIANA OLIVEIRA

Ouro Preto - MG
2024

PHILIFE VIANA OLIVEIRA

**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**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas / Desmonte de Rochas

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro
(*DEMIN/EM/UFOP*)

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Nogueira Soares
(*PUC-BH*)

Ouro Preto - MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482d 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. [manuscrito] / Philipe Viana Oliveira. - 2024. 54 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Coorientador: Prof. Dr. Henrique Nogueira Soares.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração a céu aberto. 2. Desmonte de rochas. 3. Detonação - Plano de fogo. 4. Software - Desenvolvimento. I. Destro, Elton. II. Soares, Henrique Nogueira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.235

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor

Philippe Viana Oliveira

Título

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

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

Aprovada em 19 de dezembro de 2024.

Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Henrique Nogueira Soares - Coorientador (PUC Minas / BH - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais / Belo Horizonte)
Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Ivo Eyer Cabral (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)

Elton Destro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/02/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2025, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0868900** e o código CRC **3A86DC61**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força e pela luz ao longo desta caminhada. Aos meus pais, que sempre foram meu alicerce e inspiração, e à minha irmã, cujo exemplo de determinação me incentivou a superar cada obstáculo. Às famílias Viana e Cambés, que me ofereceram suporte incondicional e foram fundamentais em todas as etapas desta jornada.

Sou profundamente grato à Universidade Federal de Ouro Preto e ao corpo docente da Engenharia de Minas, pela qualidade do ensino e pelo ambiente desafiador que me proporcionaram. Cada aprendizado adquirido na UFOP foi essencial para minha formação acadêmica e pessoal, e as experiências vividas aqui certamente deixarão marcas para a vida toda.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão à vida republicana, que foi um catalisador do meu empenho e da minha vontade de seguir em frente. Em especial, agradeço à República Ninho do Amor, aos seus moradores e aos ex-alunos, que me acolheram como uma família e contribuíram significativamente para minha jornada. A convivência nesse ambiente coletivo me ensinou valores de união, superação e responsabilidade, que levarei comigo para toda a vida.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia."

— Robert Collier

RESUMO

Este trabalho aborda o cálculo dos parâmetros do plano de fogo no desmonte de rochas de uma mina a céu aberto, mais especificamente o desenvolvimento de uma ferramenta computacional projetada para auxiliar na análise e planejamento de operações de mineração. O código do *software* desenvolvido neste trabalho foi implementado no ambiente de desenvolvimento integrado Lazarus e permite realizar cálculos de variáveis essenciais de um plano de fogo como o afastamento, espaçamento o tampão entre outras fornecendo resultados que auxiliam no ajuste dos parâmetros em diferentes cenários operacionais. Por meio de uma interface interativa, os usuários do aplicativo computacional podem inserir dados e visualizar os resultados em gráficos desenhados a partir dos parâmetros calculados facilitando, assim, a análise e tomada de decisões. Uma situação na qual a possibilidade de reduzir o diâmetro do furo mantendo o volume de rocha desmontada foi analisada. Neste cenário, verificou-se que a redução do diâmetro do furo, quando acompanhada de ajustes na densidade do explosivo, é capaz de manter o volume de rocha desmontada sem comprometer a eficiência do processo. Esse tipo de análise evidencia o potencial do *software* em suportar decisões técnicas baseadas em dados, promovendo maior flexibilidade na elaboração de planos de fogo. Além disso, a ferramenta mostrou-se particularmente útil para simular diferentes cenários e avaliar como os parâmetros técnicos como densidade do explosivo, altura do banco, diâmetro do furo e fator de fragmentação K (parâmetro associado ao grau de fragmentação da rocha após o desmonte) influenciam os resultados de desmonte. A possibilidade de visualizar os efeitos das alterações diretamente na interface gráfica facilita a adaptação de estratégias conforme as condições do maciço rochoso. Dessa forma, o programa computacional desenvolvido não apenas auxilia no planejamento, mas também contribui para um melhor entendimento das interações entre variáveis críticas, tornando-se uma ferramenta computacional para engenheiros e técnicos que buscam planejar o desmonte. Os resultados obtidos evidenciam que o *software* possibilita a realização dos cálculos do modelo teórico implementado e análises de cenários através de uma interface gráfica, sendo útil na definição dos parâmetros operacionais do plano de fogo. Sua aplicação no planejamento das operações faz do aplicativo um recurso para o avanço das práticas de desmonte de rochas no campo da Engenharia de Minas.

Palavras-chave: Mina a céu aberto; Desmonte de rochas; Plano de fogo; Desenvolvimento de *software*.

ABSTRACT

This work addresses the calculation of blast design parameters in rock blasting for an open-pit mine, specifically focusing on the development of a computational tool designed to assist in the analysis and planning of mining operations. The *software* developed in this study was implemented in the Lazarus integrated development environment (IDE) and allows for the calculation of essential variables in a blast design, such as burden, spacing, stemming, among others, providing results that assist in adjusting parameters across different operational scenarios. Through an interactive interface, users of the application can input data and visualize the results in graphs generated based on the calculated parameters, thereby facilitating analysis and decision-making. A situation in which the borehole diameter is reduced while maintaining the volume of blasted rock was analyzed. In this scenario, it was observed that reducing the borehole diameter, when accompanied by adjustments in explosive density, can maintain the volume of blasted rock without compromising process efficiency. This type of analysis highlights the *software's* potential to support data-driven technical decisions, offering greater flexibility in the development of blast designs. Furthermore, the tool proved to be particularly useful for simulating different scenarios and evaluating how technical parameters, such as explosive density, bench height, borehole diameter, and the K fragmentation factor (a parameter associated with the degree of rock fragmentation after blasting), influence blasting outcomes. The ability to visualize the effects of changes directly through the graphical interface facilitates the adaptation of strategies according to the rock mass conditions. Thus, the developed computational tool not only aids in planning but also contributes to a better understanding of the interactions between critical variables, becoming a computational resource for engineers and technicians aiming to optimize blast design. The results demonstrate that the *software* enables the theoretical model calculations and scenario analyses through a graphical interface, making it useful for defining the operational parameters of a blast design. Its application in operational planning establishes the *software* as a valuable resource for advancing rock blasting practices in the field of mining engineering.

Keywords: Open pit mine; Rock blasting; Blast design; *Software* development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Amostra de ANFO da marca Anfomax.	18
Figura 2: Amostra de emulsão encartuchada da marca Ibegel.	19
Figura 3: Parâmetros geométricos de um plano de fogo para desmonte em bancada.	21
Figura 4: IDE utilizada para o desenvolvimento do projeto.	31
Figura 5: Interface da IDE Lazarus.	32
Figura 6: Editor de código do Lazarus.	33
Figura 7: Interface do <i>software</i> desenvolvido neste trabalho utilizando a IDE Lazarus.	34
Figura 8: Interface do aplicativo computacional desenvolvido com alguns valores dos parâmetros do plano de fogo (dados de entrada).	37
Figura 9: Parâmetros do plano de fogo: dados de entrada e valores calculados pelo aplicativo desenvolvido.	40
Figura 10: Relação entre o diâmetro do furo (D_f) e o volume de rocha desmontada (V) mostrada pelo aplicativo desenvolvido (utilizou-se diâmetro do explosivo = D_f com os demais parâmetros mostrados na Figura 9 - dados de entrada - não sendo alterados).	41
Figura 11: Parâmetros do plano de fogo calculados para densidade do explosivo igual a $0,82 \text{ g/cm}^3$	43
Figura 12: Relação entre a densidade do explosivo (D_e) e o volume de rocha desmontada (V).	44
Figura 13: Gráficos comparativos mostrados na interface do aplicativo desenvolvido. Na figura, D_f = diâmetro do furo, D_e = densidade do explosivo e V = volume de rocha desmontada por furo.	46
Figura 14: Valores exibidos na interface do aplicativo desenvolvido, entre eles $D_f = 8'' = 203,2 \text{ mm}$, $V = 266,67 \text{ m}^3$ e $D_e = 1,15 \text{ g/cm}^3$	47
Figura 15: Diâmetro do furo <i>versus</i> Volume de rocha desmontada com a meta indicada pela seta na figura ($D_f = 7'' = 178 \text{ mm}$, $V = 266,67 \text{ m}^3$ e valor da densidade do explosivo, D_e , a ser determinado).	47
Figura 17: Valores exibidos na interface do aplicativo desenvolvido, com D_f e D_e alterados ($D_f = 7'' = 178 \text{ mm}$, $V = 266,69 \text{ m}^3$ e $D_e = 1,8 \text{ g/cm}^3$).	48
Figura 18: Diâmetro do furo <i>versus</i> Volume de rocha desmontada com a meta atingida ($D_f = 7'' = 178 \text{ mm}$, $V = 266,69 \text{ m}^3$ e $D_e = 1,8 \text{ g/cm}^3$).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre o diâmetro do furo (mm) e o volume de rocha desmontada por furo (m^3) para $4'' \leq D_f \leq 8^{3/4}''$ (conforme gráfico da figura 10).....	41
Tabela 2: Exemplos de densidades de explosivos comerciais utilizados em desmonte de rochas.	42
Tabela 3: Relação entre a densidade do explosivo e o volume de rocha desmontada por furo. Os demais parâmetros mostrados na Figura 11 (dados de entrada) não foram alterados.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFO - *Ammonium Nitrate Fuel Oil* (Nitrato de amônio e óleo combustível)

VOD - Velocidade de detonação

IDE - *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estrutura do Trabalho	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	As Propriedades dos Explosivos	15
3.1.1	Densidade	15
3.1.2	Energia	15
3.1.3	Velocidade e Pressão de Detonação	16
3.1.4	Diâmetro do Explosivo	17
3.2	Principais Explosivos	17
3.2.1	ANFO	17
3.2.2	Emulsões Explosivas	19
3.2.3	Dinamite	20
3.3	Parâmetros do Plano de Fogo	20
3.3.1	Afastamento	21
3.3.2	Afastamento Prático	22
3.3.3	Espaçamento	23
3.3.4	Subperfuração	24
3.3.5	Profundidade do Furo	25
3.3.6	Tampão	26
3.3.7	Carga de Coluna	27
3.3.8	Diâmetro do Furo	28
3.3.9	Volume de Rocha por Furo	29
3.3.10	Fator de Fragmentação K	30
4	METODOLOGIA	31
4.1	Interface Computacional	31
4.2	Cálculo dos Parâmetros do Plano de Fogo	34
4.3	Execução dos Testes	35
4.3.1	Objetivo dos Testes	36
4.3.2	Descrição dos Parâmetros de Teste	36
4.3.3	Procedimentos de Teste	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Influência do diâmetro do furo no volume de rocha desmontada	39
5.2	Influência da densidade do explosivo no volume de rocha desmontada	42
5.3	Gráficos Diâmetro do Furo e Densidade do Explosivo <i>versus</i> Volume de rocha desmontada por furo	45
5.4	Análise da redução do diâmetro do furo e aumento da densidade do explosivo ...	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rochas é uma etapa fundamental na indústria de mineração, influenciando diretamente a eficiência dos processos e os custos operacionais. A fragmentação adequada das rochas facilita o transporte e o processamento, impactando positivamente as etapas subsequentes. Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um *software* capaz de realizar cálculos e determinar os parâmetros operacionais de um plano de fogo, como diâmetro do furo e densidade do explosivo.

Além disso, o estudo avalia, por meio de análises gráficas, como esses parâmetros influenciam o volume de rocha desmontada por furo. Em particular, investiga-se a viabilidade de cenários em que a redução do diâmetro do furo, dentro dos limites técnicos e comerciais atuais, possa ser compensada por ajustes na densidade do explosivo. Ressalta-se que qualquer aumento na densidade é limitado aos padrões de fabricação do mercado de explosivos para desmonte de rochas. Valores fora desses limites foram utilizados exclusivamente para simulações teóricas, com o intuito de explorar diferentes cenários e ampliar a compreensão sobre os parâmetros analisados, sem sugerir sua aplicação prática.

Os testes realizados neste trabalho foram direcionados a rochas com densidades características da mineração de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, no centro-oeste de Minas Gerais, um dos principais polos de mineração do Brasil. A escolha dessa região baseou-se na sua relevância econômica e na abundância de dados disponíveis, o que permitiu calibrar o *software* para cenários realistas e próximos das condições operacionais encontradas no setor.

O *software* desenvolvido apresenta funcionalidades que atendem aos objetivos propostos, permitindo a análise e visualização dos resultados de forma prática e clara. Assim, este trabalho busca contribuir para o planejamento de desmontes de rochas, oferecendo uma ferramenta que apoie a tomada de decisão e a elaboração de planos de fogo alinhados às condições operacionais específicas de uma mina a céu aberto.

