



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



AGNI APARECIDA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA PREVISÃO DA CURVA DE
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM DESMONTE DE ROCHAS: APLICAÇÃO
E ESTUDO DE CASO**

Ouro Preto - MG

Março de 2026

AGNI APARECIDA DOS SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA PREVISÃO DA CURVA DE
DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM DESMONTE DE ROCHAS: APLICAÇÃO
E ESTUDO DE CASO**

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

Orientadores:

Prof. Dr. Vladmir Kronemberger Alves

Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

Ouro Preto - MG

Março de 2026



FOLHA DE APROVAÇÃO

Agni Aparecida dos Santos

Desenvolvimento de software para previsão da curva de distribuição granulométrica em desmonte de rochas: aplicação e estudo de caso

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

Aprovada em 05 de Março de 2026

Membros da banca

[Dr.] - Vladimir Kronemberger Alves - Orientador (UFOP)
[Dr.] - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - (UFOP)
[Dr.] - Elton Destro - (UFOP)
[Engenheiro de Minas] - Fernando Barros Puperi - (UFOP)

Vladimir Kronemberger Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28/07/2026



Documento assinado eletronicamente por **Vladimir Kronemberger Alves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/07/2026, às 12:31, 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 **1148464** e o código CRC **74E3669E**.

RESUMO

O desenvolvimento de *softwares* designados à previsão da curva granulométrica em desmontes de rochas atua no aprimoramento da estimativa da fragmentação resultante do uso de explosivos. Essas ferramentas integram modelos matemáticos e parâmetros operacionais para simular o comportamento do maciço rochoso. Sua aplicação permite avaliar cenários de desmonte e otimizar o dimensionamento das operações. Diante desses argumentos, o presente estudo objetivou desenvolver uma aplicação web voltada ao dimensionamento de planos de fogo e à previsão da curva granulométrica resultante do desmonte de rochas, utilizando modelos consagrados de fragmentação, com ênfase no método Kuz-Ram e suas variações. Para alcançar tal objetivo, a metodologia de cunho quantitativo, foi segmentada em três etapas principais: seleção de modelos matemáticos para dimensionamento do plano de fogo e previsão granulométrica, desenvolvimento do *software* BlastPro e aplicação em um caso real de mineração. O *software* integrou equações consolidadas da literatura, com destaque para o modelo Kuz-Ram atualizado, priorizando viabilidade prática e disponibilidade de dados. A ferramenta foi implementada como aplicação web, com arquitetura modular e interface interativa. Por fim, os resultados previstos foram comparados com dados reais de campo, permitindo avaliar a aderência do modelo ao comportamento do maciço rochoso. Ao longo dos estudos, foi possível concluir que o desenvolvimento de uma aplicação web voltada ao dimensionamento de planos de fogo e à previsão da curva granulométrica em desmontes de rochas mostrou-se viável e eficiente nesta fase experimental, sendo fundamentado em modelos empíricos consolidados de fragmentação. O sistema agrega o método Kuz-Ram e suas variações, integrando base teórica e implementação computacional. O uso de dados reais de campo sugere coerência entre as previsões e os resultados observados. Dessa forma, a aplicação demonstra potencial como ferramenta de apoio técnico às operações de desmonte na engenharia de minas.

Palavras-Chave: BlastPro, Modelo de Kuz Ram, Demonte de rochas, Mina a céu aberto, Curva de distribuição granulométrica.

ABSTRACT

The development of *software* tools designed to predict the particle size distribution curve in rock blasting operations contributes to improving the estimation of fragmentation resulting from the use of explosives. These tools integrate mathematical models and operational parameters to simulate the behavior of the rock mass. Their application enables the evaluation of blasting scenarios and the optimization of operational design. In this context, the present study aimed to develop a web-based application for blast design and prediction of the particle size distribution resulting from rock blasting, using well-established fragmentation models, with emphasis on the Kuz-Ram method and its variations. To achieve this objective, a quantitative methodology was adopted and structured into three main stages: selection of mathematical models for blast design and fragmentation prediction, development of the BlastPro *software*, and application in a real mining case. The *software* integrated consolidated equations from the literature, highlighting the updated Kuz-Ram model, while prioritizing practical feasibility and data availability. The tool was implemented as a web application with a modular architecture and an interactive interface. Finally, the predicted results were compared with real field data, allowing the evaluation of the model's adherence to the rock mass behavior. Throughout the study, it was concluded that the development of a web-based application for blast design and prediction of particle size distribution in rock blasting is both feasible and effective, being grounded in consolidated empirical fragmentation models. The system incorporates the Kuz-Ram method and its variations, integrating theoretical foundations with computational implementation. Validation using real field data demonstrated consistency between predicted and observed results, indicating the application's potential as a technical support tool for blasting operations in mining engineering.

Keywords: BlastPro; Kuz-Ram; rock fragmentation; mining; particle size distribution curve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos de fragmentação com modelo TCM	45
Figura 2: Página inicial do BlastPro.....	58
Figura 3: Página de fragmentação	59
Figura 4: Inputs do maciço rochoso Blast Pro	62
Figura 5: Inputs do desmonte de Blast Pro	64
Figura 6: Inputs Inicial (a) e curva granulometria (b)	65
Figura 7: Inputs do plano de fogo de Blast Pro	66
Figura 8: Curva Granulométrica ajustada ao nível operacional da mina analisada...	67
Figura 9: Página de resultados do BlastPro	68
Figura 10: Desmonte e heterogeneidade dos fragmentos	69
Figura 11: Curva granulométrica quantificada no WipFrag	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do parâmetro Rock Mass Description.....	14
Tabela 2: Valores recomendados para planos de fatura	15
Tabela 3: Espaçamento entre as descontinuidades	15
Tabela 4: Composição do ANFO e da Emulsão (% em massa).....	20
Tabela 5: Afastamento e cálculo da resistência da rocha	27
Tabela 6: Espaçamento e cálculo da resistência da rocha	27
Tabela 7: Parâmetros geométricos para a equação da uniformidade	42
Tabela 8: Síntese comparativa entre os modelos utilizados	52
Tabela 9: Parâmetros geotécnicos e estruturais do maciço rochoso	61
Tabela 10: Parâmetros de desmonte	63

LISTA DE ABREVIATURAS

ANFO	Nitrato de Amônio e Óleo Combustível
KCO	<i>Kuznetsov–Cunningham–Ouchterlony</i>
JF	<i>Joint Factor</i>
JPA	<i>Joint Planes Angle</i>
JPS	<i>Joint Planes Spacing</i>
RDM	<i>Rock Mass Description</i>
RDI	<i>Rock Density Influence</i>
RMS	Força Relativa em Massa
TCM	<i>Toralde–Cunningham–Moss</i>
VOD	<i>Velocity of Detonation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	Maciço Rochoso	12
3.1.1	RMD	14
3.1.2	RDI	15
3.1.3	HF	16
3.2	Explosivos	17
3.2.1	ANFO	18
3.2.2	Emulsão	19
3.2.3	Explosivos encartuchados.....	20
3.3	Variáveis do Plano de Fogo	21
3.3.1	Variáveis Geométricas	22
3.3.2	Variáveis físico-químicas dos explosivos	23
3.3.3	Variáveis temporais.....	24
3.3.4	Variáveis ambientais	25
3.4	Dimensionamento do plano de fogo.....	25
3.4.1	Afastamento	26
3.4.2	Espaçamento	27
3.4.3	Subfuração.....	28
3.4.4	Profundidade do furo.....	29
3.4.5	Tampão	29
3.4.6	Altura de Carga	30

3.4.7 Razão de Carga	31
3.5 Modelos de previsão de fragmentação	32
3.5.1 Modelo Kuz-Ram Clássico	33
3.5.2 Atualizações recentes do modelo de Kuz-Ram.....	37
3.5.3 Modelo Kuz-Ram Estendido (KCO)	43
3.5.4 Modelo TCM (TWO-COMPONENT MODEL).....	44
4 METODOLOGIA	51
4.1 Seleção dos modelos matemáticos	51
4.2 Desenvolvimento do <i>software</i> blastpro	52
4.2.1 Ferramentas de Programação	52
4.2.2 Organização interna da aplicação.....	53
4.3 Aplicação do <i>software</i> no contexto real de mina	55
4.3.1 Caracterização do maciço rochoso	55
4.3.2 Dimensionamento do plano de fogo	56
4.3.3 Execução do desmonte e análise granulométrica.....	56
4.3.4 Comparação entre previsão e realidade	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 Interface de acesso e estrutura do ambiente computacional	58
5.2 Caracterização geológica e estrutural do maciço rochoso	60
5.3 Inserção dos parâmetros geotécnicos no sistema	61
5.4 Definição dos parâmetros operacionais de desmonte.....	63
5.5 Simulação da fragmentação e análise da curva granulométrica	64
5.6 Comparação do caso real	69
5.7 Comparação dos cenários operacionais	70
6 CONCLUSÃO.....	73
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rochas com explosivos é uma etapa crítica e influente no ciclo produtivo da mineração. A eficiência dessa operação impacta diretamente as etapas subsequentes de carregamento, transporte, britagem e moagem, interferindo tanto nos custos operacionais quanto na produtividade global do processo (Roi *et al.*, 2016). O desempenho do desmonte correlaciona-se à adequada definição das variáveis do plano de fogo, como malha de perfuração, tipo e razão de carga de explosivo, distribuição da energia, temporização e características geológicas do maciço. Essas variáveis interagem de forma complexa, e pequenas alterações em seus valores podem gerar significativas variações na fragmentação resultante (Joshi *et al.*, 2022; Scott *et al.*, 1999).

A compreensão dessa interação é importante para o aprimoramento do processo de desmonte e para o aumento da eficiência global da lavra. Assim, os métodos de previsão de fragmentação surgem como ferramentas analíticas capazes de estimar, de forma teórica, a distribuição granulométrica do material detonado a partir dos parâmetros operacionais e das propriedades do maciço rochoso. Tais métodos permitem avaliar previamente o efeito das variáveis do plano de fogo sobre a fragmentação, reduzindo a necessidade de ensaios empíricos e contribuindo para um planejamento mais preciso, seguro e econômico (Gebretsadik *et al.*, 2024; Oliveira, 2019).

Apesar desses métodos se arquitetarem em precisão e viabilidade, conforme pontuam Sui *et al.*, (2025) e Zhao *et al.*, (2025), ainda apresentam restrições quando aplicados a ambientes geológicos heterogêneos ou a operações de maior complexidade. Diante dessas limitações, ao longo dos anos ocorreu uma ascensão no uso de técnicas computacionais avançadas, em particular métodos de aprendizado de máquina, para a estimativa de parâmetros granulométricos, como o tamanho médio dos fragmentos (X_{50}) e a forma da distribuição de tamanhos.

Entre os modelos clássicos empregados na previsão da fragmentação, o método *Kuz-Ram* consolidou-se como uma das bases analíticas mais utilizadas na indústria mineral. Desenvolvido por Cunningham (1983), o modelo resulta da combinação da equação de Kuznetsov, que relaciona a energia específica do

explosivo às propriedades do maciço rochoso, com a função de distribuição de *Rosin-Rammler*, viabilizando a estimativa empírica da distribuição granulométrica do material fragmentado. Com o avanço das aplicações em campo, o modelo original foi progressivamente ajustado, originando variações como o *TCM (Two-Component Model)* e o *KCO (Kuznetsov–Cunningham–Ouchterlony)*, as quais introduzem correções destinadas a melhor representar diferentes condições operacionais e litológicas (Toralde; Cunningham, 2002; Ouchterlony *et al.*, 2005).

A simulação da fragmentação por meio desses modelos oferta uma série de vantagens operacionais, permitindo a comparação entre diferentes configurações de desmonte, a identificação de gargalos, a otimização da distribuição de energia e a redução de custos (Gebretsadik *et al.*, 2024). Quando integrada a uma visão sistêmica da lavra, essa prática possibilita ganhos significativos ao longo de toda a cadeia produtiva. A fragmentação adequada já no desmonte pode reduzir o consumo energético na britagem e moagem, reforçando a abordagem conhecida como *Mine to Mill (M2M)*, a qual propõe a integração entre as etapas de mina e usina visando à maximização da eficiência global (Morrell; Valery, 2001).

Em detrimento das vantagens da aplicabilidade desses modelos, o presente trabalho se fundamenta no *BlastPro*, um *software* gratuito, desenvolvido em ambiente web (www.blastpro.com.br), projetado para simplificar o acesso a ferramentas de simulação e elaboração de planos de fogo. A aplicação permite estimar a fragmentação resultante com base em diferentes cenários operacionais, bem como comparar os efeitos de variáveis como tipo de explosivo, espaçamento, *burden* e razão de carga. O público-alvo abrange pequenas e médias empresas que não dispõem de *softwares* comerciais de alto custo, além de instituições de ensino e pesquisa que buscam compreender de forma didática as relações entre os parâmetros de desmonte.

Vale mencionar, que a motivação e relevância desse estudo converge às metas da Agenda 2030. A fragmentação mais eficiente contribui para a Meta 7.3 da ODS 7, que visa dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética, uma vez que o tamanho de fragmento gerado no desmonte influencia diretamente o consumo energético na britagem, moagem e até no transporte. O desenvolvimento e disponibilização gratuita de uma ferramenta baseada em modelos científicos fortalecem a Meta 9.5 da ODS 9, que estimula a pesquisa científica, a inovação e a

modernização tecnológica da indústria mineral. Além disso, por se tratar de um *software* aberto e acessível, o *BlastPro* contribui para as Metas 4.3 e 4.4 da ODS 4, que visam ampliar o acesso igualitário à educação técnica e promover o desenvolvimento de habilidades profissionais relevantes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma aplicação web voltada ao dimensionamento de planos de fogo e à previsão da curva granulométrica resultante do desmonte de rochas, utilizando modelos consagrados de fragmentação, com ênfase no método Kuz-Ram e suas variações.

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever os principais modelos empíricos de previsão de fragmentação, incluindo o Kuz-Ram, TCM e KCO, abordando seus fundamentos teóricos, parâmetros de entrada e limitações de aplicação;
- Desenvolver a arquitetura do website utilizando o framework Angular, com a linguagem TypeScript e marcação HTML, garantindo responsividade, desempenho e interface intuitiva por meio do uso de CSS, Bootstrap e Angular Material;
- Implementar os algoritmos de cálculo para simulação da fragmentação e dimensionamento dos parâmetros do plano de fogo;
- Comparar os resultados obtidos em campo com o aplicativo desenvolvido, verificando a coerência dos resultados gerados pelo sistema;
- Disponibilizar o *software* em plataforma *web* gratuita, visando ampliar o acesso a pequenas e médias empresas do setor mineral, bem como a instituições de ensino e pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo fundamenta-se em pressupostos teóricos correlacionados o desenvolvimento do *software BlastPro* e a análise da fragmentação de rochas em desmontes a céu aberto. De modo inicial, são discutidos os principais conceitos relacionados à caracterização geomecânica do maciço rochoso e ao fator de rocha A, utilizado na avaliação da blastabilidade e no dimensionamento de planos de fogo (Lilly, 1986; Jimeno; López; Ayala, 1995; Santana, 2018).

Após, foram abordados os tipos de explosivos mais empregados em lavra a céu aberto, bem como suas propriedades físico-químicas relevantes para o projeto de desmonte, com destaque para ANFO, emulsões e explosivos encartuchados (Munaretti, 2002; Persson; Holmberg; Lee, 1994; Silva, 2019).

Na sequência, discute-se o conjunto de variáveis geométricas, químico-físicas, temporais e ambientais que compõem o plano de fogo, bem como as principais equações empíricas utilizadas para o seu dimensionamento, com ênfase em contribuições clássicas de autores como Konya e Walter (1990), Jimeno, López e Ayala (1995) e Silva (2019).

Por fim, são apresentados e comparados os modelos empíricos de previsão de fragmentação Kuz-Ram (em sua forma clássica e em versões atualizadas), KCO e TCM (Cunningham, 1983, 2005; Djordjevic, 1999; Ouchterlony, 2005; Mutinda *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023), que constituem a base conceitual para a simulação da curva granulométrica no BlastPro. Em suma, a revisão de literatura oferta um suporte necessário para a compreensão dos resultados obtidos e para a avaliação crítica do desempenho do *software* proposto.

3.1 Maciço Rochoso

A rocha é definida como um material sólido natural consolidado, formado por agregados minerais resultantes de processos geológicos. O maciço rochoso constitui-se por blocos de rochas ou rochas intactas delimitados por planos de fraquezas (Mesquita, 2008).

