



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



**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA
SIMULAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS
UTILIZANDO O MODELO KUZ-RAM**

VICTOR DIAS LOPES

OURO PRETO - MG

Março de 2023

VICTOR DIAS LOPES

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA
FRAGMENTAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS UTILIZANDO O MODELO KUZ-RAM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento 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: Desmonte de Rochas

Orientador: Prof. Dr. ELTON DESTRO
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO - MG

Março de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L864d Lopes, Victor Dias.

Desenvolvimento de um programa computacional para simulação da fragmentação no desmonte de rochas utilizando o modelo Kuz-Ram.

[manuscrito] / Victor Dias Lopes. - 2023.

40 f.: il.: color..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

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

1. Desmonte de rochas. 2. Modelos de fragmentação - Modelo Kuz-Ram. 3. Software - Desenvolvimento. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.235

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor

Victor Dias Lopes

Título

Desenvolvimento de um programa computacional para simulação da fragmentação no desmonte de rochas utilizando o modelo de Kuz-Ram

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

Aprovada em 29 de março de 2023.

Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng^o. de Minas Renato Magni França (Geosol)

Elton Destro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/04/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/04/2023, às 16:58, 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 **0507946** e o código CRC **D7BB08F5**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, pela saúde e pela coragem para a realização deste projeto e de todos os outros.

À meus pais, Geraldo e Andrelina, pelo amor incondicional e apoio de sempre, e pelo investimento na minha educação.

Aos grande amigos que fiz em Ouro Preto, pelos ensinamentos, por todo o companheirismo e bons momentos que vivemos juntos.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino público de qualidade, em especial aos funcionários do Departamento de Engenharia de Minas.

Ao Prof. Dr. Elton Destro, por todo o apoio, orientação e sugestões, pela dedicação e paciência, pela oportunidade de aprendizado e confiança depositada.

À Adriana Cristina, chefe de Seção da Ensino da Escola de Minas, por todo apoio, carinho e conselhos durante momentos importantes da minha vida.

À Ouro Preto, por me permitir viver toda essa experiência incrível.

“Educação não transforma o mundo.

Educação muda pessoas.

Pessoas transformam o mundo.”

(Paulo Freire)

RESUMO

A necessidade de se realizar desmontes de rocha na indústria da mineração torna primordial que o plano de fogo seja cuidadosamente calculado para que o resultado da fragmentação atenda às necessidades das usinas de beneficiamento mineral. O desmorte, quando bem executado, gera uma pilha de fragmentos homogênea e adequada à realidade de cada mina, otimizando a produção ao evitar retrabalho e gastos adicionais com desmontes secundários. Pensando nisto, vários autores propuseram modelos de fragmentação com a finalidade de se conhecer a distribuição granulométrica de um desmorte antes mesmo que ele ocorra. Um destes modelos é o Kuz-Ram, que devido ao seu caráter prático e eficiente, é um dos mais utilizados atualmente. O Kuz-Ram considera os parâmetros relacionados ao maciço rochoso, à geometria do plano de fogo e às características dos explosivos para simular o desempenho de desmorte de rochas, sempre visando a melhoria do processamento mineral e a segurança da comunidade no entorno. Este trabalho alia a utilização do modelo de Kuz-Ram às técnicas de programação de computadores ao desenvolver um *software* que permite a predição da curva granulométrica dos fragmentos de um desmorte de rochas, possibilitando aliações do plano de fogo para se obter o resultado desejado em minas a céu aberto.

Palavras-chave: Desmorte de rochas; Modelo de fragmentação; Kuz-Ram; Desenvolvimento de *software*

ABSTRACT

The need to perform rock blasting in the mining industry makes it essential that the fire plan is carefully calculated so that the fragmentation result meets the needs of mineral processing plants. Rock blasting, when well executed, generates a pile of fragments that is homogeneous and suited to the reality of each mine, optimizing production by avoiding rework and additional expenses with secondary blasting. With this in mind, several authors have proposed fragmentation models in order to know the granulometric distribution of a rock blasting even before it occurs. One of these models is the Kuz-Ram, which, due to its practical and efficient character, is one of the most used today. Kuz-Ram considers parameters related to the rock mass, the geometry of the fire plan and the characteristics of the explosives to simulate the performance of rock blasting, always aiming at improving mineral processing and the safety of the surrounding community. This work combines the use of Kuz-Ram with programming techniques by developing a computer application that allows the prediction of the granulometric curve of the fragments of a blast, and alterations of the fire plan to obtain the best possible result in open pit mines.