1.1 Estrutura do Trabalho

Este trabalho aborda os aspectos teóricos e práticos do desmonte de rochas, com ênfase na análise de parâmetros técnicos aplicados ao planejamento de planos de fogo. Inicialmente, discute-se a relevância do tema para a mineração, destacando a problematização e a justificativa do estudo. Em seguida, são apresentados os principais conceitos técnicos relacionados ao desmonte de rochas, como propriedades dos explosivos e parâmetros operacionais, além de estudos que exploram a influência do diâmetro do furo e da densidade do explosivo no volume de rocha desmontada.

A metodologia detalha o desenvolvimento do *software* na IDE Lazarus, com testes realizados tanto em cenários reais, utilizando densidades comerciais de explosivos, quanto em simulações teóricas para avaliar a interação entre o diâmetro do furo e a densidade do explosivo. Os resultados são apresentados com análises gráficas que evidenciam o impacto desses parâmetros no desmonte, contribuindo para o planejamento eficiente e seguro de operações em minas a céu aberto.

Por fim, o trabalho conclui com uma discussão sobre os resultados obtidos, destacando as contribuições do *software* desenvolvido como ferramenta de apoio ao planejamento de desmontes e sugerindo direções para estudos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi desenvolver um *software* na IDE Lazarus para realizar cálculos e análises gráficas que auxiliem no planejamento de planos de fogo em minas a céu aberto.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Determinar os parâmetros operacionais de um plano de fogo, considerando a densidade média de rochas presentes na mineração de ferro a céu aberto.
- Avaliar, por meio de análises gráficas, como o diâmetro do furo e a densidade do explosivo influenciam o volume de rocha desmontada, utilizando a densidade média de rochas presentes na mineração de ferro a céu aberto.
- Realizar testes com densidades de explosivos que atendem às especificações técnicas, mas que podem estar fora dos padrões estabelecidos no mercado, para ajustar o diâmetro do furo à densidade do explosivo, com o objetivo de compreender como a interação entre esses parâmetros pode manter o volume de rocha desmontada constante mesmo com alterações no diâmetro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desmonte de rochas é um processo essencial na mineração, desempenhando um papel crítico na preparação e facilitação das operações subsequentes, como o transporte e processamento de materiais. Estudos apontam que um desmonte eficaz impacta diretamente na produtividade e nos custos operacionais, sendo, portanto, um ponto central na otimização das atividades mineradoras (SILVA, 2019).

3.1 As Propriedades dos Explosivos

Os explosivos utilizados no desmonte de rochas são escolhidos com base em propriedades essenciais que têm impacto direto na segurança e eficiência das operações. Entre essas propriedades destacam-se a densidade, a pressão de explosão e a energia liberada, cada uma desempenhando um papel crucial no controle e na qualidade da fragmentação. Segundo Jimeno *et al.* (1995), é fundamental ajustar adequadamente a densidade e a pressão de explosão para concentrar a energia no maciço rochoso, garantindo a fragmentação desejada sem comprometer a estabilidade das áreas adjacentes. Além disso, o planejamento correto do plano de fogo contribui significativamente para alcançar uma fragmentação eficaz e reduzir problemas relacionados, como ruídos excessivos e vibrações.

3.1.1 Densidade

A densidade do explosivo desempenha um papel crucial na eficiência do desmonte de rochas, uma vez que determina a quantidade de energia liberada para a fragmentação. De acordo com Silva (2019), é indispensável selecionar a densidade adequada do explosivo com base nas características do maciço rochoso, permitindo que a energia seja utilizada de maneira eficiente para alcançar uma fragmentação controlada. Esse ajuste cuidadoso não apenas melhora a eficácia do desmonte, mas também reduz a necessidade de processos complementares e promove uma operação mais segura e estável.

3.1.2 Energia

A energia de detonação, que é determinada pela densidade e composição do explosivo, tem papel fundamental na fragmentação controlada do maciço rochoso.

Para que a quebra das rochas seja eficiente e uniforme, é necessário ajustar esse valor de modo a superar a resistência natural do material. Segundo Morais (2004), o cálculo da energia de detonação deve levar em conta a relação entre a densidade do explosivo e a resistência da rocha, garantindo que a fragmentação ocorra de forma precisa e sob controle. Além disso, um equilíbrio bem planejado contribui para evitar processos secundários, reduzindo problemas como vibrações e projeções, especialmente em áreas próximas a zonas habitadas, promovendo maior segurança nas operações.

3.1.3 Velocidade e Pressão de Detonação

A velocidade de detonação (VOD) e a pressão de detonação são parâmetros fundamentais para assegurar tanto a eficiência quanto a segurança no desmonte de rochas. Esses fatores são determinados pelas características do explosivo e pelo planejamento do plano de fogo. A VOD é influenciada pela densidade do explosivo, pelo diâmetro da carga e pelo grau de confinamento no furo. Densidades mais elevadas, associadas a um confinamento adequado, geram uma onda de choque intensa, promovendo uma fragmentação mais precisa e controlada. Por sua vez, a pressão de detonação, que corresponde à força exercida no interior do furo durante a explosão, desempenha um papel crucial ao esmagar as rochas circundantes e criar fissuras que são ampliadas pela expansão dos gases.

De acordo com Silva (2019), a pressão gerada por explosivos totalmente acoplados no furo é um dos principais fatores que determinam a qualidade e o controle da fragmentação. Quando combinada a um planejamento rigoroso da VOD e do confinamento, essa pressão possibilita ajustes no plano de fogo que aumentam a eficácia da fragmentação. A pressão de detonação pode ser calculada por meio da equação 1:

$$Pb = d \times VOD^2 \quad (1)$$

Onde:

- *Pb*: Pressão de detonação, responsável pela força aplicada diretamente sobre a rocha no momento da explosão (GPa).

- d : Densidade do explosivo, que impacta diretamente a quantidade de energia concentrada no furo (g/cm^3).
- VOD : Velocidade de detonação, que representa a rapidez com que a onda de choque se move pelo explosivo, influenciando o tamanho e a uniformidade dos fragmentos (m/s).

3.1.4 Diâmetro do Explosivo

No desmonte de rochas, o diâmetro do explosivo é um fator que influencia diretamente o controle e a eficiência da fragmentação. Diâmetros maiores permitem o uso de cargas explosivas mais significativas, o que aumenta a quantidade de energia liberada durante a detonação e facilita a ruptura de rochas com alta resistência. Para que essa energia seja aproveitada de maneira eficiente, é essencial que o diâmetro do explosivo esteja devidamente ajustado ao diâmetro do furo, garantindo um acoplamento preciso que maximize a pressão exercida sobre o maciço rochoso.

Conforme destacado por Silva (2019), a escolha do diâmetro do explosivo deve levar em conta as características específicas da rocha e as condições do plano de fogo, assegurando que a energia liberada seja direcionada de forma eficaz ao maciço. Quando ajustado corretamente, esse parâmetro contribui para uma detonação controlada, gerando fragmentos de tamanho uniforme e reduzindo projeções ou vibrações indesejadas. Dessa forma, o diâmetro do explosivo desempenha um papel estratégico no planejamento do plano de fogo, alinhando o desempenho técnico com a segurança operacional.

3.2 Principais Explosivos

3.2.1 ANFO

O ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*, em português Nitrato de Amônio e Óleo Combustível) é um dos explosivos mais utilizados na mineração a céu aberto devido à sua composição simples e eficaz, que combina nitrato de amônio (NH_4NO_3) e óleo combustível. Quimicamente, o nitrato de amônio atua como oxidante, enquanto o óleo combustível serve como componente energético. A proporção padrão de

aproximadamente 94,5% de nitrato de amônio e 5,5% de óleo combustível assegura uma reação equilibrada que libera grandes volumes de gases, como dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O), fundamentais para gerar pressão e deslocamento de rochas durante a detonação.

Fisicamente, o nitrato de amônio é granulado, com partículas esféricas que facilitam a mistura uniforme com o óleo combustível, proporcionando uma combustão controlada e eficiente. Esse formato granular permite uma distribuição homogênea do ANFO no furo de detonação, maximizando a eficiência de fragmentação da rocha. Essa combinação de simplicidade e eficácia torna o ANFO uma escolha econômica e confiável para operações de larga escala em ambientes secos, oferecendo segurança adicional devido à sua baixa sensibilidade a choques mecânicos, o que reduz o risco de detonações acidentais.

Para ilustrar a composição e estrutura granular do ANFO, a Figura 1 exibe uma amostra do explosivo em seu formato granulado. Nesta figura, podem-se observar as partículas de nitrato de amônio e a forma como ele se apresenta para ser combinado com o óleo combustível, assegurando uma aplicação homogênea e segura.



Figura 1: Amostra de ANFO da marca Anfomax.
Fonte: ENAEX, 2024.

3.2.2 Emulsões Explosivas

As emulsões explosivas são amplamente empregadas na mineração devido à sua alta eficiência e versatilidade, especialmente em condições de alta umidade. Compostas por nitrato de amônio, óleos combustíveis e agentes emulsificantes, essas substâncias preenchem completamente o furo de detonação, garantindo uma aplicação uniforme que favorece a fragmentação da rocha. Sua estrutura homogênea, apresentada na Figura 2, facilita o carregamento em furos com diferentes orientações e profundidades, atendendo de maneira eficaz às demandas do desmonte de rochas. Conforme observado por Ricardo e Catalani (2007), as emulsões são especialmente indicadas em situações que exigem alta resistência à água, garantindo a segurança e eficiência nas operações.

Além disso, segundo Gomes *et al.* (2000), as emulsões são frequentemente escolhidas para projetos que demandam maior controle sobre a fragmentação e a redução de impactos ambientais, tornando-se a opção ideal para operações em larga escala devido à sua confiabilidade e adaptabilidade.



Figura 2: Amostra de emulsão encartuchada da marca Ibegel.
Fonte: ENAEX, 2024.

3.2.3 Dinamite

A dinamite é um explosivo de alto desempenho amplamente empregado no desmonte de rochas em mineração, especialmente em maciços caracterizados por elevada dureza e compactação. Sua composição principal, baseada em nitroglicerina estabilizada, permite a liberação de grandes quantidades de energia, resultando em uma fragmentação eficiente e precisa. Jimeno (1995) observa que a dinamite apresenta vantagens significativas na fragmentação de rochas duras devido à sua densidade e composição, que proporcionam uma detonação poderosa e bem controlada, essencial em operações de grande porte no setor mineral.

Além disso, Silva (2019) ressalta que a alta resistência à água e a densidade elevada da dinamite a tornam particularmente adequada para operações subterrâneas e em locais úmidos, onde outros explosivos, como o ANFO, não são viáveis. Essa versatilidade permite seu uso em diversas condições de campo, tornando-a uma opção confiável para cargas de fundo e fragmentações que demandam controle rigoroso, especialmente em planos de fogo voltados para alta precisão e uniformidade dos fragmentos gerados.

3.3 Parâmetros do Plano de Fogo

O plano de fogo é uma etapa essencial no desmonte de rochas, envolvendo o planejamento detalhado da posição dos furos de perfuração e da quantidade de explosivos necessários para alcançar uma fragmentação eficiente e segura do maciço rochoso. De acordo com Silva (2019), o cálculo do plano de fogo é indispensável para garantir um desmonte controlado, equilibrando eficácia, segurança e questões ambientais. O modelo implementado no *software* desenvolvido neste trabalho foi proposto por Silva (1995).

Entre as variáveis do plano de fogo estão o afastamento e o espaçamento entre os furos, que precisam ser ajustados conforme as características do terreno e a resistência das rochas. Conforme Macedo (2017), é crucial adaptar as dimensões geométricas do plano de fogo para melhorar a aplicação dos explosivos, promovendo fragmentações mais uniformes e reduzindo os impactos no ambiente.

Além disso, a elaboração do plano de fogo requer a limpeza da área e a avaliação de possíveis instabilidades, como irregularidades no topo e na base do banco, que podem comprometer tanto a segurança quanto a eficácia da detonação. Assim, o plano de fogo combina aspectos técnicos e estratégicos para aprimorar a eficiência do desmonte e reduzir riscos ambientais e operacionais.