Jimeno, Ayala e López (1995) ressaltam que a variabilidade natural do maciço, marcada pela presença de descontinuidades, resistência heterogênea e diferentes graus de compactação, constitui um dos fatores mais desafiadores para o controle da fragmentação. Assim, compreender a interação entre os explosivos e o maciço não é apenas uma etapa preliminar do projeto, mas um requisito para otimizar a eficiência operacional, reduzir custos e mitigar impactos ambientais e de segurança.

A caracterização do maciço rochoso desempenha papel essencial nas operações de desmonte, uma vez que os parâmetros geomecânicos do maciço influenciam diretamente a forma como a energia do explosivo é dissipada, afetando a granulometria, o lançamento do material, a geração de finos e a própria estabilidade das bancadas (Roy *et al.*, 2016).

Buscando incorporar essas variáveis geomecânicas em cálculos de previsão de fragmentação, diversos modelos empíricos foram propostos ao longo das últimas décadas. Entre eles, destaca-se o índice de blastabilidade proposto por Lilly (1986), posteriormente associado ao fator de rocha A, desenvolvido a partir das formulações de Cunningham (1983). Esse fator sintetiza, em uma única equação, os principais atributos do maciço relacionados à friabilidade, fraturamento, densidade e resistência, permitindo traduzir o comportamento da rocha em um coeficiente aplicável ao dimensionamento do plano de fogo (Santana, 2018).

O fator A é determinado a partir da Equação 1:

$$A = 0,006 \cdot (RMD + RDI + HF) \quad (1)$$

em que:

RMD = Rock Mass Description (descrição do maciço rochoso);

RDI = Rock Density Index (índice de densidade da rocha);

HF = Hardness Factor (fator de dureza da rocha).

A Equação 1 representa de forma padronizada de quantificação do fator de rocha em modelos empíricos de previsão de fragmentação, permitindo sua utilização

direta no dimensionamento de planos de fogo e em simulações granulométricas (Cunningham, 1983). As seções subsequentes irão conceituar, formular e descrever sobre o RDM, RDI e HF.

3.1.1 RMD

O parâmetro *Rock Mass Description* (RMD), ou descrição do maciço rochoso, contribui para o cálculo do fator A ao incorporar aspectos geomecânicos como friabilidade, grau de fraturamento e compactação do maciço. Lilly (1986) propõe a classificação indicada na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação do parâmetro Rock Mass Description

Condição do maciço rochoso	RMD
Friável	10
Fraturado	JF
Compacto	50

Fonte: Adaptado (Lilly, 1986)

O termo JF (*Joint Factor*) é utilizado para quantificar o efeito das descontinuidades no comportamento do maciço durante o desmonte. Ele resulta da soma de dois parâmetros: JPA (*Joint Planes Angle*), que atribui um valor com base no ângulo de inclinação dos planos de fratura em relação à face livre, e JPS (*Joint Planes Spacing*), que avalia o espaçamento entre essas descontinuidades. A Equação (2) expressa esse relacionamento pela Equação 2:

$$JF = JPA + JPS \quad (2)$$

O JPA quantifica a influência do ângulo das descontinuidades na eficiência do desmonte. A Tabela 2 apresenta os valores recomendados em função da orientação dos planos de fratura.

Tabela 2: Valores recomendados para planos de fatura

Direção da descontinuidade	Valor atribuído
Descontinuidade Horizontal	10
Descontinuidade mergulhando para fora da face livre	20
Descontinuidade perpendicular à face livre	30
Descontinuidade mergulhando para dentro da face	40

Fonte: Adaptado (Lilly, 1986)

O JPS, por sua vez, reflete a influência do espaçamento entre as descontinuidades. Quanto maior o espaçamento, maior o valor atribuído, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Espaçamento entre as descontinuidades

Espaçamento entre as descontinuidades	Valor atribuído
Menor que 0.1m	10
Entre 0.1m à <i>oversize</i> da britagem primária	20
Maior que a <i>oversize</i> da britagem primária	50

Adaptado (Lilly, 1986)

Conforme Jimeno *et al.* (1995), os valores citados na Tabela 4 define critérios objetivos para a atribuição do parâmetro JPS, conduzindo sua aplicação direta na quantificação do fator de rocha em análises de desmonte. A utilização de faixas de espaçamento associadas a valores numéricos padronizados viabiliza a integração desse parâmetro aos modelos empíricos de fragmentação empregados no planejamento de desmontes a céu aberto.

3.1.2 RDI

De acordo com Silva (2019), escolha da densidade do explosivo deve estar alinhada às condições do maciço rochoso, de modo a favorecer o aproveitamento adequado da energia liberada durante a detonação e possibilitar a obtenção de uma fragmentação controlada. Essa adequação favorece o melhor desempenho do desmonte, ao mesmo tempo em que minimiza a demanda por intervenções adicionais

e favorece a condução da operação em condições mais seguras e com maior estabilidade.

O *Rock Density Influence* (RDI) representa a influência da densidade da rocha no fator de rocha A. Esse parâmetro traduz o efeito da massa específica do maciço na propagação das ondas de choque e na dissipação de energia. Sua determinação é feita pela Equação 3:

$$RDI = 25 \cdot D - 50 \quad (3)$$

em que:

D = densidade da rocha (g/cm³).

Acrescenta-se que o RDI, modelos empíricos de fragmentação tem como intuito incorporar propriedades físicas do maciço rochoso à estimativa da blastabilidade, contribuindo para uma caracterização mais consistente das condições de desmonte. Essa técnica é utilizada em projeto de fogo, nas quais a densidade da rocha é tratada como um parâmetro fundamental na avaliação da resposta do maciço à detonação (Cunningham, 2005).

3.1.3 HF

O *Hardness Factor* (HF) busca representar, de forma simplificada, o impacto da resistência da rocha no processo de fragmentação. Sua formulação pode ser feita a partir da resistência à compressão uniaxial (UCS) ou do módulo de Young (E), conforme disponibilidade de ensaios.

Para rochas com resistência considerada elevada, superior a 50MPa, Lilly (1986) relaciona HF à UCS pela equação 4:

$$HF = \frac{UCS}{5} \quad (4)$$

em que:

UCS = *Uniaxial Compressive Strength* (resistência à compressão uniaxial) (MPa).

Quando os dados disponíveis dizem respeito ao módulo de Young, para rochas com resistência inferior a 50Mpa, o autor propõe a equação 5:

$$HF = \frac{E}{5} \quad (5)$$

em que:

E = Young's Modulus (módulo de Young) (GPa).

Assim, o uso do *Hardness Factor* insere-se, destarte, em uma lógica de parametrização empírica, na qual grandezas mecânicas como resistência e rigidez são transformadas em coeficientes aplicáveis ao planejamento de desmontes. Essa abordagem de perfuração e desmonte pode ser usada como forma de compatibilizar resultados laboratoriais com modelos simplificados de previsão de fragmentação (Lilly, 1986).

3.2 Explosivos

O vocábulo “explosivo” desperta no leigo emoções relacionadas a ideias de destruição, catástrofes e guerras. Contudo, os explosivos deveriam estar muito mais relacionados à infinidade de aplicações em benefício da humanidade: mineração, estradas, túneis, barragens, abertura de canais e qualquer atividade que exija o arranque de rocha (Blanco, 2025).

Explosivos são materiais que, quando adequadamente iniciados, liberam elevados níveis de energia em um intervalo extremamente curto, produzindo ondas de choque capazes de promover a ruptura do maciço rochoso, predominantemente na direção da face livre (Britanite, 2009). Esse fenômeno é delineado de forma análoga à propagação de um impacto em um sistema de bolas de bilhar, no qual “a transferência do choque ocorre ao longo do conjunto, resultando no deslocamento apenas do último elemento” (Britanite, 2009, p.67).

Silva (2007) complementa que explosivos correspondem a materiais ou combinações químicas, atuante em distintos estados físicos, que, ao serem submetidos a estímulos térmicos ou mecânicos de energia suficiente — como aquecimento, fricção ou impacto — sofrem transformação parcial ou completa em gases em um intervalo de tempo reduzido, com consequente liberação de elevada quantidade de calor.

Silva (2019) argumenta que desde a década de 1940, os explosivos têm passado por contínuos avanços tecnológicos comumente com a evolução dos métodos de lavra, com foco no aumento da segurança, na melhoria da fragmentação da rocha, na resistência à presença de água e na redução dos custos operacionais. A seleção do explosivo adequado constitui uma etapa central no projeto de desmonte, pois depende das condições geológicas do maciço e de critérios técnicos e econômicos.

Com o avanço dessas tecnologias, os explosivos tornaram-se elementos indispensáveis na mineração, por representarem a etapa inicial da fragmentação do maciço rochoso. Em operações de lavra a céu aberto, os explosivos empregados concentram-se majoritariamente em composições à base de nitrato de amônio, notadamente o ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil), as emulsões bombeadas a granel e as emulsões encartuchadas (Freitas; Morais, 2020). Munaretti (1997) relata que a escolha entre essas famílias depende de fatores técnicos, operacionais, econômicos e ambientais, como velocidade de detonação, densidade, resistência à água, facilidade de manuseio, custo por tonelada desmontada e potencial de geração de gases tóxicos.

3.2.1 ANFO

O ANFO é um explosivo poroso composto basicamente por nitrato de amônio (AN) impregnado com óleo combustível (FO), configurando-se como uma das opções de menor custo no mercado, o que justifica sua ampla utilização em operações de grande escala (Silva, 2019). Contudo, essa combinação apresenta baixa resistência à água, o que reduz significativamente o desempenho em furos úmidos ou parcialmente inundados, além de resultar em menor densidade energética em

comparação a emulsões, podendo levar a fragmentação menos eficiente e maior geração de blocos superdimensionados (Oliveira, 2024).

O ANFO, de acordo com Vieira e Braga (2023), se sobressai pelo baixo custo e facilidade de fabricação, enquanto as emulsões ofertam maior flexibilidade de aplicação e melhor desempenho em maciços competentes ou em condições de umidade. Estudos recentes em minas brasileiras indicam que emulsões tendem a proporcionar fragmentação mais homogênea e maior segurança, ao passo que o ANFO mantém competitividade em cenários de furos secos e rochas de menor resistência.

Do ponto de vista de desempenho, para Vieira e Braga, (2023), o ANFO apresenta densidade intermediária e velocidade de detonação moderada, sendo mais adequado a maciços rochosos de competência baixa a média. Estudos de ecoeficiência aplicados à mineração indicam que, embora econômico, o ANFO pode apresentar carga ambiental mais significativa em termos de emissões de gases pós-detonação quando comparado a explosivos à base de emulsão.

3.2.2 Emulsão

As emulsões são explosivos modernos à base de nitrato de amônio, caracterizados por alta segurança, elevada resistência à água e bom desempenho em rochas mais competentes. Sua detonação ocorre apenas após sensibilização, sendo aplicadas diretamente nos furos por unidades móveis, o que garante eficiência e segurança operacional (Silva *et al.*, 2004).

Os explosivos do tipo emulsão representam uma evolução tecnológica em relação ao ANFO, como demonstrado na Tabela 4. Sua estrutura consiste em uma matriz em que minúsculas gotas de uma solução oxidante saturada (normalmente nitrato de amônio) estão dispersas em uma fase combustível contínua (óleo), estabilizadas por um agente emulsificante (Silva, 2019). Essa configuração confere ao produto alta resistência à água, tornando-o adequado para furos úmidos ou em condições de umidade severa.

Tabela 4: Composição do ANFO e da Emulsão (% em massa)

Produto	Nitrato de amônio (%)	Água (%)	Óleo diesel (%)	Oleato de sódio ou monooleato de sorbitol (%)	Total (%)
ANFO	94,50	0,00	5,50	0,00	100
Emulsão	77,30	16,70	4,90	1,10	100

Fonte: Adaptado (Silva, 2009; Ricardo; Catalani, 2007)

Conforme a Tabela aludida, a emulsão diferencia-se do ANFO pela adição de água e agentes emulsificantes, que garantem a estabilidade da mistura entre óleo e fase aquosa. Torna-se explosiva somente após a incorporação de um sensibilizante, sendo recomendado o uso de *booster* adequado para assegurar eficiência na detonação. Em rochas fraturadas, o carregamento exige maior controle, pois o vazamento do material pode comprometer o rendimento do explosivo e a segurança da operação (Silva, 2009; Ricardo; Catalani, 2007).

Além da resistência à água, as emulsões apresentam alta densidade e elevada velocidade de detonação, resultando em energia de choque superior e fragmentação mais eficiente e homogênea. Em operações de lavra a céu aberto, é comum o uso de emulsão a granel, carregada mecanicamente por caminhões específicos, o que permite melhor acoplamento da carga à parede do furo, maximiza a transferência de energia e contribui para a regularidade da pilha desmontada (Alves, 2019; Vieira; Braga, 2023).

3.2.3 Explosivos encartuchados

Os explosivos encartuchados englobam uma variedade de produtos pré-embalados em cartuchos de papel, plástico ou outros materiais, incluindo versões encartuchadas de emulsão, dinamites e gelatinosas. A principal vantagem dessa categoria reside na versatilidade e na facilidade de manuseio, sendo indicada para cargas de precisão, furos de diâmetro menor, carregamento manual e situações em que o carregamento mecânico a granel não é viável (Silva, 2019).

Em muitos casos, emulsões encartuchadas são utilizadas como carga de fundo em furos carregados com ANFO, garantindo o arranque adequado na base da bancada, ou como carga completa em desmontes de construção civil que exigem maior controle de vibrações e de deslocamento de blocos (Dorneles, 2013).

[...] a construção civil, mineração e demolições preferem o uso dos encartuchados de emulsão líquida ou em gel. [...] são empregados na forma binária, descarregados por caminhões-tanques, misturados adequadamente, e depois inseridos em fendas, fissuras, perfurações, para rompimento de grandes elevações rochosas de dureza média e alta; também são úteis para abrir estradas e túneis. A emulsão apresenta resistência à água, além de proporcionar manejo com ótimo nível de segurança, em razão de sua estabilidade (Lima, 2012, p.12)

Apesar dessas vantagens operacionais, o custo por quilograma de explosivo encartuchado é significativamente mais alto quando comparado ao ANFO e às emulsões a granel e o processo de carregamento tende a ser mais lento. Por essa razão, seu uso em lavra a céu aberto é frequentemente reservado a situações específicas, como furos de contorno, cortes de precisão ou desmontes com restrições ambientais e urbanas mais severas (Vieira; Braga, 2023).

3.3 Variáveis do Plano de Fogo

Conforme Geraldi (2011), o plano de fogo corresponde ao projeto elaborado para a fragmentação da rocha por meio de explosivos, no qual são previamente estabelecidas as principais variáveis do desmonte. Assim como ocorre na maioria dos projetos de engenharia, esse plano pode ser reformulado ao longo de sua execução, conforme as condições encontradas em campo, tendo como resultado esperado a detonação eficiente do maciço rochoso. Para a definição do plano de fogo, são considerados distintas variáveis.

Especificamente à caracterização do maciço e à seleção do explosivo, o plano de fogo passa a organizar como essa energia será introduzida no maciço ao longo do espaço e do tempo. Em termos práticos, o desempenho do desmonte resulta da interação de quatro grupos principais de variáveis: geométricas, químico-físicas, temporais e ambientais (Silva, 2019). Cada grupo responde a objetivos distintos, mas todos são interdependentes e, em conjunto, definem a fragmentação obtida, o

deslocamento da pilha, as vibrações geradas e o nível de segurança da operação (Jimeno *et al.*, 1995).

As variáveis geométricas dizem respeito à configuração espacial do desmonte e incluem altura de bancada, diâmetro de perfuração, afastamento, espaçamento, inclinação dos furos, subfuração, profundidade total do furo e comprimento do tampão. As variáveis temporais relacionam-se ao sistema de iniciação, aos tempos de retardo entre furos e entre linhas e ao sequenciamento da detonação. Por fim, as variáveis ambientais de controle envolvem vibração de partículas, sobrepressão aérea, ruído e risco de ultralancamento, condicionando o desmonte às exigências de segurança e às restrições legais e ambientais (Persson; Holmberg; Lee, 1994; SISKIND *et al.*, 1980).