Keywords: Rock blasting; Fragmentation model; Kuz-Ram; Software development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostra de ANFO	18
Figura 2 – Emulsões explosivas encartuchadas.....	18
Figura 3 – Comparação da composição entre ANFO e Emulsão	19
Figura 4 – Parâmetros geométricos de um plano de fogo	20
Figura 5 – Lazarus, ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto	28
Figura 6 – Interface do Lazarus, ferramenta de desenvolvimento do aplicativo.....	29
Figura 7 – Editor de Código, ambiente de programação do Lazarus.....	29
Figura 8 – Interface inicial aplicativo desenvolvido	30
Figura 9 – Parâmetros do plano de fogo e seus campos de entrada	32
Figura 10 – Resultados de saída referentes às equações de Kuz-Ram.....	33
Figura 11 – Gráfico com a representação da curva de distribuição granulométrica simulada pelo aplicativo	34
Figura 12 – Barras de rolagem	35
Figura 13 – Curva de distribuição granulométrica com alteração nos valores de dois dos parâmetros	36
Figura 14 – Histograma referente aos parâmetros configurados como padrão	37

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVOS	13
	2.1. Objetivo Geral	13
	2.2. Objetivos Específicos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
	3.1. Desmonte de Rochas	14
	3.2. Desmonte Utilizando Explosivos	14
	3.3. Propriedades dos Explosivos	15
	3.4. Principais Explosivos.....	17
	3.5 . Parâmetros do Plano de Fogo	19
	3.6. Modelos de Simulação da Fragmentação das Rochas	23
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	25
	4.1 Modelo KUZ-RAM.....	25
	4.2. Sistema Computacional.....	28
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A extração e o beneficiamento de minerais é uma parte essencial da maneira como o mundo e suas diversas civilizações funcionam e interagem. Não se deve esquecer da contribuição que a mineração forneceu, e ainda fornece, para o progresso da humanidade. Também não se deve ignorar o fato de que a própria estrutura na qual a sociedade vive atualmente é totalmente dependente de produtos provenientes da mineração (DARLING, 2011).

A mineração é composta por várias fases relacionadas umas com as outras. As operações unitárias de extração consistem em perfuração e desmonte (ou escavação mecânica), carregamento e transporte. O objetivo final da lavra é atender às necessidades da planta de processamento, de acordo com suas exigências, de modo a aperfeiçoar o processo. No entanto, por serem dependentes, as operações devem fornecer material adequado à etapa posterior, de modo que toda a cadeia produtiva seja otimizada, desperdícios sejam minimizados e, portanto, obtenha-se o menor custo de produção (BOTELHO, 2014).

A fragmentação inapropriada impacta na produção uma vez que produz materiais muito finos ou maiores que o desejável. Quando ocorrem fragmentos muito grandes após uma detonação, estes devem passar por um processo de desmonte mecânico ou desmonte secundário para serem eficientemente escavados, transportados e processados. Desmontes secundários são indesejados por consumirem mais tempo, serem mais caros e mais difíceis que o desmonte de rotina (SCOTT *et al.*, 1996).

De acordo com Dance (2013), o custo operacional associado ao desmonte de rocha é menor em relação às etapas posteriores (britagem e moagem). A modificação das práticas de desmonte para obter um tamanho mais adequado na alimentação do moinho pode atingir um aumento de até 30% no rendimento.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do desmonte de rochas e, conseqüentemente, diminuir os custos de todos os processos subsequentes, foram criados no decorrer dos anos modelos matemáticos capazes de prever a distribuição granulométrica de um desmonte programado e, através da análise dos resultados fornecidos por esses modelos, é possível ajustar alguns parâmetros para otimizar todo o processo. Dentre esses modelos de previsão, um dos mais utilizados atualmente é o modelo Kuz-Ram.