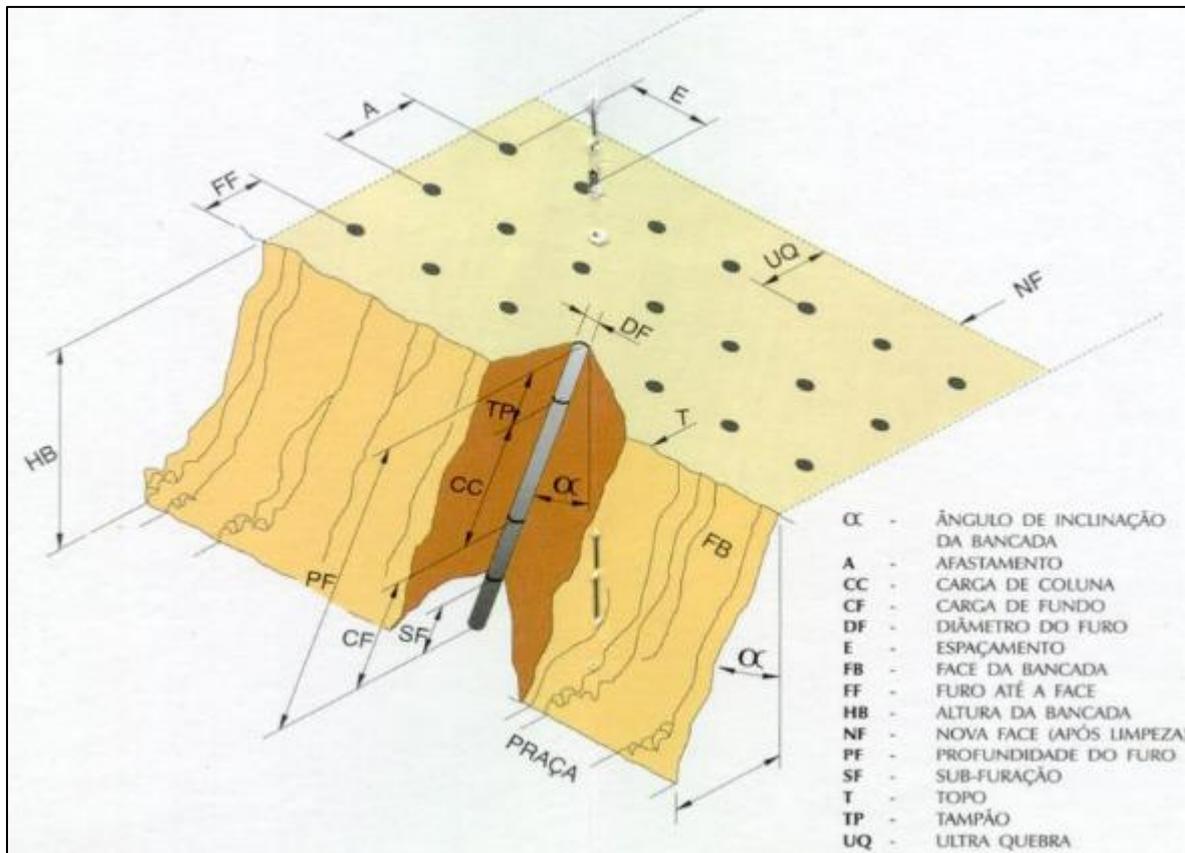


Figura 3: Parâmetros geométricos de um plano de fogo para desmonte em bancada.
Fonte: Silva, 2019.

3.3.1 Afastamento

O afastamento, em um plano de fogo para desmonte de rochas, representa a distância entre o furo e a face livre da bancada. Esse parâmetro é crítico, pois determina a eficiência da fragmentação e o controle do deslocamento das rochas após a detonação. Um afastamento muito pequeno pode resultar em fragmentos excessivamente finos e em uma pulverização indesejada da rocha, enquanto um afastamento muito grande pode levar a problemas como a sobre-escavação, comprometendo a integridade do banco e aumentando o impacto ambiental devido à emissão de gases e vibrações.

A fórmula para o cálculo do afastamento é baseada na densidade do explosivo e da rocha, além do diâmetro do furo. A expressão empírica (equação 2) que auxilia no cálculo do afastamento A é dada por (SILVA, 1995):

$$A = 0,3048 \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \times de \quad (2)$$

onde:

- A : Afastamento (m),
- ρ_e : Densidade do explosivo (g/cm³),
- ρ_r : Densidade da rocha (g/cm³ ou t/m³),
- de : Diâmetro do explosivo (mm).

A fórmula utilizada para determinar o afastamento pode ser ajustada de acordo com a resistência do maciço rochoso. Para rochas classificadas como duras, médias ou macias, os coeficientes presentes na equação são adaptados para que o afastamento esteja alinhado às propriedades de compressão do material. Segundo Silva (2019), o afastamento depende diretamente do diâmetro dos furos, das características específicas das rochas e do tipo de explosivo aplicado, variando geralmente entre 33 e 39 vezes o diâmetro do furo. Essa calibração é essencial para garantir a eficiência do desmonte, permitindo uma fragmentação controlada e reduzindo ao máximo os efeitos indesejados.

3.3.2 Afastamento Prático

No desmonte de rochas, o afastamento prático (A_p) é definido como a distância planejada entre o furo de detonação e a face livre da bancada, idealmente projetado para permitir que os gases da explosão promovam uma fragmentação controlada e eficaz. O valor do afastamento prático é calculado considerando o afastamento teórico (A) subtraído do erro da perfuração (E_f), conforme a fórmula 3:

$$A_p = A - E_f \quad (3)$$

Em que o erro de perfuração (E_f) é dado pela formula 4:

$$E_f = \frac{d}{1000} + 0,03 \times H_f \quad (4)$$

Sendo:

- d : diâmetro do furo (mm)
- H_f : profundidade do furo (m).

Essa abordagem considera possíveis discrepâncias causadas por erros operacionais durante a perfuração. Segundo Luz (2017), ajustar corretamente o afastamento prático é indispensável para garantir uma fragmentação precisa e eficaz, reduzindo a necessidade de intervenções adicionais, como desmontes secundários, e promovendo maior segurança no processo. A diferença entre o afastamento teórico e o prático ressalta a importância de uma execução cuidadosa na etapa de perfuração para evitar impactos na uniformidade da fragmentação.

3.3.3 Espaçamento

De acordo com Silva (2019), o espaçamento entre os furos de uma mesma fiada varia entre 1,15 vezes o afastamento para rochas de alta dureza e 1,30 vezes para rochas menos resistentes, dependendo do tipo de fragmentação desejada. Esse espaçamento é um parâmetro essencial no plano de fogo de desmonte de rochas, pois influencia diretamente a eficiência e o controle da fragmentação do maciço rochoso. O ajuste desse valor deve considerar tanto a resistência à compressão da rocha (RC) quanto o afastamento previamente calculado, garantindo que a distribuição dos furos contribua para um desmonte seguro e eficaz.

A fórmula para o cálculo do espaçamento E (relações 5, 6 e 7) é expressa em função do afastamento A e da resistência à compressão da rocha (RC), com valores que se ajustam conforme a dureza do material rochoso:

- Para rochas duras (RC > 120MPa).

$$E = 1,15 \times A \quad (5)$$

- Para rochas de resistência média (70 MPa a 120 MPa).

$$E = 1,20 \times A \quad (6)$$

- Para rochas macias (RC < 70MPa).

$$E = 1,25 \times A \quad (7)$$

Essas variações são essenciais para ajustar o plano de fogo conforme a resistência e a estrutura do maciço rochoso, assegurando que os fragmentos resultantes estejam no tamanho desejado.

A fórmula a seguir também pode ser utilizada para verificar o espaçamento (E) considerando outros parâmetros geométricos do plano de fogo, neste trabalho, a relação oito foi utilizada para calcular o espaçamento no aplicativo computacional desenvolvido:

$$E = \frac{(Hb + 2 \times Ap) \times K}{3} \quad (8)$$

Onde:

- Hb : Altura da bancada (em metros);
- Ap : Afastamento pratico (em metros);
- K : Fator de Fragmentação, que reflete características do maciço rochoso e os objetivos do desmonte, como o grau de fragmentação desejado.

O Fator de Fragmentação K complementa as relações simples baseadas na resistência do maciço, permitindo ajustes mais detalhados no espaçamento de acordo com as condições específicas do plano de fogo e os requisitos operacionais. Embora o detalhamento do fator K seja explorado em um tópico subsequente, sua inclusão nesta fórmula oferece maior precisão na definição do espaçamento em cenários que demandam fragmentação controlada.

Essas duas abordagens, as relações baseadas na resistência do maciço e a fórmula geométrica, são complementares e proporcionam flexibilidade no planejamento do plano de fogo. Essa flexibilidade é essencial para garantir que os parâmetros definidos atendam aos objetivos técnicos e operacionais do desmonte.

3.3.4 Subperfuração

A subperfuração é a profundidade adicional perfurada abaixo do nível da bancada, fundamental para garantir o desprendimento completo da base rochosa e o nivelamento adequado do piso. Esse procedimento evita a formação de

irregularidades chamadas repés, que podem comprometer a eficiência e dificultar a continuidade do desmonte. Quando a subperfuração não é suficiente, a base da rocha pode permanecer fixa, resultando em uma superfície irregular e exigindo operações secundárias para correção.

Para determinar a subperfuração ideal, utiliza-se a expressão 9:

$$S = 0,3 \times A \quad (9)$$

onde:

- S : profundidade da subperfuração (m);
- A : afastamento entre o furo e a face livre da bancada (m).

A subperfuração desempenha um papel fundamental no desprendimento eficiente da rocha na base, sendo proporcional ao afastamento para garantir a fragmentação desejada. Esse ajuste permite o rompimento da rocha até a cota do piso, promovendo uma fragmentação uniforme e facilitando o empilhamento dos materiais resultantes. Como destaca Silva (2019), a subperfuração adequada não apenas melhora a qualidade da fragmentação, mas também otimiza o rendimento das operações subsequentes, como o carregamento e transporte dos materiais. Essa prática aumenta a eficiência do desmonte e contribui para operações mais seguras e bem planejadas.

3.3.5 Profundidade do Furo

A profundidade do furo (H_f) no desmonte de rochas é o comprimento total perfurado, levando em consideração a inclinação do furo (α) e a subperfuração (S). Em operações de mineração, o comprimento do furo geralmente é maior que a altura da bancada (H_b) pois a inclinação e a subperfuração ajustam o furo para alcançar uma fragmentação mais eficiente e evitar que a rocha fique presa na base do banco.

$$H_f = H_b + S \quad (10)$$

A fórmula 10 é utilizada para calcular a profundidade do furo, caso tenha inclinação (α), passaremos a calcular a profundidade de acordo com a relação 11:

$$Hf = \frac{Hb}{\cos\alpha} + S \quad (11)$$

onde:

- Hf : Profundidade do furo (m);
- Hb : Altura da bancada (m);
- α : Ângulo de inclinação do furo (graus);
- S : Subperfuração (m).

Essa fórmula é fundamental para o dimensionamento correto do furo, ajustando o comprimento de acordo com a inclinação para garantir que a detonação ocorra de forma controlada, minimizando repés e assegurando uma base nivelada na bancada. Em operações de desmonte, essa abordagem maximiza a eficiência da fragmentação, facilitando a remoção dos fragmentos e reduzindo a necessidade de desmontes secundários.

3.3.6 Tampão

No contexto de um plano de desmonte em mineração, o tampão é uma seção fundamental localizada na parte superior do furo, preenchida com materiais inertes e compactados, como areia ou terra, em vez de explosivos. Sua função principal é confinar os gases produzidos pela detonação, direcionando a energia de maneira mais eficiente para a fragmentação da rocha e reduzindo o risco de ultralancamento de fragmentos.

A altura do tampão (T) é determinada pela fórmula 12:

$$T = 0,7 \times A \quad (12)$$

onde:

- T : altura do tampão (m),
- A : afastamento entre o furo e a face livre da rocha (m).

Conforme definido na formula 12, a altura do tampão (T) deve ser proporcional ao afastamento (A), considerando-se 70% deste valor. Essa relação é aplicável a

condições normais de operação, onde o maciço rochoso fornece o confinamento necessário para os gases de detonação. No entanto, como T é inferior ao afastamento ($T < A$), o risco de ultralançamento pode aumentar em situações em que o maciço apresente baixa coesão ou heterogeneidades estruturais. Nessas condições, o tampão pode não ser suficiente para confinar adequadamente os fragmentos, resultando em projeções indesejadas.

Para operações realizadas em proximidade de áreas sensíveis, como rodovias, redes elétricas, edificações ou outras infraestruturas críticas, recomenda-se ajustar a altura do tampão para que seja igual ou superior ao afastamento ($T \geq A$). Esse ajuste maximiza o confinamento dos gases, reduzindo significativamente o risco de projeção de fragmentos e assegurando a segurança da operação. Assim, a altura do tampão deve ser cuidadosamente dimensionada, levando em consideração as condições do maciço rochoso e os requisitos de segurança específicos de cada operação.