3.3.1 Variáveis Geométricas

As principais variáveis geométricas do desmonte são a altura da bancada, o diâmetro do furo, o afastamento e o espaçamento. Em conjunto, esses parâmetros destacam o volume de rocha associado a cada furo e o grau de confinamento do explosivo. A altura da bancada atua na estabilidade dos taludes e a quantidade de material desmontado em cada ciclo. Para uma altura definida, o diâmetro do furo limita a carga de explosivo por metro de perfuração. O afastamento e o espaçamento controlam a distância até a face livre e a interação entre os volumes de rocha fragmentados por furos adjacentes (Jimeno *et al.*, 1995; Silva, 2019).

Bancadas mais baixas, associadas a diâmetros menores e malhas mais fechadas, tendem a contribuir a estabilidade geotécnica, a seletividade e o controle da diluição, à custa de maior frequência de desmontes e aumento do custo de perfuração por tonelada (Wyllie; Mah, 2007; Galdino, 2019). Em contraste, combinações de bancadas altas com diâmetros maiores e malhas mais abertas reduzem o custo unitário de perfuração e ampliam o volume desmontado por ciclo, mas tornam o plano de fogo mais sensível a desvios de furos, heterogeneidades do maciço e variações de carregamento, podendo resultar em fragmentação irregular, blocos superdimensionados e incremento de vibrações (Konya; Walter, 1990; Silva, 2019).

Outros parâmetros geométricos atuam como mecanismos de ajuste fino. A inclinação dos furos pode reduzir a necessidade de subfuração, melhorar a fragmentação na base da bancada e controlar a forma da pilha desmontada. Em maciços com fraturas subverticais, a inclinação permite interceptar as descontinuidades em ângulos mais favoráveis à ruptura, reduzindo a formação de blocos alongados e matacões (Langefors; Kihlström, 1978; Bhandari, 1997). A subfuração prolonga o furo além da base de projeto da bancada, com o objetivo de eliminar ressaltos e pisos irregulares, enquanto a profundidade total do furo resulta da combinação entre altura de bancada, subfuração e inclinação, afetando diretamente o tempo de perfuração, o consumo de explosivo e o volume desmontado por ciclo (Jimeno *et al.*, 1995; Silva, 2019).

O tampão, ou *stemming*, completa o conjunto geométrico ao controlar o confinamento superior dos gases de detonação. Seu comprimento e a qualidade do material utilizado influenciam o quanto da energia permanece no interior do furo e contribui para a fragmentação, em vez de se dissipar como ruído, sobrepressão aérea e ultralançamento. Tampões muito curtos ou mal executados favorecem a abertura prematura do furo, a fuga de gases e o lançamento de blocos; tampões excessivamente longos podem reduzir o deslocamento da pilha e resultar em pisos pouco aliviados (Langefors; Kihlström, 1978; Silva, 2019).

Em suma, a literatura corrobora para a ideia de que essas variáveis geométricas formam um sistema acoplado, em que alterações em um parâmetro repercutem nos demais. Por isso, recomenda-se que o dimensionamento inicial seja feito com base em equações empíricas e que o ajuste fino ocorra a partir de simulação matemática e análise dos resultados de campo.

3.3.2 Variáveis físico-químicas dos explosivos

As variáveis físico-químicas dos explosivos, como composição química, densidade, sensibilidade e propriedades de detonação preveem o desempenho do desmonte de rochas. Esses parâmetros correlacionam a velocidade de detonação, o volume de gases gerados e a forma como a energia é transferida ao maciço rochoso. O controle dessas características permite adequar o explosivo às condições

geológicas e operacionais, contribuindo para maior eficiência, previsibilidade e segurança nas operações de lavra e engenharia (Vieira; Braga, 2023; Biegańska *et al.*, 2024).

Paralelamente, em termos projeto, densidade, velocidade de detonação, energia específica, força relativa, resistência à água, sensibilidade e volume de gases gerados precisam ser compatibilizados com a geometria definida e com as propriedades do maciço. Explosivos de maior densidade e alta VOD, como emulsões a granel ou encartuchadas, tendem a ser mais adequados para rochas duras e malhas mais abertas, enquanto produtos com densidade e VOD intermediárias, como o ANFO, podem ser suficientes em maciços mais brandos e malhas mais fechadas (Persson; Holmberg; Lee, 1994; Silva, 2019).

Assim, as variáveis do explosivo modulam como a energia será distribuída no interior do “bloco elementar” definido pelas variáveis geométricas. Ajustes na razão de carga por furo, na escolha do tipo de explosivo para carga de fundo e coluna e na resistência à água empregada em cada trecho permitem adaptar o plano às condições específicas de cada bancada, mantendo a coerência com as metas de fragmentação e com os limites impostos pelo entorno.

3.3.3 Variáveis temporais

Ainda que a combinação entre geometria e explosivo defina o potencial energético do plano de fogo, o modo como essa energia é liberada ao longo do tempo depende essencialmente das variáveis temporais. Integram esse grupo o tipo de sistema de iniciação, os valores de retardo entre furos e entre linhas e o padrão de sequenciamento adotado. Esses parâmetros controlam o deslocamento progressivo da frente de desmonte, a interação entre as cargas e o pico de vibração percebido no entorno (Konya; Walter, 1990).

Os sistemas de iniciação podem ser elétricos, não elétricos ou eletrônicos, com diferentes graus de precisão, robustez e custo. Os valores de retardo entre furos e linhas determinam a sequência de transferência de carga e o caminho de alívio do maciço, enquanto o padrão de sequenciamento (por exemplo, detonação transversal,

paralela ao avanço da lavra ou em V) deve ser compatível com a direção desejada de lançamento do material, a proteção dos taludes finais e a localização de estruturas sensíveis. Esquemas de retardos bem dimensionados podem reduzir os níveis de vibração ao fragmentar a detonação em múltiplos eventos de menor massa, sem comprometer a produtividade (Siskind *et al.*, 1980; Cardu; Michel, 2015).

3.3. 4 Variáveis ambientais

As variáveis ambientais de controle tratam dos efeitos do desmonte sobre o entorno da mina e sobre o maciço remanescente. Vibração, sobrepressão aérea, ruído e ultralancamento figuram entre os parâmetros mais relevantes, sendo objeto de normas técnicas, condicionantes de licenciamento e políticas internas de segurança (Siskind *et al.*, 1980; Iramina *et al.*, 2018).

Em termos práticos, vibração e sobrepressão são monitoradas por meio de sismógrafos e microbarógrafos, enquanto ruído e ultralancamento exigem acompanhamento visual e registros de campo. O monitoramento sistemático desses efeitos permite calibrar equações empíricas e ajustar, de forma iterativa, variáveis como carga máxima por retardo, afastamento, espaçamento, comprimento de tampão e retardo entre linhas, de modo a compatibilizar metas de produção com limites de segurança e desempenho ambiental (Fontanelli, 2014; Iramina *et al.*, 2018).

Com esses quatro grupos de variáveis estabelecidos, o próximo passo consiste em apresentar o conjunto de equações empíricas utilizadas neste trabalho para o dimensionamento geométrico e energético do plano de fogo.

3.4 Dimensionamento do plano de fogo

O dimensionamento do plano de fogo consiste em transformar a caracterização do maciço, a escolha do explosivo e a definição das variáveis principais em parâmetros numéricos de projeto: afastamento, espaçamento, subfuração,

profundidade do furo, tampão, altura de carga e razão de carga. Em outras palavras, trata-se de converter o entendimento qualitativo das condições de lavra em uma malha de perfuração e carregamento capaz de produzir fragmentação adequada, custos competitivos e impactos ambientais controlados (Morimoto, 2017).

Pesquisadores Ash, 1963; Konya; 1983; Rustan; 1990; Jimeno *et al.*, 1995) propuseram equações empíricas para esse dimensionamento, em que relacionam características físicas da rocha, propriedades dos explosivos e parâmetros geométricos do plano de fogo. Neste trabalho, são utilizadas as relações apresentadas por Silva (2019) em desmonte de rochas, desenvolvidas com base nessas formulações clássicas e ajustadas para condições de campo brasileiras.

3.4.1 Afastamento

O afastamento (A), ou *burden*, é uma variável fundamental no dimensionamento de malhas de desmonte, pois determina o volume de rocha a ser fragmentado por cada furo e sua distância até a face livre. De acordo com Silva (2019), seu cálculo considera a densidade do explosivo e da rocha, o diâmetro do furo e, para diâmetros maiores, a resistência do maciço.

Para diâmetros inferiores a 127 mm, o afastamento pode ser estimado pela equação 6:

$$A = 0,01053 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \cdot d_e \quad (6)$$

em que:

A = afastamento (m);

ρ_e = densidade do explosivo (g/cm³);

ρ_r = densidade da rocha (g/cm³ ou t/m³);

d_e = diâmetro do furo (mm).

Para diâmetros superiores a 127 mm, Silva (2019) recomenda ajustar o coeficiente multiplicador em função da resistência da rocha, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Afastamento e cálculo da resistência da rocha

Resistência	Equação do Afastamento
Menor que 70 MPa	$A = 0,01053 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \cdot d_e$
70 Mpa a 120MPa	$A = 0,00967 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \cdot d_e$
Maior que 120 MPa	$A = 0,00877 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] \cdot d_e$

Fonte: Adaptado Silva (2019)

Dessa forma, as expressões incorporam indiretamente a energia do explosivo e a resistência da rocha, fornecendo um valor de afastamento inicial que deve ser validado e ajustado em campo com base na fragmentação obtida e no comportamento da pilha após o desmonte.

3.4.2 Espaçamento

O espaçamento (E) entre furos de uma mesma linha é dimensionado a partir do afastamento (A) e da resistência da rocha. Silva (2019) adota relações empíricas simples, que buscam manter uma razão apropriada entre esses dois parâmetros, conforme Tabela 6.

Tabela 6: Espaçamento e cálculo da resistência da rocha

Resistência	Equações de espaçamento
Menor que 70 MPa	$E = 1,25 \cdot A$
70 Mpa a 120 MPa	$E = 1,20 \cdot A$
Maior que 120 MPa	$E = 1,15 \cdot A$

Fonte: Adaptado Silva (2019)

em que:

A = afastamento (m);

E = espaçamento (m).

Na prática, essas relações procuram assegurar que a superposição das zonas de fragmentação seja suficiente para evitar blocos superdimensionados, sem, contudo, elevar desnecessariamente o número de furos e o custo de perfuração. Como em outros parâmetros, ajustes finos devem ser realizados com base em resultados de campo.

3.4.3 Subfuração

A subfuração (S), também chamada de subdrill, corresponde ao prolongamento do furo além da base da bancada, com o objetivo de garantir a completa fragmentação da rocha até o piso projetado e evitar a formação de ressaltos. Silva (2019) adota, como valor inicial, a relação é ilustrada da Equação 7.

$$S = 0,30 \cdot A \quad (7)$$

em que:

S = subfuração (m);

A = afastamento (m).

Valores insuficientes de subfuração resultam em pisos irregulares, presença de blocos residuais e necessidade de *reblast*es ou uso de rompedores hidráulicos, aumentando custos e atrasos na produção. Por outro lado, excesso de subfuração eleva o consumo de explosivos sem ganhos proporcionais em qualidade de piso e pode afetar a estabilidade na base da bancada (Jimeno *et al.*, 1995; Silva, 2019).

3.4.4 Profundidade do furo

A profundidade do furo, também chamada de metragem perfurada, é determinada a partir da altura da bancada, da subfuração e da inclinação do furo. Furos mais profundos demandam maior tempo de perfuração e maior consumo de explosivos, refletindo diretamente no custo operacional e na produtividade da perfuratriz. Furos mais rasos, por sua vez, podem comprometer a eficiência do desmonte e a uniformidade da fragmentação, especialmente em bancadas altas.

De forma geral, a profundidade total pode ser estimada pela equação 8:

$$Hf = \left(\frac{H_b}{\cos \alpha} \right) + \left[1 - \left(\frac{\alpha}{100} \right) \right] \cdot S \quad (8)$$

em que:

Hf = comprimento total do furo (m);

H_b = altura da bancada (m);

α = inclinação do furo em relação à vertical (°);

S = subfuração (m).

Essa relação mostra que, à medida que o furo se afasta da vertical, a metragem perfurada cresce para manter a mesma altura de bancada, o que impacta diretamente o custo e a razão de carga, devendo ser considerado em projetos que adotam altos ângulos de inclinação (Silva, 2019).

3.4.5 Tampão

O comprimento de tampão (T) é relacionado ao afastamento e à necessidade de garantir confinamento adequado dos gases de detonação. Silva (2019) sugere, como valor inicial, a relação 9:

$$T = 0,70 \cdot A \quad (9)$$

em que:

T = comprimento do tampão (m);

A = afastamento (m).

Esse valor procura equilibrar o confinamento da carga com a necessidade de alívio na região superior da bancada. Na prática, o comprimento do tampão é ajustado em função da fragmentação observada, da ocorrência de ultralançamento e dos níveis de ruído e sobrepressão aérea medidos em campo (Langefors; Kihlström, 1978; Silva, 2019).

3.4.6 Altura de Carga

O carregamento dos furos pode ser realizado utilizando um único tipo de explosivo ao longo de toda a coluna ou empregando duas cargas distintas, geralmente uma carga de fundo mais energética e uma carga de coluna de menor potência. O uso de duas cargas permite otimizar custo e desempenho, concentrando maior energia na base da bancada, onde é necessário garantir bom arranque, e reduzindo custos na coluna, onde as exigências de energia podem ser menores.

Silva (2019) propõe estimar a altura da carga de fundo (H_{CF}) pela equação 10:

$$H_{CF} = 0,30 \cdot (H_f - T) \quad (10)$$

em que:

H_{CF} = altura da carga de fundo (m);

H_f = comprimento total do furo (m);

T = comprimento do tampão (m).

A carga de coluna (H_{cc}) é, então, calculada pela equação 11:

$$H_{cc} = H_f - T - H_{CF} \quad (11)$$

em que:

H_{cc} = altura da carga de coluna (m);

Quando se utiliza apenas um tipo de explosivo, o comprimento total da carga corresponde a $H_f - T$. Em ambos os casos, Silva (2019) destaca que o comprimento das cargas deve ser ajustado com base no desempenho observado em campo, buscando reduzir custos sem comprometer a fragmentação e o perfil do piso.

3.4.7 Razão de Carga

A razão de carga representa a quantidade de explosivo utilizada para fragmentar um determinado volume ou massa de rocha, sendo usualmente expressa em kg/m³ ou kg/t. No contexto deste trabalho, considera-se a razão de carga em termos de volume de rocha por furo, conforme a relação 12:

$$RC_t = \frac{C_T}{V} \quad (12)$$

em que:

RC_t = razão de carga total (kg/m³);

C_T = comprimento total da coluna carregada (m) multiplicado pela densidade linear de carga (kg/m);

V = volume de rocha escavada por furo (m^3), determinado a partir de A , E e H_b .

Essa grandeza sintetiza a interação entre geometria, tipo de explosivo e propriedades do maciço. Em termos práticos, a razão de carga é ajustada a partir da observação da fragmentação, da granulometria alimentada na britagem e dos níveis de vibração e sobrepressão, constituindo um dos principais parâmetros de controle na etapa de otimização do plano de fogo (Silva, 2019; Bernardes, 2022).

Em síntese, o conjunto de equações apresentado nesta seção fornece ponto de partida coerente para o dimensionamento do plano de fogo a partir das características do maciço e das propriedades dos explosivos selecionados. Nos capítulos seguintes, essas relações serão aplicadas ao caso de estudo, permitindo avaliar o impacto das variáveis de projeto sobre a fragmentação obtida, os custos operacionais e os indicadores de desempenho ambiental do desmonte.

3.5 Modelos de previsão de fragmentação

Na prática do planejamento de desmontes, a fragmentação passou a ser utilizada como um critério operacional de controle, associado à eficiência do plano de fogo e à regularidade do material desmontado. Nesse cenário, os modelos empíricos de fragmentação são empregados como instrumentos de apoio à tomada de decisão, permitindo estimar tendências granulométricas a partir de variáveis geométricas, propriedades do explosivo e características do maciço (Cunningham, 1983; Jimeno *et al.*, 1995).

O modelo Kuz-Ram clássico, o modelo Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony (KCO) e o modelo de dois componentes (Two-Component Model – TCM) são modelos quantitativos mais pontuados na representação contínua da curva granulométrica. O modelo Kuz-Ram clássico resulta da combinação da equação de Kuznetsov com a função de distribuição de Rosin-Rammler e consolidou-se como uma referência para

a estimativa da distribuição granulométrica em desmontes de produção, devido à sua simplicidade e ampla validação em campo (Cunningham, 1983).