3.3.7 Carga de Coluna

No desmonte de rochas, as cargas de fundo e de coluna são elementos essenciais para garantir uma fragmentação controlada e eficiente. A carga de fundo, localizada na base do furo, contém uma maior quantidade de explosivos, sendo responsável por romper as camadas de rocha mais densas e compactas. Normalmente, essa carga representa entre 30% e 40% da carga total, podendo ser ajustada conforme a resistência da rocha e os requisitos específicos da operação. Silva (2019) enfatiza que a carga de fundo é indispensável para assegurar a quebra eficaz das camadas inferiores, evitando que grandes fragmentos permaneçam intactos, o que poderia dificultar o transporte e o carregamento.

A carga de coluna, por outro lado, é posicionada acima da carga de fundo e utiliza uma menor concentração de explosivos, já que seu objetivo principal é fragmentar as camadas superiores, que geralmente apresentam menor resistência, podendo ser calculada pela fórmula 12:

$$H_{cc} = H_c - H_{cf} \quad (13)$$

Onde:

- H_{cc} : Altura da carga de coluna (m)

- Hc: Profundidade do furo (m)
- Hcf: Altura da carga de fundo (m)

Esse tipo de carga complementa a ação da carga de fundo, distribuindo a energia de maneira uniforme ao longo do furo e promovendo uma fragmentação mais homogênea nas camadas superiores do maciço.

O equilíbrio entre as proporções das cargas de fundo e de coluna influenciam na eficiência da detonação. Uma carga de fundo insuficiente pode deixar blocos de rocha intactos, comprometendo o andamento das operações, enquanto uma carga de coluna mal dimensionada pode resultar em fragmentação irregular, com riscos de ultralancamento e formação de partículas excessivamente finas. Dessa forma, ajustar corretamente essas proporções contribui para um desmonte mais seguro e eficiente, reduzindo custos, minimizando impactos ambientais e promovendo maior segurança operacional.

3.3.8 Diâmetro do Furo

No desmonte de rochas, o diâmetro do furo de perfuração desempenha um papel essencial na eficiência e segurança da operação. Esse parâmetro determina a quantidade de explosivo que pode ser utilizada, influenciando diretamente a extensão e a uniformidade da fragmentação do maciço. Furos com diâmetros maiores permitem o uso de cargas explosivas mais potentes, promovendo uma zona de ruptura ampliada ao redor do furo e fragmentando as rochas de maneira mais eficaz. Com a energia distribuída de forma uniforme, o desmonte ocorre de maneira controlada, minimizando tanto o lançamento de fragmentos quanto as vibrações indesejadas.

A escolha do diâmetro ideal deve considerar a resistência da rocha e os objetivos de fragmentação. Para maciços mais duros, diâmetros maiores são recomendados, pois ampliam a área de ruptura e reduzem a necessidade de desmontes secundários. Por outro lado, em contextos em que o controle ambiental é uma prioridade, ajustes no diâmetro e na carga explosiva tornam-se cruciais para minimizar os impactos da detonação. Como apontado por Silva (2019), o uso de um diâmetro apropriado no furo contribui para uma fragmentação mais eficiente, reduzindo riscos associados a vibrações excessivas e lançamentos descontrolados, o que torna a operação mais segura e eficaz.

3.3.9 Volume de Rocha por Furo

O cálculo do volume de rocha por furo é fundamental para garantir que a energia liberada pelo explosivo seja distribuída de maneira adequada, influenciando diretamente a eficiência do desmonte. Esse volume é dado pela fórmula 14:

$$V = Hb \times Ap \times E \quad (14)$$

onde:

- V : Volume de rocha por furo (m^3);
- Hb : Altura da bancada (em m), representando a dimensão vertical do material a ser fragmentado. Um valor maior de Hb aumenta o volume, requerendo mais energia explosiva para uma fragmentação uniforme;
- Ap : Afastamento pratico (em m), ou seja, a distância entre o furo e a face livre, que controla o espaço disponível para a expansão dos gases da explosão. Um afastamento mal calculado pode comprometer a fragmentação e resultar em grandes blocos;
- E : Espaçamento entre os furos (em m), que influencia a dispersão dos gases e a uniformidade da fragmentação. Um espaçamento inadequado pode gerar zonas de rocha não fragmentadas ou fragmentação excessiva.

Essas variáveis estão interligadas e influenciam diretamente o volume de rocha removido por furo. Quando ajustadas corretamente, garantem uma distribuição uniforme de energia, proporcionando uma fragmentação eficiente e reduzindo a necessidade de desmontes adicionais. Contudo, erros na definição dessas variáveis podem resultar em problemas como fragmentação desigual, gerando blocos maiores que demandam mais trabalho para remoção ou partículas excessivamente finas, que aumentam os custos operacionais e são menos desejáveis.

Silva (2019) destaca que uma avaliação precisa do volume de rocha por furo é fundamental para minimizar desmontes secundários e otimizar o uso de explosivos, assegurando uma operação mais econômica e segura. Assim, realizar cálculos adequados é essencial para alcançar um desmonte controlado, reduzindo impactos ambientais e promovendo maior segurança durante o processo.

3.3.10 Fator de Fragmentação K

O fator de fragmentação K é um parâmetro fundamental no planejamento de desmontes em mineração, determinando o grau de fragmentação da rocha após a explosão e influenciando diretamente as etapas de lavra e beneficiamento. Um valor de $K = 0,9$ promove fragmentação grosseira, $K = 0,8$ promove fragmentação média enquanto $K = 0,7$ gera fragmentos mais finos. A escolha do valor de K deve ser feita com base nas características do material e nos objetivos da operação. Conforme Botelho (2014), a definição adequada do fator de fragmentação afeta diretamente a eficiência produtiva e o consumo energético nas etapas seguintes do ciclo de produção. Fragmentos menores favorecem o processamento durante as fases de britagem e cominuição, enquanto fragmentos maiores, apesar de reduzirem a necessidade de explosivos, podem intensificar o desgaste dos equipamentos, impactando a durabilidade e os custos operacionais.

4 METODOLOGIA

4.1 Interface Computacional

A ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto foi o Lazarus (Figura 4), uma IDE (*Integrated Development Environment*) gratuita e multiplataforma voltada para o desenvolvimento rápido de aplicações. Utilizando a linguagem Pascal e com suporte a uma biblioteca de componentes visuais, o Lazarus permite criar interfaces intuitivas e manter a consistência entre diferentes sistemas operacionais, como Windows, Linux e MacOS.



Figura 4: IDE utilizada para o desenvolvimento do projeto.
Fonte: LAZARUS, 2024.

A interface do Lazarus (Figura 5) é organizada para otimizar o fluxo de trabalho no desenvolvimento de aplicações. À esquerda, o "Inspetor de Objetos" possibilita a visualização dos componentes inseridos no formulário, como botões, campos de texto e rótulos, oferecendo uma visão estruturada da interface gráfica do projeto. Abaixo, a seção de "Propriedades" permite ajustar as características visuais e comportamentais desses componentes, como tamanho, alinhamento e interatividade. À direita, o "Editor de Código" é o local onde o desenvolvedor implementa a lógica de funcionamento da aplicação, favorecendo a integração entre o design visual e o código-fonte em um ambiente intuitivo.

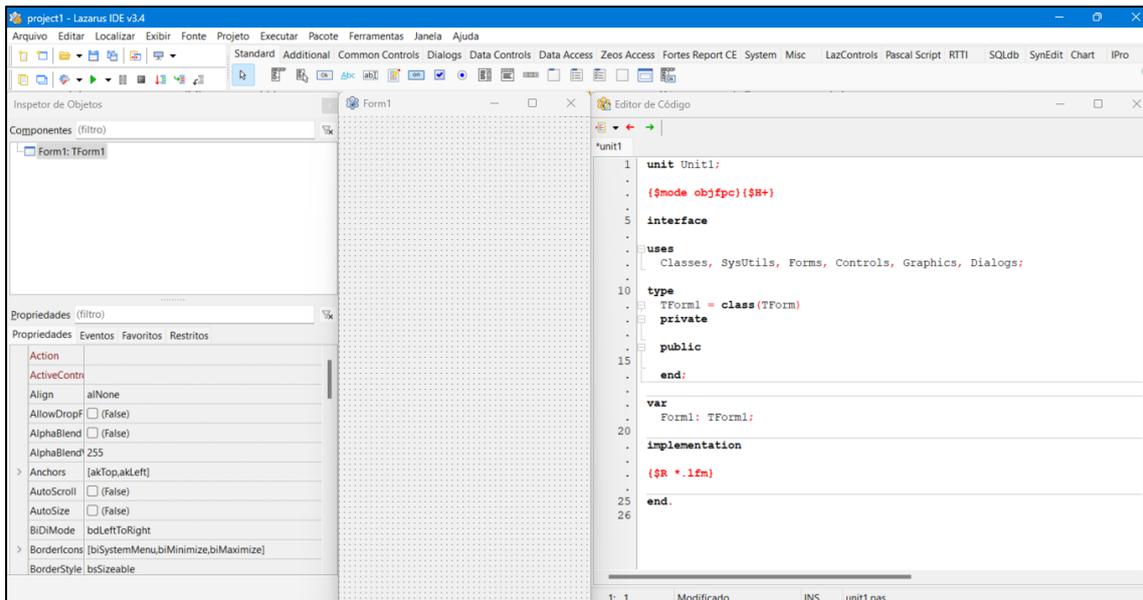
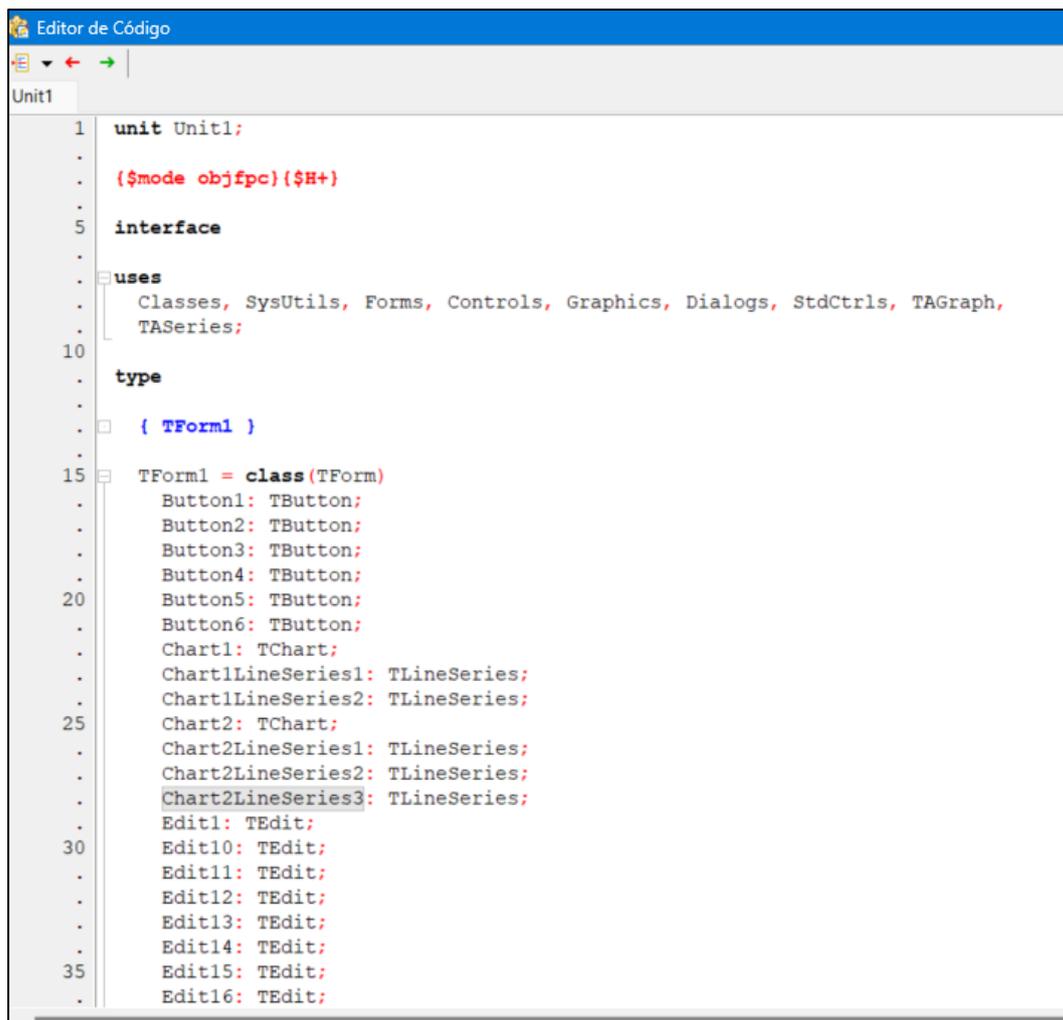


Figura 5: Interface da IDE Lazarus.

Fonte: LAZARUS, 2024.

Na Figura 6, é exibido o código inicial para a configuração dos componentes e variáveis utilizados no plano de fogo. A estrutura TForm1 é definida com diversos botões (TButton), gráficos (TChart) e séries de linhas (TLineSeries), permitindo a criação de uma interface interativa que facilita a entrada e visualização de dados. Cada campo de entrada (TEdit) corresponde a um parâmetro específico do plano de fogo, como a densidade do explosivo e o diâmetro do furo, fundamentais para o cálculo e simulação do desmonte de rochas. Essa organização permite que o usuário manipule variáveis (dados de entrada) diretamente na interface, otimizando o desenvolvimento e a análise do plano de fogo em um ambiente visual e prático.



```
1  unit Unit1;
.
.  {$mode objfpc}{$H+}
.
.
5  interface
.
.  uses
.  Classes, SysUtils, Forms, Controls, Graphics, Dialogs, StdCtrls, TAGraph,
.  TASeries;
10
.  type
.
.  { TForm1 }
.
15 TForm1 = class(TForm)
.  Button1: TButton;
.  Button2: TButton;
.  Button3: TButton;
.  Button4: TButton;
20  Button5: TButton;
.  Button6: TButton;
.  Chart1: TChart;
.  Chart1LineSeries1: TLineSeries;
.  Chart1LineSeries2: TLineSeries;
25  Chart2: TChart;
.  Chart2LineSeries1: TLineSeries;
.  Chart2LineSeries2: TLineSeries;
.  Chart2LineSeries3: TLineSeries;
.  Edit1: TEdit;
30  Edit10: TEdit;
.  Edit11: TEdit;
.  Edit12: TEdit;
.  Edit13: TEdit;
.  Edit14: TEdit;
35  Edit15: TEdit;
.  Edit16: TEdit;
```

Figura 6: Editor de código do Lazarus.
Fonte: LAZARUS, 2024.

Na Figura 7, a interface apresenta campos para inserção dos principais parâmetros do plano de fogo, como densidade do explosivo, densidade da rocha, diâmetro do explosivo e altura do banco, todos configurados em campos de entrada (TEdit). Esses parâmetros são essenciais para o cálculo de um plano de fogo e podem ser facilmente ajustados pelo usuário.

O botão "Calcular" executa as operações com base nos dados inseridos, gerando resultados como afastamento e volume de rocha. À direita, os gráficos "Diâmetro do Furo *versus* Volume de Rocha" e "Densidade do Explosivo *versus* Volume" facilitam a análise visual das relações entre as variáveis.

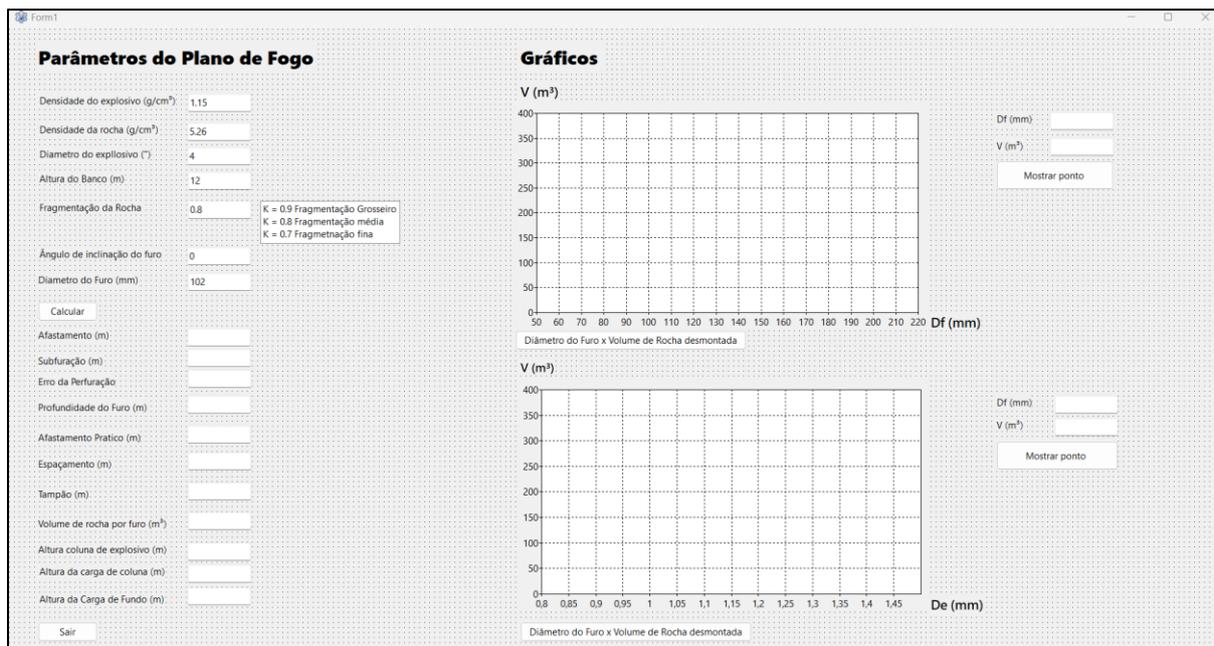


Figura 7: Interface do *software* desenvolvido neste trabalho utilizando a IDE Lazarus.

4.2 Cálculo dos Parâmetros do Plano de Fogo

A criação do plano de fogo envolve uma série de cálculos, sendo utilizados parâmetros essenciais como densidade e diâmetro do explosivo, a densidade da rocha, a altura do banco, informações necessárias para o dimensionamento do plano de fogo. Esses cálculos, fundamentados em fórmulas empíricas e ajustados conforme as características da operação, resultam em um modelo matemático que serve de base para o planejamento do desmonte de maneira controlada e eficiente.

O primeiro cálculo fundamental é o do afastamento (A), que define a menor distância entre os furos e a face livre da bancada. Esse cálculo utiliza o diâmetro e a densidade do explosivo, além da densidade da rocha, garantindo uma distribuição inicial adequada da energia do explosivo. Esse parâmetro é integrado ao modelo para evitar tanto a fragmentação excessiva quanto a insuficiente, proporcionando um desmonte controlado e seguro.

Em seguida, o espaçamento (E) entre os furos é determinado a partir da altura do banco e do afastamento, com ajustes baseados em um coeficiente de fragmentação. Esse valor assegura que a energia do explosivo seja distribuída uniformemente ao longo da bancada, melhorando a fragmentação e minimizando

falhas no desmonte. Esse espaçamento é essencial para o alinhamento dos furos e para garantir uma fragmentação uniforme da rocha.

A subperfuração (S) e a profundidade do furo (Hf) são calculadas para assegurar que toda a rocha seja fragmentada adequadamente, evitando superfícies irregulares na base da bancada. A subperfuração é um complemento (prolongamento do furo) necessário para garantir a continuidade do desmonte, enquanto a profundidade do furo é ajustada para contemplar qualquer inclinação, otimizando o uso da energia do explosivo e direcionando a detonação de forma controlada.

Finalmente, o cálculo da carga total (CT), que é a soma da carga de fundo e da carga de coluna, define a quantidade de explosivo necessária para a operação, enquanto o volume de rocha por furo (V) determina a eficiência do uso do explosivo (eficiência do desmonte). A combinação desses valores permite estimar a quantidade de explosivo necessária por volume de rocha a ser fragmentada, contribuindo para a maior eficiência e o controle do processo de desmonte.

Esses parâmetros calculados são integrados ao plano de fogo para definir a disposição dos furos e a quantidade de explosivo em cada ponto, proporcionando uma operação de desmonte controlada. Com o plano de fogo calculado, é possível executar o desmonte, controlando a distribuição da energia do explosivo, minimizando impactos ambientais e garantindo a eficiência no uso dos recursos.

4.3 Execução dos Testes

Nesta seção, são descritos os testes realizados para avaliar a aplicabilidade do *software* desenvolvido no cálculo dos parâmetros do plano de fogo, com foco no desmonte de minério de ferro. Os testes foram estruturados considerando cenários industriais usuais, utilizando parâmetros que variam, principalmente, o diâmetro do furo e a densidade do explosivo, variáveis críticas na mineração para aumentar a eficiência do desmonte e a segurança operacional. A inserção desses valores no *software* permite gerar dados sobre o volume de rocha desmontada, permitindo uma análise das variações causadas pelo ajuste desses parâmetros.

Para facilitar a interpretação dos resultados, o *software* apresenta as informações por meio de uma interface gráfica interativa desenvolvida na IDE Lazarus, permitindo ao usuário avaliar o volume de rocha desmontada considerando,

em um dos gráficos, o diâmetro dos furos e, no outro, a densidade do explosivo. Essa interface possibilita uma análise visual e comparativa dos efeitos de cada ajuste, facilitando a identificação das combinações mais eficientes para o desmonte de rochas. A análise dos dados foi realizada com base nos gráficos gerados, que permitiram analisar a consistência e a aplicabilidade prática do *software* desenvolvido neste trabalho, visando contribuir para que a operação de desmonte aconteça de forma satisfatória.

4.3.1 Objetivo dos Testes

Os testes têm como objetivo avaliar a capacidade do *software* representar, separadamente, os efeitos do diâmetro do furo e da densidade do explosivo no volume de rocha desmontado, contribuindo para a seleção de parâmetros que tornem o desmonte eficiente em diferentes cenários operacionais. O primeiro teste analisa o diâmetro dos bits, enquanto o segundo avalia o impacto de diferentes densidades dos explosivos no volume de rocha desmontada. Os resultados são apresentados em gráficos gerados pelo *software* desenvolvido, destacando sua aplicabilidade prática e potencial para melhorar a qualidade dos planos de fogo planejados.

4.3.2 Descrição dos Parâmetros de Teste

Os parâmetros selecionados para os testes, diâmetro do furo e densidade do explosivo, desempenham papéis na eficiência e no custo do desmonte de rochas (a análise de custo não foi realizada neste trabalho), além de contribuir para a segurança da operação. O diâmetro do furo influencia diretamente o volume de rocha removida: furos maiores permitem o uso de cargas explosivas mais intensas, elevando o volume de material desmontado a cada detonação. Todavia, diâmetros excessivos podem aumentar os custos e comprometer a estabilidade da bancada, tornando essencial um equilíbrio adequado.

No primeiro teste, o *software* mostrou, em um gráfico, a influência do diâmetro do furo no volume de rocha desmontada. Já a densidade do explosivo, testada no segundo conjunto de parâmetros, afeta a energia liberada pela detonação. Explosivos de alta densidade, como emulsões encapsuladas e misturas de ANFO, promovem fragmentação eficiente e alta produtividade. Contudo, uma densidade excessiva pode

gerar fragmentos muito finos, aumentando a produção de poeira e vibrações, dificultando o controle da operação. A interface do *software* permitiu, então, testar diferentes densidades, identificando a combinação ideal para um desmonte eficiente. Esses testes comparativos, focados no volume de massa desmontada, possibilitaram determinar configurações operacionais para o desmonte de rochas.

4.3.3 Procedimentos de Teste

A configuração dos parâmetros do plano de fogo foi realizada com a inserção de dados ajustados para minério de ferro. A interface gráfica do aplicativo computacional permitiu a visualização e análise dos resultados. Os dados de entrada podem ser inseridos conforme mostrados na Figura 8.

Parâmetros do Plano de Fogo

Densidade do explosivo (g/cm ³)	<input type="text" value="1.15"/>
Densidade da rocha (g/cm ³)	<input type="text" value="5.26"/>
Diametro do explosivo (")	<input type="text" value="2.25"/>
Altura do Banco (m)	<input type="text" value="12"/>
Fragmentação da Rocha	<input type="text" value="0.8"/>
Ângulo de inclinação do furo	<input type="text" value="0"/>
Diametro do Furo (mm)	<input type="text" value="102"/>

K = 0.9 Fragmentação Grosseiro
K = 0.8 Fragmentação média
K = 0.7 Fragmentação fina

Figura 8: Interface do aplicativo computacional desenvolvido com alguns valores dos parâmetros do plano de fogo (dados de entrada).