Posteriormente, Ouchterlony (2005) propôs o modelo KCO, que introduz a função Swebrec e um parâmetro adicional de ondulação, permitindo melhor representação da fração fina e a imposição de um tamanho máximo finito aos blocos, aprimorando a aderência do modelo a dados reais de fragmentação. Por outro lado, o modelo TCM, desenvolvido por Djordjevic, decompõe a distribuição granulométrica em duas componentes associadas a mecanismos distintos de ruptura, oferecendo uma abordagem mais detalhada para a análise da geração de finos em desmontes de produção (Djordjevic, 1999).

Além desses avanços, o próprio Cunningham revisitou o modelo Kuz-Ram décadas após sua proposição original, agregando analiticamente o efeito de variáveis temporais, como os retardos entre furos, assim como ajustes geométricos e no fator de rocha, com o objetivo de reduzir extrapolações não realistas do índice de uniformidade e ampliar a aplicabilidade do modelo a diferentes condições operacionais (Cunningham, 2005).

3.5.1 Modelo Kuz-Ram Clássico

O modelo Kuz-Ram é recorrente em estudos de desmonte por permitir a antecipação do comportamento granulométrico a partir de parâmetros diretamente definidos no plano de fogo. Arquiteta-se empiricamente por relacionar variáveis geométricas e energéticas do desmonte com tendências de fragmentação, sendo frequentemente empregado como ferramenta de apoio ao dimensionamento inicial e à avaliação comparativa de alternativas de projeto em lavras a céu aberto (Cunningham, 1983; Jimeno *et al.*, 1995).

O Kuz-Ram representa um arcabouço para ajustes locais e validações em campo, além de servir como referência para o desenvolvimento de formulações aprimoradas. Outrossim, ocorra restrições na representação de extremos granulométricos, o modelo mantém utilidade prática quando aplicado dentro de seus

limites conceituais, especialmente em análises preliminares e na calibração progressiva de parâmetros operacionais (Ouchterlony, 2005; Mutinda *et al.*, 2021).

Ademais, vale resgatar que modelo Kuz-Ram, introduzido em 1983 na Conferência de Luleå, foi elaborado para estimar a fragmentação de rochas resultante do emprego de explosivos. Apesar de sua simplicidade, o modelo oferta estimativas adequadas dos padrões de fragmentação, fundamentando-se nas formulações de Kuznetsov, na distribuição de Rosin-Rammler e no índice de uniformidade de Cunningham (Adebola *et al.*, 2018).

3.5.1.1 EQUAÇÃO DE KUZNETSOV

Kuznetsov (1973), com base em dados de desmontes com TNT, propôs uma relação empírica entre o tamanho médio dos fragmentos e a razão de carga, considerando um fator de rocha A que sintetiza as características geomecânicas do maciço.

No decorrer dos anos, Cunningham (1983) generalizou a expressão para outros tipos de explosivo por meio da força relativa ao ANFO (RWS). Em uma das formas mais utilizadas em aplicações práticas, a relação pode ser descrita pela Equação 13:

$$X_{50} = Ak^{-0,8}Q^{0,167}\left(\frac{155}{RWS}\right)^{0,633} \quad (13)$$

em que:

X_{50} = tamanho médio dos fragmentos (cm);

A = Fator de rocha;

k = Razão de carga (kg/m³);

Q = Carga de explosivo por furo (kg);

RWS = Representa a energia relativa em massa do explosivo comparada ao ANFO (%).

Essa formulação evidencia a função integradora do fator de rocha A, que permite incorporar, de forma simplificada, o efeito da geologia e da geomecânica do maciço sobre a fragmentação (Lilly, 1986).

3.5.1.2 ÍNDICE DE UNIFORMIDADE DE CUNNINGHAM

Com o objetivo de representar a dispersão dos tamanhos de fragmentos, Cunningham (1987, 1988) propôs uma equação empírica para o índice de uniformidade n , obtida a partir de campanhas de campo em desmontes de produção. Essa equação relaciona n a parâmetros geométricos do plano de fogo às proporções de carga do explosivo. A expressão original pode ser representada na Equação 14.

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{D}\right) \left(1 + \left(\frac{S/H}{2}\right)^{0,5} \left(\left(1 - \frac{W}{B}\right) \frac{L}{H}\right)\right) \quad (14)$$

Em que:

n = Índice de uniformidade;

B = Afastamento (m);

D = Diâmetro do Furo (mm);

S = Espaçamento (m);

W = Desvio do Furo (m);

L = Comprimento de carga (m);

H = Altura de Bancada (m).

Versões estendidas da Equação 11 incorporam termos adicionais para o caso de dois explosivos (carga de fundo e de coluna) com comprimentos distintos, o que permite representar configurações em que se combina, por exemplo, emulsão encartuchada na base e ANFO na coluna, conforme a Equação 15 (Cunningham, 1987; Cunningham, 2005).

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{D}\right) \cdot \left[1 + \left(\frac{S/B}{2}\right)^{0,5} \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(\frac{L_b - L_c}{L} + 0,1\right)^{0,1}\right] \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \quad (15)$$

Em que:

L = Comprimento de Carga (m);

L_b = Comprimento da carga de fundo (m);

L_c = Comprimento da carga de coluna (m).

3.5.1.3 EQUAÇÃO DE ROSIN-RAMMLER

A distribuição granulométrica acumulada é representada no modelo Kuz-Ram pela função de Rosin-Rammler, originalmente proposta para descrever a distribuição de partículas em sistemas de cominuição (Cunningham ,1983), conforme mostra a Equação 16:

$$P_{(x)} = 100 \cdot \left[1 - e^{-0,693 \cdot \left(\frac{X}{X_{50}}\right)^n}\right] \quad (16)$$

em que:

$P_{(x)}$ = Percentual passante para um tamanho de partícula (%);

X = Tamanho dos fragmentos (cm);

x_{50} = Tamanho médio dos fragmentos (cm);

n = Índice de Uniformidade de Cunningham.

Como abordado no contexto introdutório, a principal vantagem do Kuz-Ram é a simplicidade de aplicação, uma vez que utiliza parâmetros de fácil obtenção em campo (B , S , D , H , K , A) e fornece a curva de fragmentação completa a partir de

poucas entradas (Cunningham, 1983). Ainda que ocorra essas vantagens, abordagem representa restrições, como: dificuldade em representar adequadamente a fração fina, ausência de um limite superior finito para o tamanho dos blocos e insensibilidade explícita a variáveis temporais, como tempo de retardo e sua dispersão (Djordjevic, 1999; Ouchterlony, 2005; Zhang *et al.*, 2023). Esses aspectos motivaram o desenvolvimento de extensões, como os modelos KCO e TCM, e de revisões posteriores do próprio Kuz-Ram.

3.5.2 Atualizações recentes do modelo de Kuz-Ram

O modelo Kuz-Ram passou por revisões desde sua formulação original por Cunningham na década de 1980. Reconhecido por sua simplicidade e aplicabilidade prática, o modelo permitiu a análise de diferentes cenários de desmonte com base em parâmetros facilmente obtidos em campo. Em 2005, o próprio autor revisitou o modelo, ressaltando suas restrições, especialmente em relação à previsão da geração de finos, mas também reforçando seu potencial como ferramenta de apoio no planejamento de desmontes.

Entre as atualizações mais relevantes, destaca-se a inclusão de algoritmos que consideram o impacto do tempo de retardo entre furos e sua dispersão, um fator crítico para prever a fragmentação resultante. Além disso, o cálculo da uniformidade foi aprimorado com a incorporação de parâmetros que refletem melhor a resistência do maciço rochoso e limitam valores irreais, promovendo maior consistência. Essas mudanças tornaram o modelo mais robusto, preciso e capaz de oferecer previsões mais confiáveis sobre a distribuição dos tamanhos dos fragmentos.

3.5.2.1 TAMANHO MÉDIO

Uma atualização significativa no modelo Kuz-Ram foi a introdução do fator de tempo de retardo A_t , que considera a influência do intervalo de detonação entre os

furos na fragmentação das rochas. Esse fator foi baseado em estudos experimentais que correlacionaram a propagação de fraturas no maciço com o tempo de retardo, destacando que há um intervalo ideal $T_{m\acute{a}x}$ para maximizar a fragmentação (Cunningham, 2005).

A equação incorporando o fator A_t é expressa pela Equação 17:

$$X_{50} = A_t \cdot Ak^{-0,8} Q^{0,167} \left(\frac{155}{RWS} \right)^{0,633} \quad (17)$$

O fator A_t introduz o efeito dos retardos na estimativa do tamanho médio dos fragmentos, ajustando a previsão de X_{50} às condições temporais do desmonte. Sua aplicação consolida-se na sequência de detonação na fragmentação resultante (Cunningham, 2005).

3.5.2.2 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RETARDO

Com base nos estudos de Bergman *et al.* (1974), apresentados e expandidos por Cunningham (2005), verificou-se que a fragmentação atinge um pico máximo quando o tempo de retardo entre furos T é próximo de $T_{m\acute{a}x}$, determinado pela Equação 19:

$$T_{m\acute{a}x} = \left(\frac{15,6}{C_p} \right) \cdot B \quad (19)$$

Em que:

C_p : Velocidade sísmica (Km/s);

B : Afastamento (m);

O fator A_t é definido com base na razão $\frac{T}{T_{m\acute{a}x}}$, considerando dois casos distintos:

1. Para $0 \leq \frac{T}{T_{m\acute{a}x}} \leq 1$:

Nesse intervalo, o valor de A_t é determinado pela equação polinomial:

$$A_t = 0,66 \left(\frac{T}{T_{m\acute{a}x}} \right)^3 - 0,13 \left(\frac{T}{T_{m\acute{a}x}} \right)^2 - 1,5 \left(\frac{T}{T_{m\acute{a}x}} \right) + 2,05 \quad (20)$$

2. Para $\frac{T}{T_{m\acute{a}x}} > 1$:

Quando T excede $T_{m\acute{a}x}$, A_t é calculado de forma linear, conforme mostrado na equação 21:

$$A_t = 0,9 - 0,1 \left(\frac{T}{T_{m\acute{a}x}} \right) \quad (21)$$

Em que:

T = tempo de retardo entre furos (ms);

$T_{m\acute{a}x}$ = tempo de máxima fragmentação (ms).

Esses parâmetros indicam que tempos de retardo inferiores a $T_{m\acute{a}x}$ podem interferir negativamente na fragmentação, enquanto valores superiores podem resultar no deslocamento prematuro do maciço, diminuindo a eficiência da operação. Assim, a inclusão de A_t na equação de X_{50} refina a previsão do tamanho médio dos fragmentos (Zhang *et al.*, 2023).

3.5.2.3 ÍNDICE DE UNIFORMIDADE DE CUNNINGHAM

A metodologia do modelo de fragmentação foi aprimorada por Cunningham (2005) com a introdução de dois fatores cruciais para a previsão da uniformidade da distribuição granulométrica: a Razão de Dispersão R_s e o fator $\left(\frac{6}{A}\right)^{0,3}$, que consideram, respectivamente, a precisão do tempo de retardo e a resistência da rocha no processo de fragmentação.

Primeiramente, o fator R_s foi integrado ao modelo como a razão de dispersão entre o intervalo ideal de detonação e a precisão do sistema de iniciação. Este parâmetro foi formulado com base em análises de disparos de produção e está diretamente relacionado à influência da dispersão dos retardos no comportamento da fragmentação. A precisão do tempo de retardo tem um impacto significativo na homogeneidade da fragmentação, e a dispersão no tempo de detonação pode prejudicar a uniformidade dos fragmentos, gerando maior variabilidade no tamanho das partículas. A Razão de Dispersão R_s é dada pela fórmula 22:

$$R_s = \frac{6\sigma_t}{T} \quad (22)$$

Em que:

σ_t =Desvio padrão da dispersão dos retardos (ms);

T =Tempo de retardo nominal entre furos (ms);

A razão R_s reflete a influência da precisão do sistema de detonação sobre a uniformidade da fragmentação. Quanto maior o valor de R_s , maior será a dispersão entre os retardos e, portanto, maior será a variabilidade na fragmentação.

O segundo fator incorporado ao modelo é o $\left(\frac{6}{A}\right)^{0,3}$, que leva em consideração a resistência da rocha A no ajuste do índice de uniformidade n . Rochas mais duras, caracterizadas por maior valor de A , geram uma fragmentação mais homogênea, pois as fraturas secundárias são menos propagadas, resultando em fragmentos mais consistentes. A expressão $\left(\frac{6}{A}\right)^{0,3}$ foi adotada para ajustar a uniformidade da fragmentação, elevando o índice n em condições de maior resistência do maciço. O valor 6 foi escolhido como referência neutra para comparar diferentes condições de resistência, enquanto o expoente 0,3 reflete a relação não linear entre resistência e uniformidade, conforme observado experimentalmente por Cunningham (2005).

Com a introdução desses dois fatores, a equação ajustada para o índice de uniformidade n é descrita pela Equação 23:

$$n = \left(\frac{A}{6}\right)^{0,3} \cdot \left[0,206 + \left(1 - \frac{R_s}{4}\right)^{0,8}\right] \cdot \left(2 - 30\frac{B}{D}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{1 + \frac{S}{H}}{2}\right)^{0,5} \cdot \left[\left(1 - \frac{W}{B}\right)\frac{L}{H}\right]^{0,3} \quad (23)$$

Em que:

n : Índice de uniformidade que define a distribuição granulométrica.

A = Fator de resistência da rocha;

R_s = Razão de dispersão (Scatter Ratio);

B : Afastamento (m);

D : Diâmetro de perfuração (mm);

S : Espaçamento (m);

W : Desvio padrão da precisão de perfuração (m);

L : Comprimento de carga (m);

H : Altura da bancada (m).

Um fator importante nas atualizações do modelo Kuz-Ram foi a limitação de algumas relações geométricas, com o objetivo de evitar que os valores ultrapassassem limites realistas, o que poderia comprometer a precisão do modelo. Como mostrado na Tabela 1, ajustes significativos foram feitos para restringir as faixas de valores de parâmetros-chave, como o índice de uniformidade e as relações de espaçamento/adiamento $\frac{S}{B}$.

Adicionalmente, realiza-se modificações nas relações de comprimento de carga/altura da bancada $\frac{L}{H}$ e no fator de dureza da rocha A , com o objetivo de refletir de maneira mais precisa as condições geológicas e operacionais. Essas mudanças tornam o modelo mais robusto e aplicável, permitindo uma estimativa mais realista

dos efeitos das alterações no layout de furos e nas condições de desmonte, ajustando-se melhor à diversidade geológica e às tecnologias modernas de detonação.

Esses ajustes no modelo têm o objetivo de proporcionar estimativas de fragmentação mais precisas, considerando as limitações dos dados e das condições de operação, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros geométricos para a equação da uniformidade

α	$f(\alpha)$	α range	$f(\alpha)$ range
$\frac{S}{B}$	$\left(\frac{(1 + \alpha)}{2}\right)^5$	0,7-1,5	0,92-1,12
$30\frac{B}{d}$	$(2 - \alpha)^5$	24-36	1,2-0,9
$\frac{W}{B}$	$1 - \alpha$	0-0,5B	1-0,5
$\frac{L}{H}$	$\alpha^{0,3}$	0.2-1	0,62-1
A	$\left(\frac{\alpha}{6}\right)^{0,3}$	0,8-21	0,5-1,45
Scatter Ratio	n_s	0-1,6	0,87-1,21

Em que:

A = Fator de resistência da rocha;

R_s = Razão de dispersão (Scatter Ratio);

B : Afastamento (m);

D : Diâmetro de perfuração (mm);

S : Espaçamento (m);

W : Desvio padrão da precisão de perfuração (m);

L : Comprimento de carga (m);

H : Altura da bancada (m).

Esta equação ajustada permite calcular o índice de uniformidade, levando em consideração tanto a precisão do tempo de detonação quanto a resistência da rocha,

proporcionando uma previsão mais precisa da distribuição granulométrica dos fragmentos.

3.5.2.4 EQUAÇÃO DE ROSIN-RAMMLER

Para descrever a granulometria do material, não houve alterações no modelo de previsão, mantendo-se a utilização da equação de Rosin-Rammler.

3.5.3 Modelo Kuz-Ram Estendido (KCO)

O modelo KCO foi efetuado com o intuito de superar duas limitações centrais do Kuz-Ram: a baixa capacidade de ajuste na região de finos e a ausência de um tamanho máximo finito para os blocos. Para isso, Ouchterlony (2005) propôs substituir a função de Rosin-Rammler pela função Swebrec, e introduzir o parâmetro de ondulação b , que controla a curvatura da distribuição.

A função Swebrec pode ser formulada conforme a Equação 24.

$$P_{swe(x)} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{X_{m\acute{a}x}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{X_{m\acute{a}x}}{x_{50}}\right)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{X_{m\acute{a}x}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{X_{m\acute{a}x}}{x_{50}}\right)} \right]^b} \quad (24)$$

Em que:

$P_{swe(x)}$ = Percentual passante para o tamanho x ;

b = Parâmetro de ondulação;

x_{50} = Tamanho médio dos fragmentos, calculado pela equação de Kuznestsov e Cunningham.

$X_{m\acute{a}x}$ = Tamanho máximo teórico dos fragmentos, calculado a partir da equação:

$$X_{m\acute{a}x} = \sqrt{a \cdot \text{fastamento} \cdot \text{espaçamento}} \cdot 100 \text{ (mm)}.$$

3.5.3.1 PARÂMETRO DE ONDULAÇÃO

O parâmetro de ondulação é crucial para ajustar a função Swebrec aos dados de fragmentação, proporcionando uma melhor representação das distribuições de tamanho de fragmentos, percebe-se o cálculo desse parâmetro na Equação 25.

$$b = 2 \cdot \ln 2 \cdot \ln \left(\frac{X_{m\acute{a}x}}{X_{50}} \right) \cdot n \quad (25)$$

Em pesquisas com estudo de caso, os autores Mutinda *et al.*, (2021) e Kansake *et al.*(2016) verificaram que o KCO tende a apresentar melhor ajuste na faixa de partículas finas e a fornecer previsões mais realistas para o tamanho máximo dos blocos, sem perda significativa de simplicidade computacional em relação ao Kuz-Ram clássico. Por outro lado, assim como o modelo original, o KCO não incorpora explicitamente o efeito de variáveis temporais, como tempos de retardo e sua dispersão, focando essencialmente em parâmetros geométricos e de carga.

3.5.4 Modelo TCM (TWO-COMPONENT MODEL)

O modelo TCM, proposto por Djordjevic (1999), parte da premissa de que a fragmentação gerada pela detonação não resulta de um único mecanismo de ruptura, mas de dois processos distintos que atuam simultaneamente no maciço rochoso (Figura 1).

“[...] o primeiro de partículas finas, originadas relativamente próximo ao furo e fragmentadas por ruptura compressiva-cisalhante. Neste caso a estrutura do maciço rochoso é pouco relevante. O segundo conjunto é de material com granulometria maior que o primeiro e proveniente de regiões mais distantes do furo de desmonte, sendo criados devido a rupturas por tração, por abertura e extensão de fraturas preexistentes, planos de acamamento e descontinuidades do maciço” (Quaglio, p. 71, 2020).

O Two Component Model, também denominado modelo de fragmentação em duas componentes, foi embasado na precisão na estimativa da distribuição

granulométrica do material resultante do desmonte, especialmente no que se refere à fração fina (Djordjevic, 1999).



Figura 1: Processos de fragmentação com modelo TCM

Fonte: Djordjevic (1999).

Afirma-se ainda, ilustrado na Figura 1, na visão de Djordjevic (1999) que a concentração de energia gerada pela detonação nas proximidades do eixo do furo, associada à expansão dos gases liberados durante a explosão, ocasiona oscilações de pressão no maciço rochoso, as quais conduzem à formação de duas zonas concêntricas com distribuições granulométricas distintas: uma composta por partículas mais finas e outra caracterizada por fragmentos de maior dimensão.

3.5.4.1 FRAÇÃO DE FRAGMENTOS FINOS E GROSSOS

Na formulação do TCM, a fração de volume que sofre ruptura compressivo-cisalhante é expressa em função do raio da zona intensamente danificada ao redor do furo. Em termos simplificados, a fração de finos F_c pode ser representada pela Equação 26:

$$F_c = \frac{M_o}{M} = \left(\frac{\pi \cdot x^2}{B \cdot S} \right) \quad (26)$$

Em que:

x = Raio da zona de pulverização (m);

M_o = Massa da rocha que sofre ruptura compressivo-cisalhante (t);

M = Massa desmontada por furo (t);

S = Espaçamento (m);

B = Afastamento (m).

O raio r dessa zona é função do diâmetro do furo, da resistência à tração da rocha e da tensão de pico no furo devido à detonação, a qual, por sua vez, depende da densidade e da velocidade de detonação do explosivo (Djordjevic, 1999; Zhang *et al.*, 2023). Uma forma genérica da relação é dada pela Equação 27:

$$r = \frac{D}{\sqrt{24 \cdot \frac{T_o}{P_b}}} \quad (27)$$

Em que:

r = Raio da zona de fratura compressivo-cisalhante (mm);

D = Raio do furo (mm);

T_o = Resistência à tração da rocha (MPa);

P_b = Pico de tensão no furo devido à detonação (MPa).

O pico P_b de tensão no furo é definido pela Equação 28:

$$P_b = \rho \frac{VOD^2}{4} \quad (28)$$

Em que:

P_b =Pico de tensão no furo devido à detonação (MPa).

ρ = Densidade do explosivo (kg/m³);

VOD = Velocidade de detonação (m/s);

A fração de fragmentos grossos F_t resulta predominantemente da ruptura por tração e corresponde ao complemento da fração fina em relação ao volume total desmontado, sendo calculada de acordo com a Equação 29:

$$F_t = 1 - F_c \quad (29)$$

Em que:

F_t = Fração de fragmentos grossos por volume desmontado por furo;

F_c = Fração de fragmentos finos por volume desmontado por furo.

3.5.4.2 TAMANHO MÉDIO

Para a fração fina, o tamanho médio dos fragmentos é representado pelo parâmetro a , determinado a partir da fração volumétrica de finos e do tamanho médio global previsto pelo Kuz-Ram, conforme a Equação 30:

$$a = \frac{x}{\left(\frac{-\ln(1 - F_c)}{0,693} \right)^{1/d}} \quad (30)$$

a = Tamanho médio de fragmentos finos (cm);

F_c = Fração de fragmentos finos por volume desmontado por furo (%);

d = Índice de uniformidade da fração fina.

A fração grossa mantém comportamento compatível com o modelo Kuz-Ram e tem seu tamanho médio representado pelo parâmetro c , calculado pela Equação 31 proposta por Djordjevic (1999):

$$c = \frac{x}{\left(\frac{-\ln(1 - F_{t/100})}{0,693} \right)^{1/b}} \quad (31)$$

No qual:

c = Tamanho médio de fragmentos grossos (cm);

b = é o índice de uniformidade da fração grossa.

F_t = Fração de fragmentos grossos por volume desmontado por furo (%);

Em linhas gerais, a fragmentação proveniente do desmonte é delineada como o resultado da superposição de duas frações granulométricas distintas (equações. 22 e 23), conectadas a mecanismos diferenciados de ruptura do maciço rochoso. Cada fração apresenta parâmetros próprios de distribuição, refletindo oscilação nos processos de geração de finos e fragmentos grosseiros (Gomes, 2022).

3.5.4.3 ÍNDICE DE UNIFORMIDADE

Para a fração grossa, o índice de uniformidade é determinado conforme o modelo clássico de Kuz-Ram, utilizando a equação proposta por Cunningham (1983), apresentada no tópico 3.5.1.2. Já para a fração fina, o índice de uniformidade é calculado por meio da Equação 32:

$$d = n_{finos} = \frac{\ln \left[\ln \left(\frac{1}{(1 - F_c)^{0,693}} \right) \right]}{\ln \left(\frac{1}{x_{50}} \right)} \quad (32)$$

Em que:

F_c = Fração de fragmentos finos por volume desmontado por furo (%);

x_{50} = Tamanho médio de Kuz-Ram (cm);

DISTRIBUIÇÃO DOS FRAGMENTOS ROSIN-RAMMLER

Cada componente é modelada com uma distribuição do tipo Rosin-Rammler, com parâmetros próprios de tamanho médio e índice de uniformidade. A distribuição acumulada de finos $P_{1(x)}$ e de grossos $P_{2(x)}$ pode ser escrita, de forma análoga ao Kuz-Ram, e a distribuição total $P_{(x)}$ é obtida como combinação ponderada pela Equação 34:

$$P_{(x)} = 100 \cdot (1 - (1 - F_c) \cdot e^{-0,693\left(\frac{x}{a}\right)^b} - F_c \cdot e^{-0,693\left(\frac{x}{c}\right)^d} \quad (34)$$

Em que:

$P_{(x)}$ = Percentual passante para uma determinada granulometria da fração grossa (%);

F_c = Fração de fragmentos finos por volume desmontado por furo (%);

d = Índice de uniformidade da fração fina;

b = Índice de uniformidade da fração grossa;

a = Tamanho médio da fração fina (cm);

c = Tamanho médio da fração grossa (cm);

x = Tamanho dos fragmentos (cm);

Djordjevic (1999) mostra que essa decomposição permite representar de forma mais fiel a cauda fina da distribuição, especialmente em desmontes de alta energia, nos quais a zona de pulverização ao redor do furo é relativamente extensa. Estudos posteriores comparando Kuz-Ram, KCO e TCM indicam que o TCM tende a demonstrar melhor ajuste na região de finos, ao custo de maior complexidade

matemática e necessidade de dados adicionais de resistência e propriedades dinâmicas da rocha (Souza; Almeida; Lima, 2018; Bouterfif *et al.*, 2024).

3.5.4.4 SÍNTESE COMPARATIVA

Os modelos Kuz-Ram, KCO e TCM representam três níveis de detalhamento na modelagem da fragmentação. O Kuz-Ram clássico continua sendo a ferramenta de primeira escolha em muitas operações, pela relação favorável entre simplicidade e capacidade preditiva, especialmente após os ajustes recentes que incorporam tempo de retardo e correções geométricas (Cunningham, 1983; 2005).

O modelo KCO mantém a estrutura básica do Kuz-Ram, porém substitui a função de Rosin-Rammler pela função Swebrec, o que o torna mais robusto na representação de finos e de blocos grandes, sem aumento substantivo de complexidade (Ouchterlony, 2005; Mutinda *et al.*, 2021).

O modelo TCM, por fim, oferece uma descrição física mais rica ao separar a distribuição em duas componentes associadas a diferentes mecanismos de ruptura, sendo especialmente interessante quando a geração de finos é um aspecto crítico do projeto, ainda que demande maior quantidade de parâmetros e calibração (Djordjevic, 1999; Souza; Almeida; Lima, 2018).

Em consonância com os objetivos da Seção 2, que visa à comparação entre diferentes metodologias de previsão de fragmentação e sua aplicação a cenários específicos de lavra, o uso do BlastPro é apresentado como uma ferramenta capaz de operacionalizar esses conceitos e modelos em ambiente computacional. O *software* permite ao usuário simular distintos cenários de plano de fogo, estimar a curva granulométrica resultante e comparar alternativas de projeto. Nos capítulos subsequentes, o referencial teórico aqui sistematizado é aplicado ao estudo de caso selecionado, com o objetivo de avaliar o desempenho do *software* e discutir suas potencialidades e limitações como ferramenta de apoio à análise e à otimização de desmontes de produção.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada em três frentes complementares: (i) seleção do método matemático para o dimensionamento do plano de fogo e para a simulação da distribuição granulométrica; (ii) desenvolvimento do *software* BlastPro, responsável pela integração desses modelos; e (iii) aplicação prática da ferramenta em um caso real de mineração, com o objetivo de avaliar a aderência entre as estimativas geradas e os resultados observados em campo.

4.1 Seleção dos modelos matemáticos

O dimensionamento do plano de fogo fundamentou-se nas equações consolidadas da literatura e adaptadas por Silva (2019) no livro Desmonte de Rochas. Essas expressões, apresentadas no tópico 1.5 do Referencial Teórico, incluem os cálculos de afastamento, espaçamento, subfuração, razão de carga e demais parâmetros geométricos da malha de perfuração e desmonte. A utilização desse conjunto de equações permite padronizar o processo de dimensionamento e fornecer ao *software* uma base metodológica amplamente aceita na engenharia de desmonte.

Para a previsão da fragmentação, adotou-se a versão atualizada do modelo Kuz-Ram. A escolha deste modelo se deu por duas razões principais. Primeiro, porque é o único entre os modelos avaliados que incorpora explicitamente o efeito da temporização entre furos, variável reconhecidamente importante e ausente tanto na versão clássica do Kuz-Ram quanto nos modelos TCM e KCO. Segundo, porque opera com um conjunto de parâmetros normalmente disponíveis nas operações de lavra brasileiras, o que o torna mais aplicável às condições reais e reduz a necessidade de calibrações adicionais.

Modelos alternativos, como TCM, embora apresentem maior precisão na previsão de frações finas, exigem parâmetros adicionais difíceis de obter, dependem de calibração mais complexa ou requerem uma base de dados ampliada. Essas limitações inviabilizam sua implementação sistemática dentro do escopo do *software*

proposto neste trabalho. Na sequência, a Tabela 8 elucida a comparação dos modelos pré-estabelecidos.

Tabela 8 - Síntese comparativa entre os modelos utilizados

Critério	Kuz-Ram original	Kuz-Ram atualizado	TCM	KCO
Inputs necessários	Baixa	Baixa	Alta	Média
Temporização	Inclui	Não inclui	Não inclui	Não inclui
Precisão de Finos	Baixa	Média	Alta	Alta
Complexidade de implementação	Baixa	Baixa	Alta	Média
Calibração necessária	Baixa	Baixa	Alta	Baixa
Disponibilidade dos dados na mina	Alta	Alta	Baixa	Média
Robustez computacional	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa

Fonte: Autora (2025)

A implementação computacional considerou, portanto, não apenas o rigor teórico, mas também a viabilidade prática de aplicação e a acessibilidade dos parâmetros necessários para alimentar os modelos. Todas as equações específicas utilizadas para a simulação granulométrica encontram-se apresentadas integralmente nos tópicos da Revisão Bibliográfica.

4.2 Desenvolvimento do *software* blastpro

4.2.1 Ferramentas de Programação

O BlastPro foi desenvolvido como uma aplicação web, visando garantir maior acessibilidade, independência de instalação local e facilidade de uso tanto em ambientes operacionais quanto acadêmicos. Para essa finalidade, adotou-se o

framework Angular, escolhido por sua arquitetura modular orientada a componentes, que permite uma separação clara entre a interface da ferramenta e os serviços responsáveis pelos cálculos matemáticos. Essa organização favorece escalabilidade, manutenção simplificada e maior estabilidade da aplicação (ANGULAR, 2023).

A lógica computacional foi implementada em TypeScript, linguagem que amplia o JavaScript ao introduzir tipagem estática, classes e interfaces, o que reduz a ocorrência de erros, melhora a confiabilidade dos algoritmos numéricos e facilita o controle das estruturas de dados utilizadas nos modelos matemáticos (TYPESCRIPT, 2023). A interface gráfica foi construída com HTML e CSS, além do uso de bibliotecas de design como Bootstrap e Angular Material, que possibilitaram padronização visual, responsividade e uma interação mais intuitiva com o usuário (Yoshino, 2024).

A seleção dessas ferramentas teve como objetivo garantir acessibilidade multiplataforma, robustez no processamento dos cálculos e facilidade de interação, atributos essenciais para um *software* destinado ao uso técnico em engenharia de desmonte.

4.2.2 Organização interna da aplicação

A arquitetura do BlastPro foi estruturada em módulos principais e secundários. Os módulos principais correspondem às páginas de Plano de Fogo e Resultados, que concentram a execução dos cálculos e a apresentação dos outputs gerados. Os módulos secundários englobam as páginas de Home, Contato, Tutorial, Metodologia e Sobre Nós, cuja função é orientar o usuário, apresentar informações institucionais e fornecer suporte ao uso da ferramenta.

4.2.2.1 MÓDULO PRINCIPAL

O módulo de Plano de Fogo apresenta um formulário dividido em duas seções: a primeira dedicada às propriedades do maciço rochoso e a segunda aos parâmetros

dos explosivos. Esses inputs são necessários tanto para o dimensionamento do plano de fogo quanto para a simulação granulométrica.

Para garantir integração entre essas duas etapas, parte dos parâmetros exigidos pela simulação é gerada automaticamente pelos cálculos de dimensionamento, o que reduz o esforço do usuário e contribui para maior consistência entre as etapas. O usuário, no entanto, pode alterar manualmente os parâmetros calculados, permitindo ajustes conforme necessidades específicas e modificando o resultado final da simulação.

A organização geral da interface e a forma de apresentação dos resultados serão detalhadas no capítulo de Resultados.