Após a inserção dos parâmetros de teste, o sistema processou os dados e apresentou indicadores quantitativos, como o volume de rocha desmontada por furo, acompanhados de gráficos que facilitaram a análise dos resultados. A interface gráfica do *software* permitiu visualizar, de forma prática, as influências dos parâmetros selecionados, como diâmetro do furo, densidade do explosivo, ângulo de inclinação entre outros sobre o volume desmontado, favorecendo a análise dos efeitos de cada

ajuste e auxiliando na identificação das configurações mais eficientes. Dessa forma, o *software* demonstrou ser uma ferramenta útil para o planejamento das operações de desmonte, podendo auxiliar na escolha de cenários adequados operacionalmente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Influência do diâmetro do furo no volume de rocha desmontada

A configuração dos parâmetros do plano de fogo foi realizada com a inserção dos valores essenciais para o desmonte da rocha de alta densidade (minério de ferro) amplamente presente no Quadrilátero Ferrífero. Para a simulação e visualização dos resultados, utilizou-se uma interface gráfica que possibilita o preenchimento dos campos com valores específicos para cada parâmetro relevante, permitindo um controle detalhado da operação de desmonte. Entre os valores considerados estão (Figura 1):

- Densidade do explosivo (ANFO): 1,15 g/cm³;
- Densidade da rocha: 5,26 g/cm³;
- Diâmetro do explosivo: 4";
- Altura do Banco: 12 m, comumente usada para desmontes em minas de grande porte;
- Fator de Fragmentação da Rocha (K): 0,8 para obter uma fragmentação média, a qual pode ser modificada para se adequar ao beneficiamento;
- Ângulo de Inclinação do Furo: 0° (vertical);
- Diâmetro do Furo: 102 mm, equivalente a um *bit* de 4", selecionado como ponto de partida para avaliar o impacto de diâmetros menores na eficiência do desmonte.

Para compreender melhor a influência do diâmetro do furo sobre o volume de rocha desmontada, o estudo considerou vários tamanhos de bits. Após a inserção dos dados na interface, o aplicativo computacional calculou e exibiu, separadamente, todos os principais parâmetros do plano de fogo. A interface processa esses dados e apresenta resultados como o Afastamento, Espaçamento, Subperfuração, Altura das Cargas de Fundo e Coluna, Volume de rocha desmontada por furo entre outros (conforme Figura 9), facilitando o planejamento e controle do desmonte. Com isso, o uso da interface traz maior agilidade no cálculo dos parâmetros, assegurando que cada variável essencial do plano de fogo seja ajustada conforme os requisitos operacionais.

Parâmetros do Plano de Fogo

Dados de entrada

Densidade do explosivo (g/cm ³)	<input type="text" value="1,15"/>	
Densidade da rocha (g/cm ³)	<input type="text" value="5,26"/>	
Diametro do explosivo (")	<input type="text" value="4"/>	
Altura do Banco (m)	<input type="text" value="12"/>	
Fragmentação da Rocha	<input type="text" value="0,8"/>	K = 0,9 Fragmentação Grosseiro K = 0,8 Fragmentação média K = 0,7 Fragmentação fina
Ângulo de inclinação do furo (°)	<input type="text" value="0"/>	
Diametro do Furo (mm)	<input type="text" value="102"/>	
<input type="button" value="Calcular"/>		
Afastamento (m)	<input type="text" value="2,36"/>	
Subfuração (m)	<input type="text" value="0,71"/>	
Erro da Perfuração	<input type="text" value="0,48"/>	
Profundidade do Furo (m)	<input type="text" value="12,71"/>	
Afastamento Pratico (m)	<input type="text" value="1,88"/>	
Espaçamento (m)	<input type="text" value="4,20"/>	
Tampão (m)	<input type="text" value="1,32"/>	
Volume de rocha por furo (m ³)	<input type="text" value="94,73"/>	
Altura coluna de explosivo (m)	<input type="text" value="11,39"/>	
Altura da carga de coluna (m)	<input type="text" value="7,41"/>	
Altura da Carga de Fundo (m)	<input type="text" value="3,99"/>	
<input type="button" value="Sair"/>		

Figura 9: Parâmetros do plano de fogo: dados de entrada e valores calculados pelo aplicativo desenvolvido.

A partir dos dados inseridos e dos parâmetros calculados na interface, foi gerado um gráfico (Figura 10) que mostra a relação entre o diâmetro do furo (D_f) e o volume de rocha desmontada (V). Esse gráfico permite uma análise visual do impacto do diâmetro do furo na quantidade de rocha removida, mostrando, como esperado, uma tendência crescente de volume conforme o diâmetro do furo aumenta. Essa relação é essencial para o planejamento de desmonte, pois permite ajustar o diâmetro dos furos de acordo com o volume de rocha que se deseja fragmentar, garantindo uma eficiência maior na utilização dos explosivos. Além disso, a visualização gráfica facilita a compreensão da distribuição de energia explosiva em função do diâmetro dos furos, proporcionando uma base para decisões fundamentadas na otimização do desmonte.

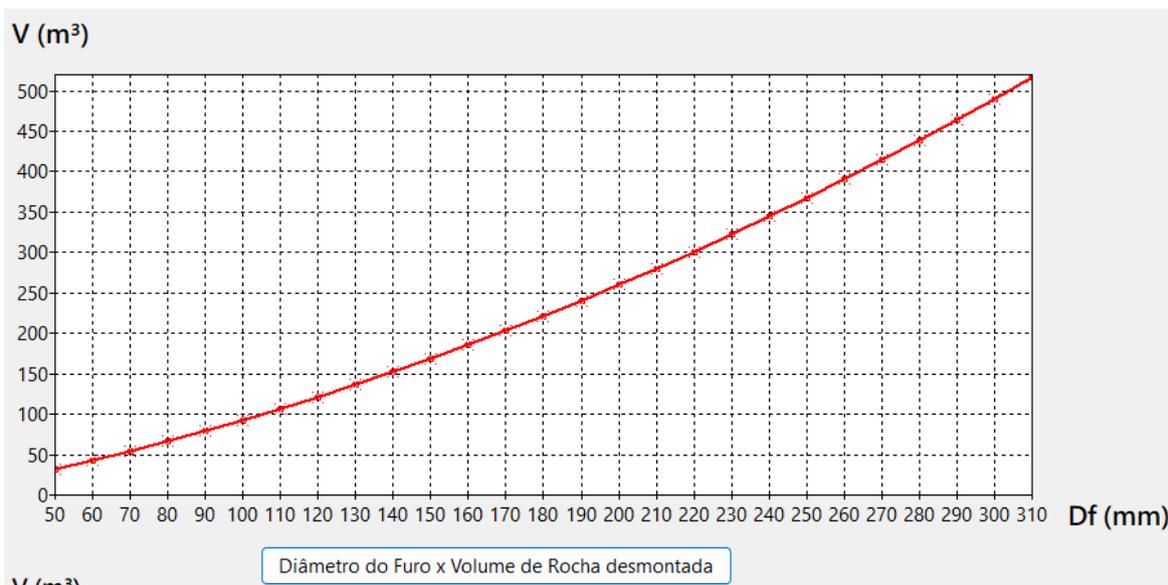


Figura 10: Relação entre o diâmetro do furo (Df) e o volume de rocha desmontada (V) mostrada pelo aplicativo desenvolvido (utilizou-se diâmetro do explosivo = Df com os demais parâmetros mostrados na Figura 9 - dados de entrada - não sendo alterados).

A inclinação da curva é essencial para o planejamento, pois demonstra que um diâmetro maior permite a inserção de uma carga explosiva mais ampla, distribuindo a energia de forma mais eficaz e resultando em uma fragmentação maior com menos furos. Essa relação poderá otimizar recursos, através da redução do número de furos e, por consequência, economizando tempo e custos (esta análise não foi realizada neste trabalho). A curva, também, pode ser utilizada como uma ferramenta gráfica que auxilia na tomada de decisões para atingir o volume de rocha necessário, buscando melhorar a eficiência e o controle do desmonte.

A partir da análise gráfica da relação entre o diâmetro do furo (Df) e o volume de rocha desmontada (V), foi possível confeccionar a Tabela 1, que apresenta dados do volume de rocha desmontada para diferentes diâmetros de furo.

Tabela 1: Relação entre o diâmetro do furo (mm) e o volume de rocha desmontada por furo (m³) para $4'' \leq Df \leq 8^{3/4}''$ (conforme gráfico da figura 10).

Diâmetro (polegadas)	Diâmetro do furo, Df (mm)	Volume de rocha desmontada por furo (m³)
4	102	94,73
4 ½	114	112,75
5	127	131,72
5 ½	140	151,68
6	152	172,72
6 ½	165	194,69
7	178	217,66
7 ½	191	241,63
8	203	266,69
8 ¾	222	306,07

A curva do gráfico, que mostra um crescimento do volume com o aumento do diâmetro, serviu como base para os cálculos que resultaram nos valores tabelados. Essa tabela permite visualizar de forma objetiva como variações no diâmetro do furo, desde 102 mm até 222 mm, impactam diretamente o volume de rocha desmontada, que varia de 94,73 m³ a 306,07 m³ por furo.

A combinação da análise gráfica com os valores tabulados facilita o planejamento detalhado do desmonte, fornecendo uma referência quantitativa que auxilia na escolha do diâmetro ideal para maximizar a eficiência na fragmentação de rochas. A tabela, gerada com base nos dados do gráfico, oferece uma ferramenta prática para prever e ajustar o volume desmontado em função do diâmetro dos furos, otimizando a carga de explosivo e garantindo o controle da operação.

5.2 Influência da densidade do explosivo no volume de rocha desmontada

Neste tópico, buscou-se representar graficamente a influência da densidade do explosivo sobre o volume de rocha desmontada em operações de desmonte de minério de ferro. Utilizou-se um diâmetro do furo de 203,2 mm (8"), que é geralmente adotado devido à sua capacidade de comportar uma carga explosiva maior, essencial para o desmonte eficaz de rochas densas e resistentes.

Para avaliar essa influência, foram utilizados explosivos com densidades específicas, de acordo com os cenários de aplicação industrial descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Exemplos de densidades de explosivos comerciais utilizados em desmonte de rochas.

Tipo de explosivo	Marca	Densidade (g/cm ³)
ANFO	Yara Brasil	0,82
Emulsão Explosiva	Enaex Brasil - Ibegel®	1,15
Emulsão Explosiva	Enaex Brasil - Ibemux®	1,20
Emulsão Explosiva	Enaex Brasil - Vertex®	1,25
Explosivo Gelatinoso	Mario Artur Montês - GELAMONITE 33	1,40
Explosivo Gelatinoso	Britanite - Gelamonite	1,50
Dinamite	Orica Mining Services - Senatel™ Magnafrac	1,20
Dinamite	Enaex Brasil - Riogel®	1,25

Fonte: Pesquisa realizada pelo autor.

Diferentes valores de densidade dos explosivos foram utilizados pelo *software* desenvolvido, os quais forneceram os valores correspondentes aos parâmetros do plano de fogo de acordo com a densidade selecionada. Essa abordagem permitiu a visualização da influência da densidade do explosivo na eficiência do desmonte

(volume de rocha desmontada por furo), gerando dados cuja aplicação em cenários reais pode ser avaliada. Os resultados obtidos reforçam a importância de integrar os valores de densidade aos cálculos do plano de fogo, garantindo maior confiabilidade nas operações de desmonte de rochas.

Parâmetros do Plano de Fogo

Dados de entrada

Densidade do explosivo (g/cm ³)	0,82	
Densidade da rocha (g/cm ³)	5,26	
Diametro do explosivo (")	8	
Altura do Banco (m)	12	
Fragmentação da Rocha	0,8	K = 0,9 Fragmentação Grosseiro K = 0,8 Fragmentação média K = 0,7 Fragmentação fina
Ângulo de inclinação do furo (°)	0	
Diametro do Furo (mm)	203,2	
<input type="button" value="Calcular"/>		
Afastamento (m)	4,42	
Subfuração (m)	1,33	
Erro da Perfuração	0,60	
Profundidade do Furo (m)	13,33	
Afastamento Prático (m)	3,81	
Espaçamento (m)	5,23	
Tampão (m)	2,67	
Volume de rocha por furo (m ³)	239,63	
Altura coluna de explosivo (m)	10,65	
Altura da carga de coluna (m)	6,93	
Altura da Carga de Fundo (m)	3,73	

Figura 11: Parâmetros do plano de fogo calculados para densidade do explosivo igual a 0,82 g/cm³.

Os resultados obtidos foram representados graficamente, conforme ilustrado na Figura 12, que mostra a relação entre a densidade do explosivo (D_e) e o volume de rocha desmontada (V). Observa-se que a curva apresenta um comportamento aproximadamente linear e uma “reta” com pequena inclinação, indicando que, apesar do aumento gradual na densidade dos explosivos, o impacto no volume de rocha desmontada sofre pequenas alterações.