4.2.2.2 MÓDULO SECUNDÁRIO

O módulo secundário da aplicação é composto pelas páginas de Home, Contato, Tutorial Metodologia e Sobre Nós. Embora não estejam diretamente vinculadas aos cálculos de dimensionamento ou às simulações granulométricas, essas páginas desempenham papel essencial na experiência do usuário e na organização interna do BlastPro. Sua função principal é fornecer suporte informativo, orientar a navegação e garantir que o usuário compreenda o funcionamento da ferramenta, sua fundamentação teórica e seus objetivos.

- A página Home apresenta uma visão geral da aplicação, descrevendo suas funcionalidades e direcionando o usuário para os módulos principais. Atua como ponto de entrada e estabelece o contexto inicial de uso.
- A página Contato disponibiliza informações institucionais e meios de comunicação, permitindo que o usuário solicite suporte, tire dúvidas ou reporte eventuais inconsistências da interface ou dos cálculos.
- O módulo também inclui a página Tutorial, que reúne instruções passo a passo para o preenchimento dos formulários, exemplos de aplicação e orientações sobre interpretação dos resultados. Essa seção desempenha papel fundamental para usuários sem familiaridade prévia com modelagem de desmonte ou com *softwares web*.

- A página Metodologia apresenta a fundamentação técnica utilizada no desenvolvimento do BlastPro, incluindo os modelos matemáticos adotados, as equações aplicadas e o racional de seleção dos parâmetros. Seu objetivo é garantir transparência e permitir que o usuário compreenda os limites e premissas dos cálculos realizados.
- Por fim, a página Sobre Nós contextualiza o projeto, apresentando os responsáveis pelo desenvolvimento, o propósito acadêmico e as motivações que originaram a criação do *software*. Essa seção contribui para a identidade institucional da aplicação e facilita o reconhecimento de sua origem e finalidade.

Em conjunto, esses módulos secundários aprimoram a usabilidade do BlastPro, oferecendo suporte informativo e estrutural que complementa os módulos principais e viabiliza o uso adequado da ferramenta em ambientes operacionais, acadêmicos e de pesquisa.

4.3 Aplicação do *software* no contexto real de mina

A terceira etapa da metodologia consistiu na utilização do BlastPro em um caso real de desmonte, com o objetivo de analisar a aderência entre os resultados previstos pelo *software* e aqueles obtidos em campo.

4.3.1 Caracterização do maciço rochoso

Inicialmente, foram coletadas as informações geotécnicas necessárias para alimentar o *software*, incluindo densidade da rocha intacta, resistência à compressão simples (UCS), espaçamento entre fraturas, orientação estrutural (mergulho e direção), além de dados operacionais como diâmetro de perfuração, inclinação dos furos e tipo de explosivo utilizado no campo. Esses parâmetros foram inseridos no módulo correspondente ao maciço rochoso, gerando o valor do fator A e as variáveis empregadas no dimensionamento da malha.

4.3.2 Dimensionamento do plano de fogo

Com os dados coletados, o BlastPro foi utilizado para gerar o plano de fogo inicial, calculando afastamento, espaçamento, subfuração, razão de carga e demais parâmetros geométricos. Em seguida, foram realizadas pequenas variações nos inputs com o objetivo de simular cenários alternativos e identificar a configuração que apresentasse melhor equilíbrio entre fragmentação prevista e viabilidade operacional. O cenário selecionado foi aquele que apresentou previsão granulométrica mais compatível com a britagem e com menor dispersão nos percentis.

4.3.3 Execução do desmonte e análise granulométrica

O desmonte real foi conduzido seguindo o plano de fogo selecionado. Após a detonação, a pilha desmontada foi fotografada e processada por análise granulométrica por imagem, permitindo determinar os percentis granulométricos (como D_{50} , D_{80} e D_{90}) e comparar esses valores às estimativas fornecidas pelo *software*.

4.3.4 Comparação entre previsão e os resultados obtidos por processamento de imagem

Por fim, foi realizada a comparação direta entre a curva granulométrica prevista pelo modelo e a curva obtida em campo. Essa etapa permitiu avaliar o grau de aderência entre o modelo utilizado e os resultados gerados pelo processamento de imagens, além de identificar eventuais discrepâncias e possíveis causas associadas à geologia local, precisão da perfuração ou variação operacional.

Em síntese, a metodologia aqui detalhada integra de forma coerente a fundamentação teórica e o desenvolvimento tecnológico estruturado. Além de, assegurar o cumprimento dos objetivos específicos, também fornece uma base

preliminar para a análise crítica dos resultados e para a discussão sobre a aplicabilidade da ferramenta BlastPro em contextos reais de engenharia de minas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam aplicabilidade e mensuração do BlastPro e sua capacidade de correlacionar dados geotécnicos, parâmetros operacionais de desmonte e modelos matemáticos de fragmentação em uma única plataforma *web*. De modo analítico, foram usados dos dados provenientes de um desmonte experimental, sendo a identificação da mina omitida por razões de confidencialidade.

5.1 Interface de acesso e estrutura do ambiente computacional

O acesso ao BlastPro é realizado por meio de navegador web www.blastpro.com.br, pode ser navegado em diferentes dispositivos tecnológicos e sem necessidade de instalação local. A página inicial funciona como ponto de entrada para o sistema, conduzindo o usuário diretamente ao módulo de dimensionamento do plano de fogo, conforme ilustrada e sublinhada na Figura 2.

A navegação é intuitiva e direciona o fluxo de preenchimento dos dados de forma consecutiva, amenizando erros operacionais e garantindo consistência entre as etapas do cálculo.

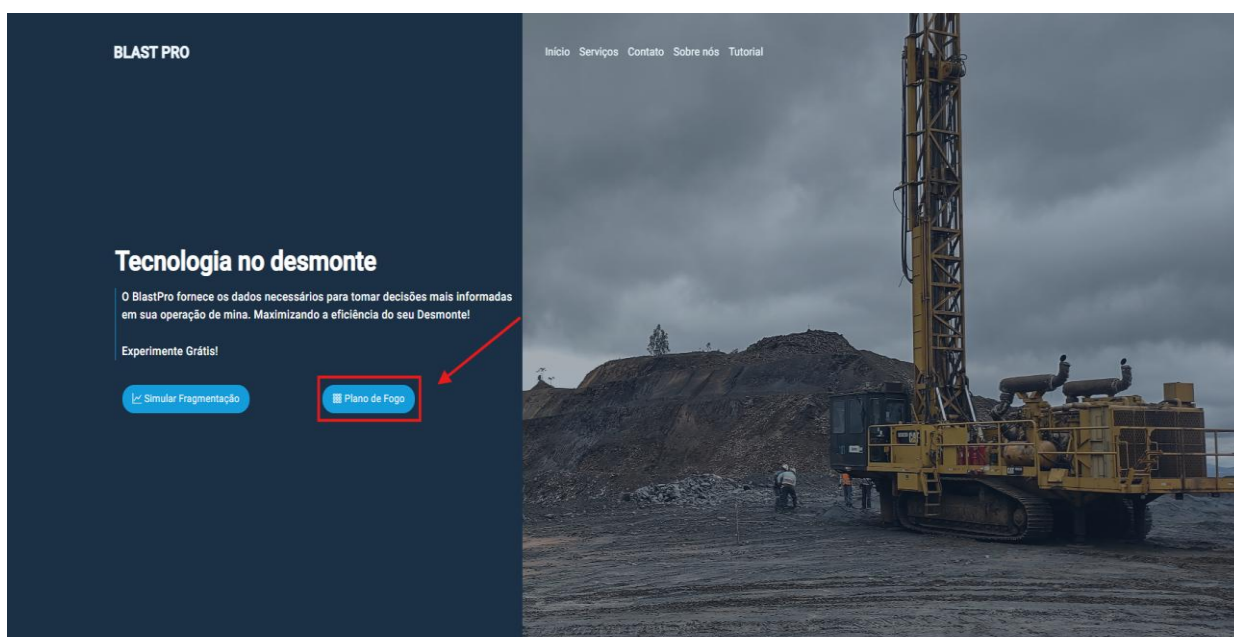


Figura 2. Página inicial do BlastPro

Fonte: Autora (2026).

A imagem subsequente (Figura 3), mostra a interface do módulo de Plano de Fogo, em que é segmentada em duas seções: a primeira voltada à caracterização do maciço rochoso e a segunda voltada aos parâmetros do desmonte. Essa separação reflete a lógica física do processo, na qual as propriedades do maciço condicionam a resposta à energia dos explosivos e relaciona ao padrão de fragmentação obtido.

1 Maciço Rochoso	2 Desmonte
Local:*	Direção e mergulho com relação a fac... ▼
Altura de bancada: *	Espaçamento Fraturas* ▼
Descrição MR* ▼	Densidade da rocha intacta*
Fator Dureza:* ▼	Velocidade Sísmica*
Next	

Figura 3. Página de fragmentação

Fonte: Autora (2026).

Observa-se na Figura 3, de modo detalhado, o Maciço Rochoso comumente com parâmetros geológicos, estruturais e geomecânicos, expondo suas propriedades e descontinuidades naturais. Na sequência, referente ao Desmonte, contempla os parâmetros operacionais relacionadas à perfuração e ao uso de explosivos, que fundamentam o dimensionamento do plano de fogo e a simulação da fragmentação.

5.2 Caracterização geológica e estrutural do maciço rochoso

O maciço rochoso estudado encontra-se inserido em um contexto geológico associado à província aurífera da Baixada Cuiabana. A mineralização ocorre de forma localizada, controlada estruturalmente, estando concentrada principalmente ao longo de fraturas preenchidas por veios de quartzo de pequena espessura. Esses veios apresentam caráter maciço, baixo conteúdo de minerais sulfetados e evidências de alteração hidrotermal restrita, como carbonatação e sericitização, refletindo condições de circulação de fluidos em ambiente deformacional.

O conjunto litológico pertence ao Grupo Cuiabá e é constituído por rochas metassedimentares submetidas a múltiplos eventos deformacionais, o que resultou em um arcabouço estrutural complexo. Esse histórico polifásico é responsável pela elevada influência das descontinuidades na compartimentação do maciço, fator determinante para o seu comportamento durante o processo de desmonte com explosivos.

Do ponto de vista litológico, predominam filitos, metassiltitos e diamictitos metamorfizados. Os filitos apresentam textura fina e anisotropia bem marcada, com planos de foliação contínuos e mineralogia rica em minerais micáceos, conferindo elevada tendência à ruptura preferencial ao longo dessas superfícies. Os metassiltitos são caracterizados por granulação muito fina a fina, composição quartzo-micácea e leve laminação, contribuindo para um comportamento mecânico relativamente frágil sob ação de carregamentos dinâmicos. Enquanto os diamictitos metamorfizados correspondem a rochas de maior heterogeneidade interna, constituídas por clastos de diferentes litologias dispersos em matriz fina, o que ocasiona respostas mecânicas variáveis frente à propagação das ondas de detonação.

Em termos geomecânicos, o maciço apresenta resistência à compressão simples média da ordem de 70 MPa, sendo classificado como um maciço de resistência moderada. A densidade média do maciço rochoso é de aproximadamente 2,2 g/cm³, valor representativo do conjunto das litologias presentes. O sistema de fraturamento é composto por fraturas sub verticais, com espaçamento médio em torno de 0,95 m, as quais exercem papel essencial tanto no controle da mineralização aurífera quanto na definição do padrão de fragmentação após o desmonte.

A presença de fraturas contínuas e relativamente espaçadas, associada à anisotropia estrutural imposta pela foliação dos filitos e pela heterogeneidade dos diamictitos, resulta em um maciço com comportamento estruturalmente complexo. Essas condições favorecem a fragmentação ao longo das descontinuidades naturais, que podem gerar distribuição granulométrica irregular caso os parâmetros de desmonte não sejam adequadamente ajustados. Assim, o entendimento integrado das características litológicas, estruturais e geomecânicas do maciço é fundamental para o correto dimensionamento do plano de fogo e para a otimização do desempenho do desmonte.

5.3 Inserção dos parâmetros geotécnicos no sistema

A seção “Maciço Rochoso” do BlastPro fornece os principais parâmetros geotécnicos utilizados para representar o comportamento do maciço durante o desmonte. Os dados expostos na Tabela 9, são empregados no cálculo do fator de rocha A (seção 3.1) que integra ao modelo de fragmentação as características geológicas e geomecânicas do meio rochoso.

O fator A é delineado pela densidade da rocha intacta, resistência à compressão simples, grau de fraturamento, espaçamento entre fraturas e orientação estrutural. No caso analisado (Tabela 9), discute-se que o maciço representa resistência moderada, fraturação média e orientação estrutural predominantemente sub vertical, condições que favorecem a ruptura ao longo das descontinuidades naturais e influenciam diretamente a distribuição granulométrica prevista.

Tabela 9: Parâmetros geotécnicos e estruturais do maciço rochoso

Parâmetro físico-geotécnico	Resultado estrutural
Densidade da Rocha intacta	2,2 g/cm ³
UCS	70 Mpa
Descrição do maciço rochoso	Fraturado
Espaçamento médio entre fraturas	0,95m

Mergulho	Sub vertical
Velocidade Sísmica	5.000 m/s

Vale mencionar que, a inclusão da velocidade sísmica permite considerar o comportamento dinâmico do maciço, atribuindo uma definição mais coerente da temporização entre furos. A Figura 4 ilustra o preenchimento do formulário com os parâmetros utilizados, evidenciando a organização do sistema e a integração desses dados nos cálculos subsequentes.

1 Maciço Rochoso		2 Desmonte	
Local: *	Região 1	Direção e mergulho com relação a face livre. *	Mergulhando para fora da face livre. ▼
Altura de bancada: *	10	Espaçamento Fraturas *	0.95m ▼
Descrição MR*	Fraturado ▼	Densidade da rocha intacta *	2.2
Fator Dureza: *	E>50GPa ▼	Velocidade Sísmica *	5
Dureza: *	70		
Next			

Figura 4: Inputs do maciço rochoso Blast Pro

Fonte: Autora (2025).

Assim, a correta caracterização do maciço corrobora com os resultados obtidos na simulação granulométrica, as vistas que pequenas variações nesses parâmetros impactam diretamente o fator de rocha e, por consequência, a distribuição de tamanhos prevista pelo modelo.

5.4 Definição dos parâmetros operacionais de desmonte

No desmonte, o BlastPro adere os dados operacionais incipientes para o dimensionamento do plano de fogo e para a simulação da fragmentação. Os parâmetros inseridos, apresentados na Tabela 10, no qual observa-se a inclinação e o diâmetro dos furos, bem como as características do explosivo empregado, informações diretamente relacionadas à distribuição de energia no maciço rochoso.

Durante a exploração analisada, adotou-se furo vertical, com diâmetro de 88,9 mm, interligado ao uso de emulsão com densidade de 1,20 g/cm³ e RWS igual a 130. Essa configuração evidencia uma distribuição de energia compatível com as condições geotécnicas previamente informadas, permitindo ao sistema gerar um plano de fogo inicial coerente e tecnicamente consistente.

Tabela 10: Parâmetros de desmonte

Tipo de parâmetro	Resultado
Inclinação do Furo	0
Diâmetro do Furo	88,9 mm
RWS	130
Densidade da Emulsão	1,20 g/cm ³

Fonte: Autora (2025).

Na sequência, os valores definidos interligam de forma direta os cálculos subsequentes de afastamento, espaçamento, subfuração e comprimento da carga, refletindo-se na forma da curva granulométrica prevista. Percebe-se que a escolha desses parâmetros proporcionou uma fragmentação compatível com o cenário operacional analisado, reduzindo a necessidade de ajustes excessivos durante as simulações.

A Figura 5 ilustra o formulário preenchido com os dados do desmonte, pautando a organização da interface e a integração dos parâmetros operacionais ao fluxo de cálculo do BlastPro.

Maciço Rochoso 2 Desmonte

Inclinação do furo*
0

Diâmetro do Furo*
88.9

Distribuição do explosivo*
Apenas um explosivo

Carga Total
Densidade do Explosivo*
1.20

RWS*
130

Back Submit

Figura 5: Inputs do desmonte de Blast Pro

Fonte: Autora (2025).

A correta inserção dessas informações mostrou-se importante para garantir a estabilidade dos resultados obtidos e a coerência entre o plano de fogo dimensionado e a fragmentação simulada.