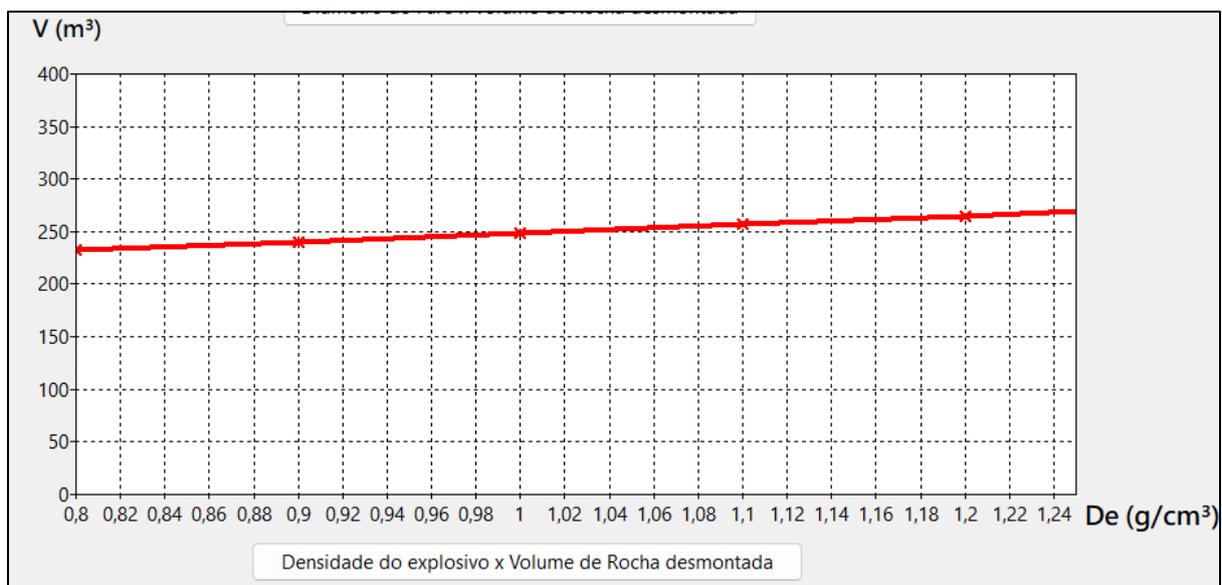


Figura 12: Relação entre a densidade do explosivo (De) e o volume de rocha desmontada (V).

A partir do gráfico gerado, foi possível confeccionar a Tabela 3 que relaciona o volume de rocha desmontada com cada explosivo apresentado na Tabela 2, considerando suas respectivas densidades. Essa tabela fornece uma visão clara e detalhada do comportamento de cada explosivo no processo de desmonte, permitindo identificar o volume fragmentado para cada tipo de densidade testada de acordo com o modelo utilizado neste trabalho.

Tabela 3: Relação entre a densidade do explosivo e o volume de rocha desmontada por furo. Os demais parâmetros mostrados na Figura 11 (dados de entrada) não foram alterados.

Tipo de explosivo	Densidade (g/cm³)	Volume de rocha desmontada por furo (m³)
ANFO	0,82	239,63
Emulsão Explosiva	1,15	266,67
Emulsão Explosiva	1,20	270,87
Emulsão Explosiva	1,25	275,10
Explosivo Gelatinoso	1,40	287,94
Explosivo Gelatinoso	1,50	296,63
Dinamite	1,20	270,87
Dinamite	1,25	275,10

Observa-se, como era esperado, que explosivos com densidades mais baixas, como o ANFO (0,82 g/cm³), apresentam volumes de rocha desmontada inferiores, enquanto explosivos com maior densidade, como o explosivo gelatinoso de 1,50 g/cm³, resultam em volumes maiores. No entanto, os incrementos no volume de rocha desmontada entre diferentes densidades seguem uma tendência aproximadamente linear e uma curva de baixa inclinação, confirmando que o impacto da densidade no volume fragmentado não é tão expressivo quanto outros fatores, como o diâmetro do furo.

5.3 Gráficos Diâmetro do Furo e Densidade do Explosivo *versus* Volume de rocha desmontada por furo

No presente estudo, verificou-se que o diâmetro do furo (D_f) influencia diretamente no volume de rocha desmontada (V), apresentando um comportamento crescente, como mostrado na Figura 13. À medida que o diâmetro do furo aumenta, o volume desmontado cresce de forma significativa. Por exemplo, para $D_f = 127$ mm, o volume desmontado é de $131,72$ m³, enquanto para $D_f = 203$ mm, esse valor mais que dobra, atingindo $266,69$ m³. Os valores de entrada utilizados para os testes, como altura do banco (H_b), estão detalhados na Figura 9, permitindo a análise do comportamento do volume desmontado em diferentes condições.

Além disso, a densidade do explosivo (D_e) foi avaliada em relação ao volume de rocha desmontada. Conforme os dados de entrada apresentados na Figura 11, para valores de (D_e) variando entre $0,8$ g/cm³ e $1,3$ g/cm³, a variação no volume desmontado foi menos acentuada em comparação ao diâmetro do furo. Isso demonstra que o diâmetro do furo exerce maior influência sobre o volume de rocha desmontada, enquanto a densidade do explosivo apresenta uma contribuição menor.

A interface desenvolvida para este estudo se destacou ao facilitar a análise dos valores calculados em cada teste, apresentando os resultados de forma clara e prática. Essa funcionalidade permitiu observar com precisão os volumes desmontados para diferentes parâmetros, proporcionando suporte eficiente para as análises realizadas.

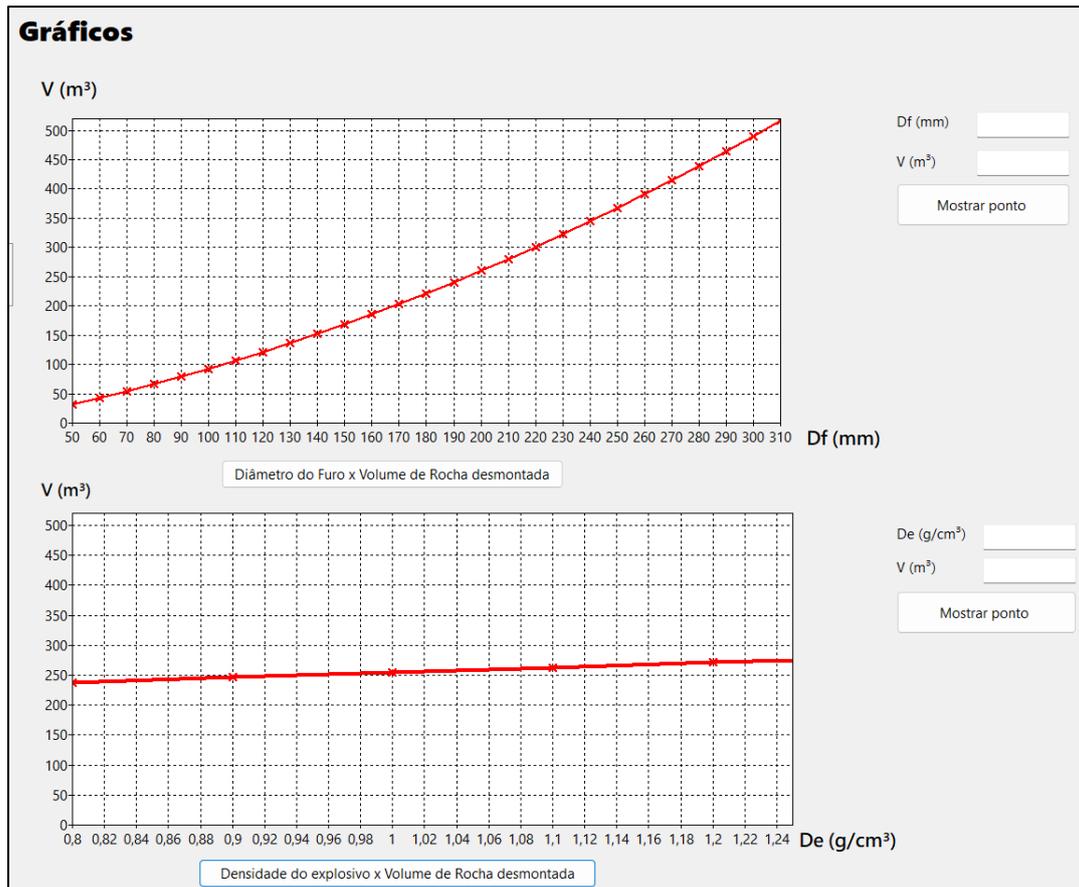


Figura 13: Gráficos comparativos mostrados na interface do aplicativo desenvolvido. Na figura, Df = diâmetro do furo, De = densidade do explosivo e V = volume de rocha desmontada por furo.

5.4 Análise da redução do diâmetro do furo e aumento da densidade do explosivo

Para realizar uma análise da influência da densidade do explosivo sobre o diâmetro do furo no plano de fogo, utilizou-se a funcionalidade "Mostrar ponto" da interface desenvolvida (Figura 15). Essa ferramenta possibilitou a definição de uma meta para um novo teste, cujo objetivo foi manter o volume de rocha desmontada (266,67 m³) obtido com um *bit* de perfuração de 8" (203 mm) conforme Figura 14, porém utilizando um *bit* de perfuração de 7" (178 mm), sendo alterada, unicamente, a densidade do explosivo (Figura 15). Essa abordagem visa avaliar a eficiência do plano de fogo ao reduzir o diâmetro do furo, compensando essa alteração por meio do ajuste da densidade do explosivo, de modo a garantir a manutenção do volume desmontado. Tal estratégia destaca o potencial de otimização operacional, o que pode possibilitar a redução dos custos com a perfuração sem comprometer o desempenho esperado (uma análise detalhada dos custos envolvidos não foi realizada neste trabalho).

Parâmetros do Plano de Fogo

Densidade do explosivo (g/cm ³)	<input type="text" value="1.15"/>	
Densidade da rocha (g/cm ³)	<input type="text" value="5.26"/>	
Diâmetro do explosivo (")	<input type="text" value="8"/>	
Altura do Banco (m)	<input type="text" value="12"/>	
Fragmentação da Rocha	<input type="text" value="0.8"/>	K = 0.9 Fragmentação Grosseiro K = 0.8 Fragmentação média K = 0.7 Fragmentação fina
Ângulo de inclinação do furo (°)	<input type="text" value="0"/>	
Diâmetro do Furo (mm)	<input type="text" value="203.2"/>	
<input type="button" value="Calcular"/>		
Afastamento (m)	<input type="text" value="4,72"/>	
Subfuração (m)	<input type="text" value="1,42"/>	
Erro da Perfuração	<input type="text" value="0,61"/>	
Profundidade do Furo (m)	<input type="text" value="13,42"/>	
Afastamento Prático (m)	<input type="text" value="4,12"/>	
Espaçamento (m)	<input type="text" value="5,40"/>	
Tampão (m)	<input type="text" value="2,88"/>	
Volume de rocha por furo (m ³)	<input type="text" value="266,67"/>	
Altura coluna de explosivo (m)	<input type="text" value="10,53"/>	
Altura da carga de coluna (m)	<input type="text" value="6,85"/>	
Altura da Carga de Fundo (m)	<input type="text" value="3,69"/>	

Figura 14: Valores exibidos na interface do aplicativo desenvolvido, entre eles $D_f = 8'' = 203,2 \text{ mm}$, $V = 266,67 \text{ m}^3$ e $D_e = 1,15 \text{ g/cm}^3$.

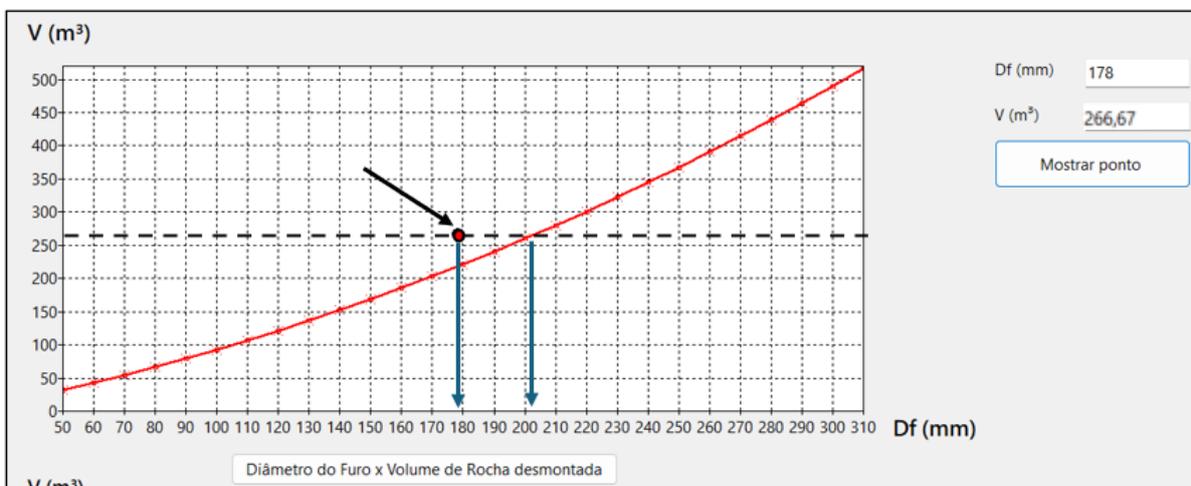


Figura 15: Diâmetro do furo *versus* Volume de rocha desmontada com a meta indicada pela seta na figura ($D_f = 7'' = 178 \text{ mm}$, $V = 266,67 \text{ m}^3$ e valor da densidade do explosivo, D_e , a ser determinado).