5.5 Simulação da fragmentação e análise da curva granulométrica

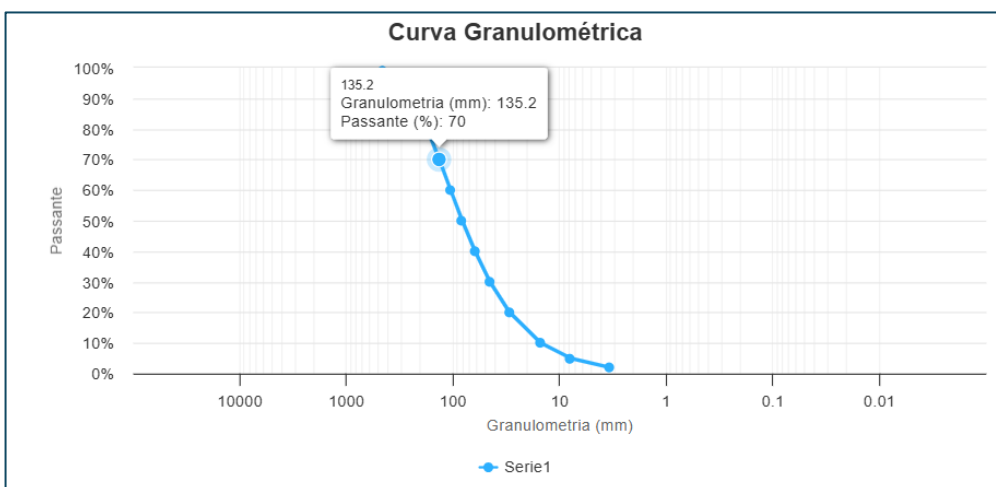
Embasado nos dados geotécnicos e operacionais acoplados no sistema, o BlastPro gerou automaticamente um plano de fogo inicial, em foram definidos os principais parâmetros geométricos e energéticos do desmonte, incluindo afastamento, espaçamento, subfuração, comprimento do furo, comprimento da carga, características do explosivo e temporização. Esses parâmetros foram representados na Figura 6(a), evidenciando a coerência entre as informações de entrada e o plano de fogo calculado pelo *software*. A partir dessa configuração inicial, foi realizada a simulação da fragmentação, resultando na curva granulométrica apresentada na Figura 6(b), que permite avaliar a distribuição de tamanhos dos fragmentos e identificar os percentis de interesse, com destaque para o P_{50} e P_{80} .

1 Plano de Fogo

Afastamento*	2.4	Tempo de Retardo Nominal*	10
Espaçamento*	3	Desvio Padrão do Tempo de Retardo*	0
Inclinação do furo*	0	Distribuição do explosivo*	Apenas um explosivo ▼
Diâmetro do Furo*	88.9	Carga Total	
Subfuração*	0.7	Densidade do Explosivo*	1.20
Tampão*	1.7	RWS*	130
Comprimento do Furo*	10.7	Comprimento da Carga Total*	9

Back Recalcular

a)



b)

Figura 6. Inputs Inicial (a) e curva granulometria(b)

Fonte: Autora (2026).

A análise da curva inicial pontuou valores de P_{50} inferiores aos desejados para a realidade operacional da mina analisada. Considerando que se trata de uma mina de ouro em veios, na qual o controle da diluição é um fator determinante, tornou-se necessário adotar uma configuração de desmonte mais branda, com menor energia específica, sem comprometer a fragmentação exigida para as etapas subsequentes

do processo. Assim, optou-se pela modificação de alguns parâmetros do plano de fogo, mantendo a coerência com as características do maciço rochoso, mas buscando limitar o P_{50} a valores inferiores a 400 mm. As principais variáveis ajustadas foram o afastamento, o espaçamento, a subfuração e o comprimento da carga, resultando em uma nova configuração do plano de fogo, conforme apresentado na Figura 7.

1 Plano de Fogo	
Afastamento*	Tempo de Retardo Nominal*
4.80	10
Espaçamento*	Desvio Padrão do Tempo de Retardo*
4.20	0
Inclinação do furo*	Distribuição do explosivo*
0	Apenas um explosivo ▼
Diâmetro do Furo*	Carga Total
88.9	
	Densidade do Explosivo*
Subfuração*	1.20
0.5	
	RWS*
Tampão*	130
3.5	
	Comprimento da Carga Total*
Comprimento do Furo*	7
10.5	
Back	Recalcular

Figura 7. Inputs do plano de fogo de Blast Pro

Fonte: Autora (2026).

Com os parâmetros ajustados, uma nova simulação granulométrica foi realizada, originando a curva apresentada na Figura 8. A comparação entre as duas curvas evidencia o impacto direto das alterações realizadas no plano de fogo, com deslocamento da curva para a esquerda, indicando uma fragmentação controlada, respeitando às restrições operacionais da mina e ao controle da diluição. Esse comportamento mostra, conforme o esperado, a sensibilidade do modelo às oscilações dos parâmetros operacionais e demonstra a capacidade do BlastPro em apoiar a avaliação de diferentes cenários de desmonte, viabilizando ajustes progressivos até a obtenção de uma configuração mais compatível com as necessidades do processo.

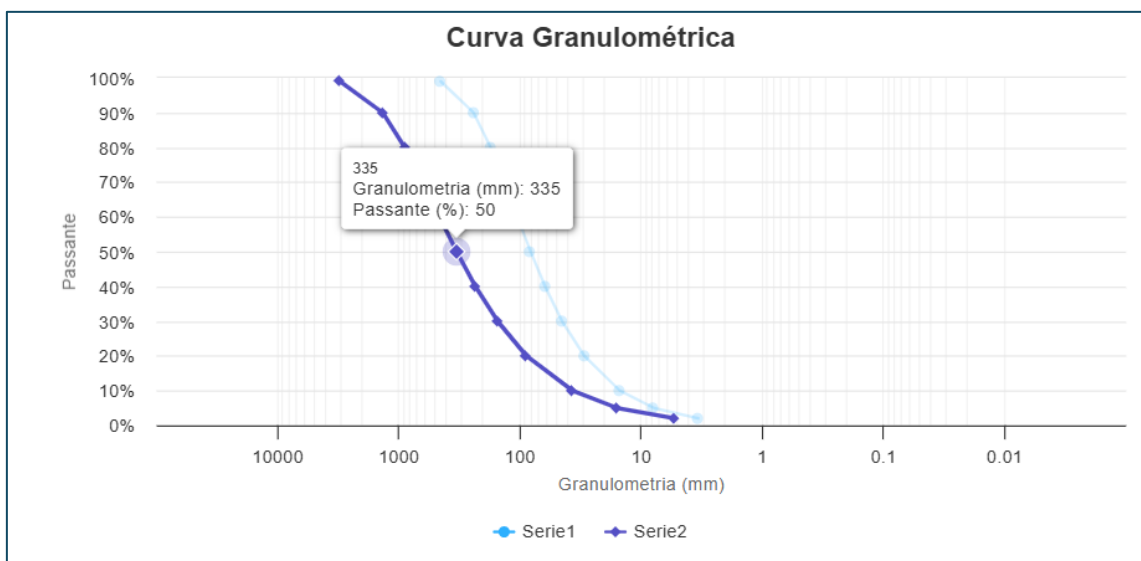


Figura 8. Curva Granulométrica ajustada ao nível operacional da mina analisada

Fonte: Autora (2026).

Suplementar à análise gráfica, o BlastPro disponibiliza, na página de resultados, uma visualização minuciosa dos valores granulométricos associados a cada percentil, conforme ilustrado nas Figura 9, os dois testes. Essas informações são apresentadas de forma tabular, viabilizara verificação analítica mais precisa e a exportação dos dados para formatos compatíveis com ferramentas externas, o que facilita o armazenamento, a comparação entre cenários e o uso dos resultados em etapas posteriores de planejamento.

1º

Teste. Local:Região 1

O maciço rochoso a ser desmontado se encontra a area Região 1, ele é Fraturado com resistencia de 70GPa. A fratura está Mergulhando para fora da face livre , com espaçamento de 0.95m . A densidade da rocha intacta é de 2.2 g/cm³

Plano de fogo

Afastamento	2.4m
Espaçamento	3m
Altura de Bancada	10m
Comprimento do furo	10.7m
Diâmetro do Furo	88.9mm
Inclinação do furo	0°
Comprimento de carga	9m
DensidadeExplosivo	1.2g/cm³
RWS	130%
Tempo de Retardo entre Furos	10ms
Razão de Carga	0.87Kg/m³

Comentários sobre a relação Hb e A

Hb/A	Fragmentação	Onda aérea	Ultralançamento	Vibração
4.2	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente

2º

Teste. Local:Região 1

O maciço rochoso a ser desmontado se encontra a area Região 1, ele é Fraturado com resistencia de 70GPa. A fratura está Mergulhando para fora da face livre , com espaçamento de 0.95m . A densidade da rocha intacta é de 2.2 g/cm³

Plano de fogo

Afastamento	4.80m
Espaçamento	4.20m
Altura de Bancada	10m
Comprimento do furo	10.5m
Diâmetro do Furo	88.9mm
Inclinação do furo	0°
Comprimento de carga	7m
DensidadeExplosivo	1.2g/cm³
RWS	130%
Tempo de Retardo entre Furos	10ms
Razão de Carga	0.25Kg/m³

Comentários sobre a relação Hb e A

Hb/A	Fragmentação	Onda aérea	Ultralançamento	Vibração
2.1	Regular	Regular	Regular	Regular

Granulometria x Passante

Passante(%)	Granulometria (mm)
99%	452.9
90%	242.5
80%	175.6
70%	135.2
60%	105.7
50%	82.2
40%	62.4
30%	45.2
20%	29.6
10%	15.1
5%	7.9
2%	3.4

Granulometria x Passante

Passante(%)	Granulometria (mm)
99%	3078.1
90%	1366.8
80%	898.6
70%	639.6
60%	464.5
50%	335
40%	234.3
30%	153.9
20%	88.8
10%	36.9
5%	15.9
2%	5.3

Figura 9. Página de resultados do BlastPro

Fonte: Autora (2026).

Diante do exposto, os resultados indicam que o *software* permite compreender de forma clara a relação entre os parâmetros do plano de fogo e a fragmentação prevista, constituindo um suporte técnico promissor para a tomada de decisão em operações de desmonte de rochas.

5.6 Comparação do caso real

A partir da execução do desmorte, a fragmentação aderida em campo foi avaliada por meio do *software* WipFrag, que utiliza análise digital de imagens para estimar a distribuição granulométrica do material desmontado. A Figura 10 apresenta a imagem representativa da pilha resultante do desmorte, em constatou que é possível observar a heterogeneidade dos fragmentos, com predominância de blocos de médio porte e presença pontual de fragmentos mais grosseiros, especialmente nas regiões inferiores da pilha. Essa distribuição visual pauta a influência das condições estruturais do maciço e da configuração do plano de fogo adotado.

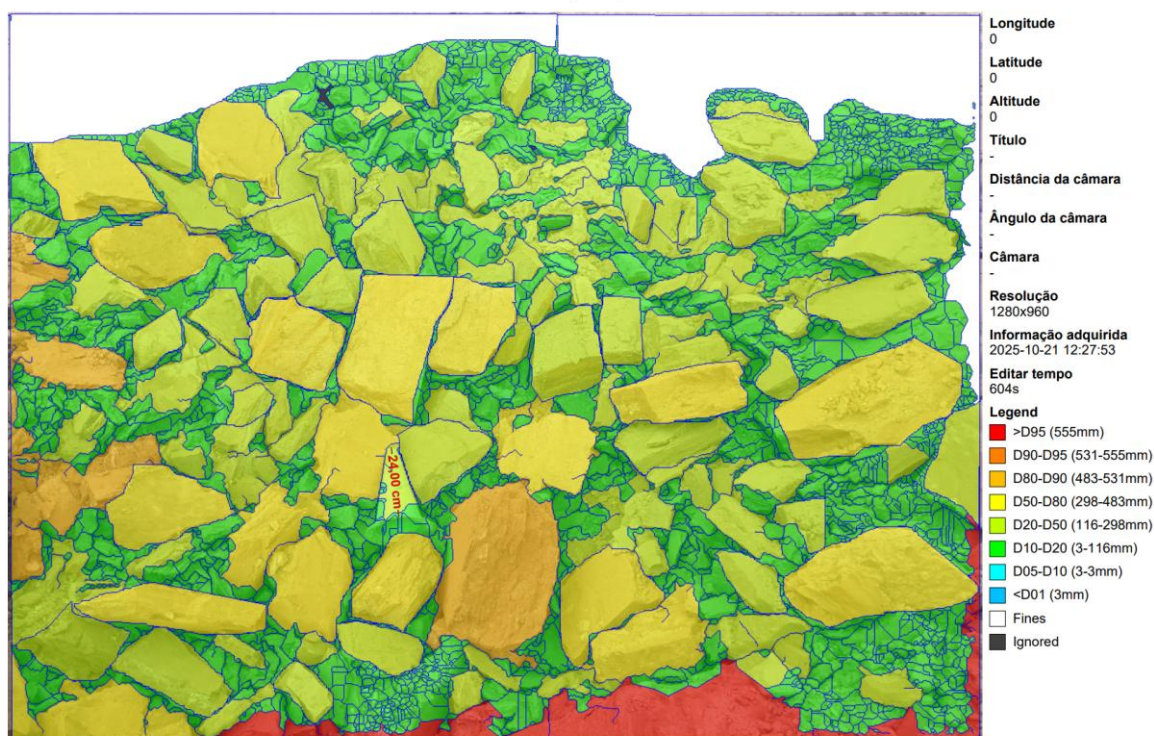


Figura 10. Desmorte e heterogeneidade dos fragmentos

Fonte: Autora (2026).

Paralelo a Figura 11, o WipFrag mensurou a segmentação dos blocos e executou a curva granulométrica apresentada na Figura 10, exibindo empiricamente os percentis característicos da fragmentação. Os resultados indicam valores de D_{50} em torno de 297,6 mm e D_{80} próximos de 482,5 mm, descrevendo uma fragmentação compatível com os limites operacionais estabelecidos para o desmorte analisado. Ademais, a maior concentração de material encontra-se nas faixas intermediárias de

tamanho, com menor participação de finos e de blocos excessivamente grandes, retratando uma distribuição relativamente equilibrada da energia durante a detonação.

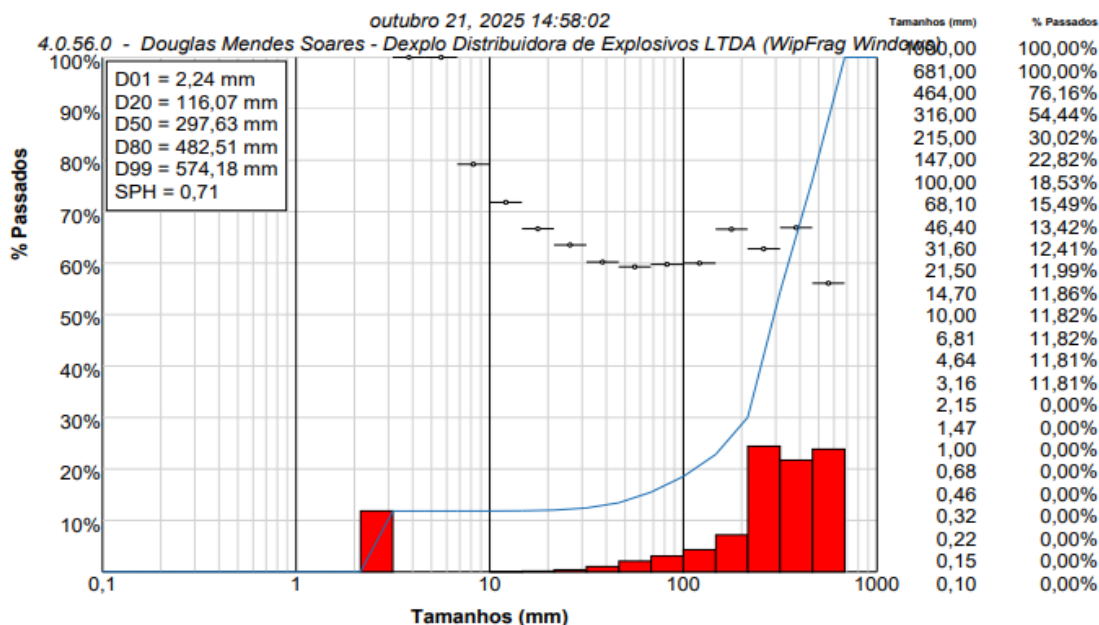


Figura 11. Curva granulométrica quantificada no WipFrag

Fonte: Autora (2026).