Visando a meta estabelecida, foi necessário ajustar a densidade do explosivo utilizado. Inicialmente, utilizou-se uma emulsão com densidade de 1,15 g/cm³ (conforme figura 14). No entanto, optou-se pela substituição por um explosivo de maior densidade, com 1,80 g/cm³ (Figura 16).

Parâmetros do Plano de Fogo

Densidade do explosivo (g/cm ³)	1.8	
Densidade da rocha (g/cm ³)	5.26	
Diâmetro do explosivo (")	7	
Altura do Banco (m)	12	
Fragmentação da Rocha	0.8	K = 0.9 Fragmentação Grosseira K = 0.8 Fragmentação média K = 0.7 Fragmentação fina
Ângulo de inclinação do furo (°)	0	
Diâmetro do Furo (mm)	178	
<input type="button" value="Calcular"/>		
Afastamento (m)	4,66	
Subfuração (m)	1,40	
Erro da Perfuração	0,58	
Profundidade do Furo (m)	13,40	
Afastamento Prático (m)	4,08	
Espaçamento (m)	5,38	
Tampão (m)	2,86	
Volume de rocha por furo (m ³)	266,69	
Altura coluna de explosivo (m)	10,54	
Altura da carga de coluna (m)	6,85	
Altura da Carga de Fundo (m)	3,69	

Figura 16: Valores exibidos na interface do aplicativo desenvolvido, com Df e De alterados (Df = 7" = 178 mm, V = 266,69 m³ e De = 1,8 g/cm³).

Essa alteração permitiu que a curva de volume de rocha desmontada atingisse o ponto da meta definida, como mostrado na Figura 17. Dessa forma, ficou comprovado que o uso de um explosivo com densidade de 1,8 g/cm³ possibilitou manter o volume de rocha desmontada equivalente ao obtido com um diâmetro de 8" (203 mm), mesmo reduzindo o diâmetro do bit de perfuração para 7" (178 mm).

No entanto, é importante destacar que a densidade de 1,8 g/cm³ não está dentro das especificações comerciais disponíveis no mercado para explosivos

utilizados em operações de desmonte de rochas. Essa densidade foi inserida no *software* exclusivamente para fins de simulação, com o objetivo de analisar como ajustes na densidade do explosivo poderiam compensar a redução no diâmetro do furo. Trata-se, portanto, de um cenário teórico utilizado para alcançar o objetivo específico de adaptar a densidade do explosivo a mudanças no diâmetro do bit de perfuração.

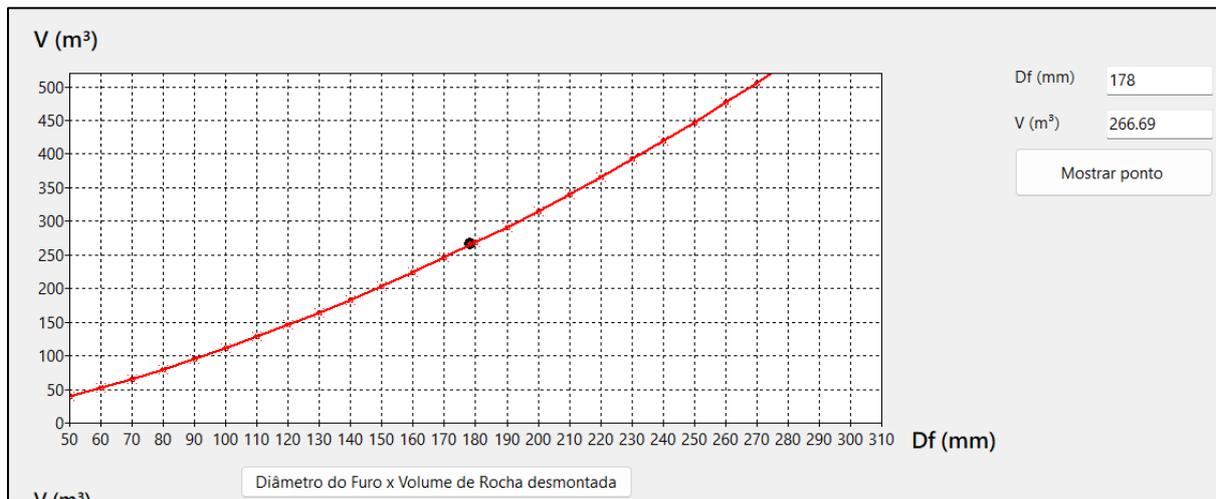


Figura 17: Diâmetro do furo versus Volume de rocha desmontada com a meta atingida ($D_f = 7'' = 178 \text{ mm}$, $V = 266,69 \text{ m}^3$ e $D_e = 1,8 \text{ g/cm}^3$).

Essa abordagem comprovou a viabilidade de analisar cenários diferentes para o plano de fogo, demonstrando que ajustes na densidade do explosivo podem compensar reduções no diâmetro do bit de perfuração. Isso permite a manutenção do volume de rocha desmontada sem comprometer a eficiência operacional, oferecendo alternativas para adaptar os parâmetros do desmonte às necessidades específicas de cada operação.

No entanto, é essencial considerar os impactos que o uso de densidades fora dos padrões comerciais pode trazer. Embora essas densidades tenham sido utilizadas exclusivamente para simulações teóricas, elas podem influenciar diretamente aspectos críticos da operação, como os níveis de vibração e ruído gerados. Esses fatores são especialmente relevantes para a segurança de comunidades situadas nas proximidades da mina, pois níveis excessivos de vibração podem causar danos a edificações e infraestrutura local, além de prejudicar a qualidade de vida dos moradores. Por esse motivo, o uso de densidades fora das especificações do mercado deve ser restrito a análises teóricas, evitando aplicações

práticas que possam comprometer a segurança operacional e o bem-estar das comunidades.

Esses resultados reforçam a importância de um planejamento minucioso que considere a interação entre a densidade do explosivo e o diâmetro do furo. O *software* desenvolvido demonstrou sua capacidade de explorar cenários teóricos e fornecer insights valiosos, permitindo a análise de alternativas que, em condições reais, possam otimizar não apenas a eficiência e a segurança operacional, mas também a proteção dos operadores e das comunidades vizinhas à operação de desmonte de rochas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um *software* na IDE Lazarus para auxiliar no planejamento de planos de fogo em minas a céu aberto, com foco na determinação de parâmetros operacionais e na análise gráfica de variáveis críticas para o desmonte de rochas. Os resultados obtidos demonstraram que o *software* desenvolvido atende plenamente aos objetivos propostos, permitindo a realização de cálculos precisos e a visualização clara dos impactos de parâmetros como diâmetro do furo e densidade do explosivo no volume de rocha desmontada.

O *software* se mostrou eficaz na determinação de parâmetros operacionais de um plano de fogo, utilizando a densidade média de rochas típicas da mineração de ferro a céu aberto. Essa funcionalidade garante que o planejamento seja baseado em dados realistas e alinhados às condições práticas da operação. Além disso, a ferramenta possibilitou avaliar, por meio de análises gráficas, a influência do diâmetro do furo e da densidade do explosivo no volume desmontado, evidenciando como essas variáveis interagem no contexto de operações de desmonte.

Um dos aspectos mais relevantes foi a capacidade do *software* de simular cenários teóricos com densidades de explosivos que, embora atendam às especificações técnicas, podem estar fora dos padrões estabelecidos no mercado. Esses testes permitiram compreender como ajustes na densidade do explosivo podem compensar reduções no diâmetro do furo, mantendo o volume de rocha desmontada constante. No entanto, é importante reforçar que esses cenários foram utilizados exclusivamente para fins de análise teórica, não sendo recomendados para aplicação prática devido aos riscos operacionais e de segurança envolvidos.

A relevância do *software* também se destacou na possibilidade de antecipar os impactos de alterações nos parâmetros operacionais sobre a segurança da operação. Foi evidenciado que o uso de densidades elevadas pode aumentar significativamente os níveis de vibração e ruído, o que representa riscos tanto para os operadores quanto para as comunidades próximas à mina. Vibrações excessivas podem comprometer a estabilidade das bancadas, danificar edificações e afetar a qualidade de vida dos moradores locais, reforçando a importância de um planejamento cuidadoso e responsável.

Portanto, o *software* desenvolvido cumpre seu papel como uma ferramenta prática e específica para o planejamento de planos de fogo, oferecendo suporte técnico e insights valiosos para a tomada de decisão em operações de desmonte de rochas. Ele contribui diretamente para o avanço de ferramentas computacionais na engenharia de minas, promovendo uma abordagem que integra eficiência, segurança e sustentabilidade. Estudos futuros podem explorar melhorias no *software* e ampliar as análises para incluir outros parâmetros operacionais e ambientais, fortalecendo ainda mais sua aplicabilidade no setor.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como desdobramentos futuros, sugere-se a aplicação do *software* em condições reais de mineração para validar os resultados simulados e ajustar os modelos teóricos às particularidades das operações práticas. Recomenda-se também a inclusão do fator de fragmentação K , focando nas características do maciço rochoso, como densidade, resistência à compressão e presença de descontinuidades, para aprimorar a precisão na análise e planejamento do desmonte.

Além disso, o desenvolvimento de módulos adicionais para avaliar variáveis como inclinação dos furos e influências geológicas específicas do maciço poderá expandir a aplicabilidade do *software*. Por fim, a incorporação de funcionalidades que analisem os impactos ambientais e de segurança, como vibrações e ruídos, contribuirá para a elaboração de planos de fogo mais eficientes, seguros e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOTELHO, A. H. **Influência da operação de desmonte de rochas no carregamento de material fragmentado**. UFRGS, 2014.
- ENAEX, 2024. <https://www.enaex.com/br/pt/nossos-produtos/>. Acesso em 28/10/2024.
- FERREIRA, L. P. **O impacto do desmonte de rochas na produtividade das operações de mineração**. São Paulo: Editora Engenharia, 2020.
- GOMES, W. C.; GALIZA, P. L.; VIEIRA, R. A. **Emulsões explosivas e suas aplicações no desmonte de rochas**. Revista Brasileira de Engenharia de Minas, v. 10, n. 3, pp. 45-56, 2000.
- JIMENO, E. L. e FRANCISCO, J. A. C. **Manual de Perforación y Voladuras de Rocas**. Instituto Geológico y Minero de España, 1995.
- JOHANSSON, D. e OUCHTERLONY, F. "Design and Evaluation of Fragmentation in Aggregate Blasting." Swedish Blasting Engineering Journal, 10(3), pp.122-131, 2012.
- JOHANSSON, D. e OUCHTERLONY, F. **Intelligent blasting: The effect of explosive properties and initiation methods on fragmentation**. Mining Technology, 121(2), pp. 65-75, 2012.
- LAZARUS, **The professional Free Pascal RAD IDE**, Disponível em: <https://www.lazarus-ide.org/>, acesso dia 03 de novembro 2024.
- LUZ, A. C. **Técnicas de Perfuração e Desmonte de Rochas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Mineração, 2017.
- MACEDO, A. L. **Planejamento e controle de desmontes com explosivos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.
- MORAIS, A. **Modelagem matemática de desmonte de rochas visando a otimização**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2004.
- RIBEIRO, P. e CORREIA, F. **Fundamentos de desmonte de rochas na mineração**. Rio de Janeiro: Editora Técnica, 2011.
- SILVA, A. M. **Desmonte de rochas: eficiência e produtividade na mineração**. Rio de Janeiro: Editora Miner, 2018.
- Silva, V.C.E **Desmonte e Transporte de rochas**. Universidade Federal de Ouro Preto, 1995
- SILVA, V. C. e **Desmonte de rochas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- SOUZA, J. C. e COSTA, F. M. "Aplicação de desmonte controlado em mineração de calcário." Revista Brasileira de Engenharia de Minas, 4(2), pp. 75-82, 2015.