Em observância, a análise comparativa entre a fragmentação observada em campo e as previsões obtidas nas simulações evidencia uma aderência satisfatória do modelo empregado, especialmente no que se refere ao P50, parâmetro de maior relevância para o controle do desempenho do desmonte. As pequenas discrepâncias verificadas podem ser atribuídas a fatores inerentes às condições reais de operação, como variações locais de fraturamento, irregularidades na perfuração e perdas de energia associadas ao acoplamento explosivo. A respeito disso, os resultados mostram a capacidade do modelo em representar, de forma satisfatória, o comportamento granulométrico do material desmontado em condições reais de mina.

5.7 Comparação dos cenários real e simulado

A Figura 12 delinea a comparação entre os percentis granulométricos previstos pelo *software* e aqueles obtidos a partir da análise do desmonte por meio de

processamento de imagens. Observa-se boa concordância para o D_{50} , o modelo apresentou desempenho satisfatório na previsão do tamanho médio dos fragmentos. Assim, a distribuição global da fragmentação foi adequadamente representada pela simulação, especialmente no intervalo correspondente à fração predominante do material desmontado.

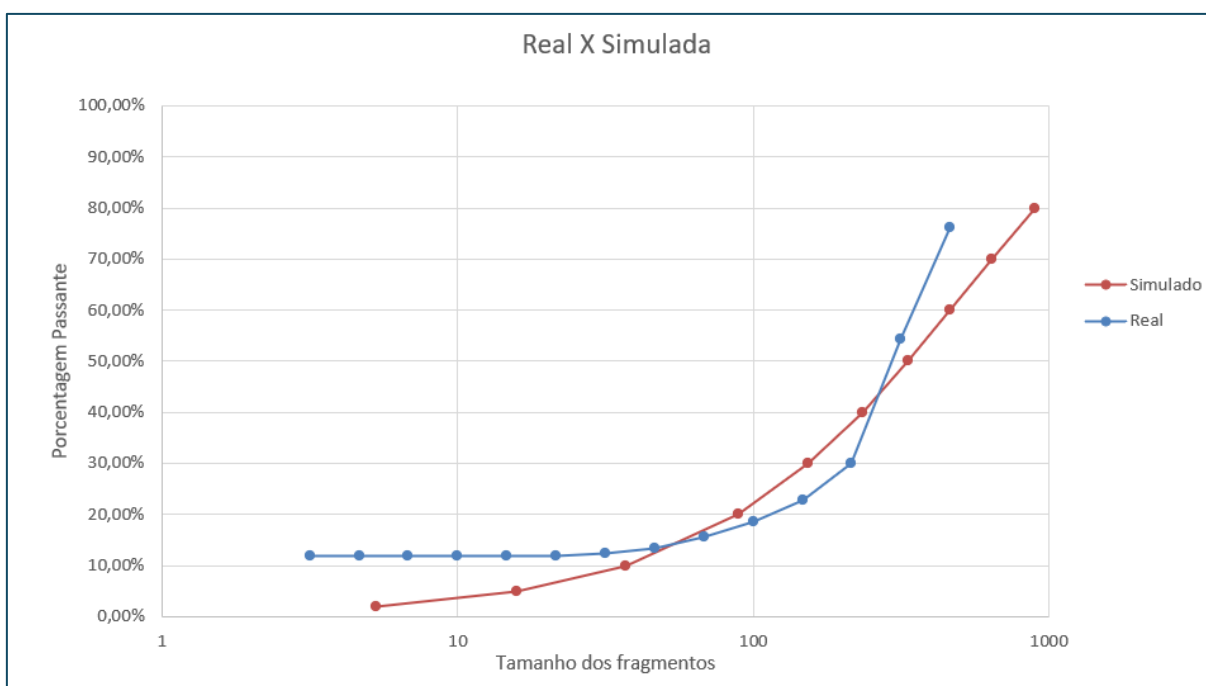


Figura 12. Análise comparativa dos cenários

Fonte: Autora (2026).

Verifica-se em D_{80} que o valor obtido em campo foi inferior ao previsto, evidenciando que os resultados obtidos pelo processamento de imagens apresentaram comportamento mais fino na fração grossa do que o estimado pelo modelo. De modo convergente, a fração de finos sustentou valores superiores aos simulados, indicando uma menor geração de finos em campo em relação à previsão. Esse comportamento aponta para uma tendência do modelo em subestimar os tamanhos da fração fina e superestimar os tamanhos na faixa grossa, padrão frequentemente observado em modelos empíricos de fragmentação.

As diferenças observadas correlacionam às limitações da análise granulométrica por imagens e às condições reais do desmante. No caso do processamento por imagem, destacam-se o impasse de identificação de partículas abaixo da superfície da pilha, os efeitos de sobreposição entre blocos, variações de

iluminação e a segregação granulométrica natural após a detonação. Adicionalmente, a presença de descontinuidades naturais no maciço, associada à heterogeneidade estrutural local, pode gerar variações espaciais na fragmentação que não são completamente capturadas pelo modelo.

Logo, os resultados situam-se dentro do comportamento esperado para modelos de simulação granulométrica, cujo foco principal não é a reprodução exata dos tamanhos individuais dos fragmentos, porém a avaliação de tendências e a compreensão da influência dos parâmetros do plano de fogo sobre o padrão de fragmentação. Consequentemente, o desempenho observado indica que o *software* constitui uma ferramenta promissora para apoiar a tomada de decisão no dimensionamento e na análise de desmontes em condições reais de operação.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de uma aplicação *web* voltada ao dimensionamento de planos de fogo e à previsão da curva granulométrica resultante do desmonte de rochas, fundamentada em modelos empíricos amplamente consolidados na literatura, com destaque para o método Kuz-Ram e suas variações. Esse objetivo foi alcançado perante a concepção, implementação e aplicação do *software* BlastPro, obteve de integrar, de forma coerente, os parâmetros geométricos do plano de fogo, as características dos explosivos e as propriedades do maciço rochoso, possibilitando a simulação de diferentes cenários de desmonte e a análise do impacto dessas variáveis sobre a fragmentação prevista.

No tocante, das especificidades da pesquisa, de modo preliminar foram descritos e analisados os principais modelos empíricos de previsão de fragmentação, incluindo Kuz-Ram, TCM e KCO, ressaltando seus pressupostos teóricos, parâmetros de entrada, vantagens e limitações operacionais. Essa análise favoreceu a uma escolha criteriosa do modelo a ser implementado, priorizando não somente a precisão teórica, mas também a viabilidade prática e a disponibilidade de dados em operações reais de mineração.

A arquitetura da aplicação foi desenvolvida utilizando o framework Angular, com programação em TypeScript e estruturação em HTML, aliadas ao uso de CSS, Bootstrap e Angular Material. A sinergia dessa tecnologia possibilitou a construção de uma aplicação *web* responsiva, estável e de fácil utilização, adequada tanto ao ambiente acadêmico quanto ao operacional, atendendo aos requisitos de desempenho e usabilidade propostos.

Os algoritmos de cálculo empregados no dimensionamento do plano de fogo e na simulação da fragmentação foram inseridos de forma integrada ao fluxo do *software*, conduzindo a geração automática das curvas granulométricas e a comparação entre diferentes configurações de malha e carregamento. A aplicação prática em um caso real de mina elucidou que o sistema responde de maneira consistente às variações dos parâmetros do plano de fogo, favorecendo uma

avaliação nas tendências de fragmentação e ajuste no desmonte às restrições operacionais, como o controle da diluição e a adequação do P_{80} .

A verificação analítica entre os resultados simulados e aqueles obtidos a partir da análise por imagens do desmonte real retratou boa concordância para os percentis médios, especialmente o D_{50} , e diferenças esperadas nas frações fina e grossa, compatíveis com as limitações inerentes aos modelos empíricos e à análise granulométrica por imagens.

Soma-se a esse, a disponibilização do *software* em plataforma *web* gratuita atende ao propósito de ampliar o acesso a ferramentas de modelagem de desmonte, especialmente para pequenas e médias empresas do setor mineral, bem como para instituições de ensino e pesquisa. Assim, o BlastPro contribui para a disseminação do conhecimento e para o uso mais racional e eficiente dos explosivos na engenharia de minas.

Portanto, a aplicação BlastPro demonstrou ser uma ferramenta funcional e acessível para a simulação de planos de fogo e previsão da distribuição granulométrica em desmontes de rochas. Representa distintas configurações operacionais que influenciam o tamanho das partículas geradas, contribuindo para o planejamento e a otimização do desmonte. Apesar dos resultados consistentes, é importante relatar as limitações inerentes ao modelo empregado, como a consideração do maciço rochoso como homogêneo e a dificuldade na previsão de frações finas. Ainda assim, o desempenho observado indica que o BlastPro constitui uma base sólida para aplicações práticas e para o desenvolvimento futuro de aprimoramentos no modelo e na ferramenta computacional.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBOLA, J. M, AJAYI, O. D, ELIJAH, P. O, Rock Fragmentation Prediction using KuzRam Model. **Journal of Environment and Earth Science**. Department of Minerals and Petroleum Engineering, School of Engineering, Kogi State Polytechnic, Lokoja, Nigeria. v. 06. n 05, 2018.

ALVES, R. C. **Avaliação do desempenho de emulsões explosivas a granel em desmontes de rochas em lavra a céu aberto**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ASH, R. L. **The mechanics of rock breakage by explosives**. Austin: University of Texas Press, 1963.

BIEGAŃSKA, J.; *et al.* Assessment of the impact of comminuted plastics on energy parameters of high-energy materials. **Scientific Reports**, London, v. 14, art. 17660, 2024.

BHANDARI, S. **Engineering rock blasting operations**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997.

BLANCO, J. Á. S. **Engenharia de Explosivos**. Projeto principal da Aula Magna McGraw Hill, 2025.

BRITANITE. **Manual básico de utilização de explosivos**. IBQ. 2009.

CARDU, M.; MICHEL, C. **Rock blasting: theory and practice**. Oxford: Elsevier, 2015.

CUNNINGHAM, C. V. B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. **Proceedings...** of the First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå, Sweden, p. 439–453, 1983.

CUNNINGHAM, C. V. B. Fragmentation estimation and the Kuz-Ram model – four years on. In: ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, 31., 2005, New Orleans. **Proceedings...** Cleveland: ISEE, 2005. p. 201–210.

DJORDJEVIC, N. A two-component model of blast fragmentation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRAGMENTATION BY BLASTING, 6., 1999, Johannesburg. **Proceedings...** Rotterdam: Balkema, 1999. p. 213–219.

FREITAS, M. E. P; MORAIS, D. S. Comparação da eficiência entre os explosivos emulsão bombeada e anfo no processo de desmonte de rochas: Um estudo de caso. **Anais...** HUMANIDADES E TECNOLOGIA (FINOM), v. 22, n. 1, p. 349-367, 2020.

GALDINO, L. C. **Avaliação da influência dos parâmetros geométricos do desmonte na estabilidade de bancadas e na diluição em minas a céu aberto.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

GEBRETSADIK, A. *et al.* Aprimorando a avaliação da fragmentação de rochas em detonações de minas por meio de algoritmos de aprendizado de máquina: uma abordagem prática. **Discover Applied Sciences** , v. 6, n. 5, p. 223, 2024.

GERALDI, JLP. **O ABC das escavações de rocha.** Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 266 p.

GOMES, É. F. **Modelos matemáticos utilizados na fragmentação de rochas com uso de explosivos: uma revisão**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, Crateús, 2022.

IRAMINA, W. S.; ARAÚJO, F. S.; LOPES, L. A. Monitoramento e controle de vibrações induzidas por desmontes com explosivos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 71, n. 4, p. 473–480, 2018.

JIMENO, C. L.; LÓPEZ, E. L.; AYALA, F. J. A. **Drilling and blasting of rocks**. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.

JOSHI, D. *et al.* Uma aplicação otimizada de mineração a céu aberto para o planejamento da produção de pedreiras de calcário visando maximizar o valor presente líquido. **Mathematics** , v. 10, n. 21, p. 4140, 2022.

KONYA, C. J.; WALTER, E. J. **Rock blasting and overbreak control**. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1990. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/32733>. Acesso em: 22 dez. 2025.

KONYA, C. J. **Blast design**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983.

LANGFORS, U.; KIHLESTRÖM, B. **The modern technique of rock blasting**. 3. ed. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1978.

LIMA, Edson Moura. Controle de Material Explosivo no Brasil. **Revista Brasileira de Inteligência**, n. 7, p. 9-19, 2012.

LILLY, P. A. An empirical method of assessing rock mass blastability. In: LARGE OPEN PIT MINING CONFERENCE, 1986, Newman. **Proceedings...** Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1986. p. 89–92.

LIU, S.; *et al.* Research on the prediction of blasting fragmentation. **Scientific Reports, London**, v. 14, p. 1–14, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67139-x>. Acesso em: 20 dez. 2025.

MESQUITA, J. Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica. **Geotecnia**, [s. l.], n. 130, p. 33–56, 2008.

MORRELL, S.; VALERY, W. Mine to mill optimisation: effect of feed size on mill throughput. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 14, n. 10, p. 1375–1386, 2001.

MUNARETTI, E. **Explosivos industriais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2002.

MUNARETTI, E. **Caracterização de explosivos e critérios de seleção em desmonte de rocha**. In: ARAÚJO, G. J. de L. (Org.). *Perfuração e desmonte de rochas*. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 1997

MUTINDA, R.; *et al.* Evaluation of empirical blast fragmentation models using image analysis. **International Journal of Mining Science and Technology**, Beijing, v. 31, n. 4, p. 625–635, 2021.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268621000331..>

Acesso em: 20 dez. 2025.

OLIVEIRA, Julia de Azevedo. **Impactos socioambientais provocados pelo rompimento de barragens de contenção de rejeitos de mineração no estado de Minas Gerais**. 2019. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Ambiental) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, 2019.

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. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

OUCHTERLONY, F.; OLSSON, M.; NYBERG, U. Fragmentation analysis by image processing and its use in blast optimisation. **Fragblast – International Journal for Blasting and Fragmentation**, Leiden, v. 9, n. 3–4, p. 155–168, 2005.

PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering**. Boca Raton: CRC Press, 1994.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação: terraplanagem e escavação de rochas**. 3 ed. São Paulo: Pini, 2007

ROY, M. P. *et al.* Rock fragmentation by blasting-A review. **Journal of mines, metals and fuels**, v. 64, n. 9, p. 424-431, 2016.

SANTANA, R. C. **Caracterização geomecânica e análise da blastabilidade em maciços rochosos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SCOTT, A.; KANCHIBOTLA, S.; MORRELL, S. Blasting for mine to mill optimisation. **Proceedings.... of the Explo '99 Conference**, Brisbane, Australia, p. 1–8, 1999.

SILVA, R. A. **Planejamento e controle de desmontes de rochas com explosivos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2019.

SILVA, J. R.; BRUNO, R. S.; MARQUES, E. A. **Explosivos do tipo emulsão: características operacionais e aplicação em condições úmidas**. 2004. Material técnico/didático.

SISKIND, D. E.; STAGG, M. S.; KOPERA, J. R.; DOWDING, C. H. **Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting**. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines, 1980. (Report of Investigations, RI 8507). Disponível em: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc12810/>. Acesso em: 22 dez. 2025.

SUI, Y.; *et al.* Open-pit bench blasting fragmentation prediction based on stacking integrated strategy. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, n. 3, p. 1254, 2025.

TORALDE, M.; CUNNINGHAM, C. V. B. Modelling of rock fragmentation by blasting. **Proceedings...** of the 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (FRAGBLAST-8), Santiago, Chile, p. 333–340, 2002.

VIEIRA, F. T.; BRAGA, J. D'A. Characterization of explosive performance parameters: ANFO and explosive emulsion. **International Seven Journal of Multidisciplinary**, v. 1, n. 2, p. 135–148, 2023.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock slope engineering: civil and mining**. 4. ed. London: Spon Press, 2007.

YOSHINO, Mariana. **Princípios fundamentais do design de interface: um guia instrucional.** *Medium – VagasUX*, 7 fev. 2024. Disponível em: <https://medium.com/vagas-ux/princ%C3%ADpios-fundamentais-do-design-de-interface-um-guia-instrucional-4cb3127520b7>. Acesso em: **22 dez. 2025.**

ZHANG, Y.; *et al.* Comparative study of empirical fragmentation models in surface mine blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Beijing, v. 15, n. 2, p. 412–425, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775523000458>. Acesso em: 20 dez. 2025.