Neste trabalho, foi desenvolvido uma solução computacional que permite a predição da curva de distribuição granulométrica do ROM (Run of Mine), em que o sistema analisa os parâmetros relativos à rocha, ao explosivo e ao plano de fogo, utilizando o modelo Kuz-Ram. Por meio deste sistema computacional, é possível tomar decisões orientadas à otimização do processo em minas a céu aberto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um aplicativo computacional (*software*) que auxilia no planejamento do plano de fogo para desmonte de rochas em minas a céu aberto.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Desenvolver um sistema computacional que simule a curva de fragmentação de um desmonte de rochas utilizando um modelo da literatura (Kuz-Ram);
- b) Implementar o código que gere um aplicativo computacional para análise das classes de tamanhos e a otimização da fragmentação por meio do ajuste dos parâmetros controláveis que interferem no resultado do desmonte;
- c) Utilizar o sistema computacional desenvolvido como uma ferramenta didático-pedagógica para alunos de Engenharia de Minas no estudo do Desmonte de Rochas;
- d) Incentivar o uso da programação de computadores aos profissionais da mineração, especialmente aos Engenheiros de Minas, pois, por meio dela, é possível a implementação de soluções sustentáveis, econômicas e seguras nas atividades da mineração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desmonte de Rochas

Desmonte de rochas é um conjunto de atividades e técnicas utilizadas para transformar um corpo de rocha em fragmentos que possam ser escavados, visando facilitar sua extração e transformar o seu formato para viabilizar sua utilização na indústria mineral. A fragmentação ocorre ao se introduzir em um terreno uma tensão superior à tensão de resistência do material deste terreno. Na mineração, a aplicação dessa técnica pode ter dois objetivos distintos: a remoção do mineral de interesse econômico, ou a remoção do material ao redor do minério.

Segundo Ferreira (2017), um material que não apresenta grande coesão pode ser removido através de desmonte mecânico, utilizando equipamentos de escavação e escarificadores, ou desmonte hidráulico, através de bombeamento; todavia, geralmente é necessário recorrer aos explosivos para atingir os resultados desejados, devido à coesão inerente à algumas rochas. Os rompedores hidráulicos são usualmente utilizados para realizar desmontes secundários, que geram retrabalho, são perigosos e elevam os custos.

3.2 Desmonte Utilizando Explosivos

Quando um maciço rochoso tem características geomecânicas que impossibilitam sua desagregação por desmonte mecânico, faz-se necessário o uso de explosivos para fragmentar a rocha *in situ*. Segundo Silva (2019), explosivos são misturas de substâncias químicas que quando iniciadas por um agente externo suficientemente energético decompõe-se quimicamente gerando considerável quantidade de gases, altas temperaturas, liberando enorme quantidade de energia em um intervalo de tempo bastante reduzido.

Na mineração, é inevitável que o uso de explosivos resulte em algumas consequências prejudiciais ao ambiente e à população próxima do local do desmonte. Algumas alterações relacionadas ao desmonte com explosivos são vibrações, aumento da emissão de poeira, aumento de ruídos, ultralancamento de fragmentos e alterações na paisagem. Para minimizar esses problemas associados ao desmonte com explosivos, é necessário que o desmonte seja cuidadosamente planejado e monitorado, de forma a mitigar seu impacto nas áreas vizinhas.

No Brasil, a NBR 9653:2018 é a norma responsável pela avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações. Neste guia, estão presentes regras e orientações para controle de ruídos, vibrações, ruídos e ultralanchamentos provenientes do desmonte de rochas com explosivos. Este guia estabelece que o ultralanchamento não deve ocorrer fora da área de operação do empreendimento mineiro e que o limite máximo de pressão acústica permitido é de 134 decibéis, nível a partir do qual podem ocorrer complicações auditivas nos seres humanos. Também constam na NBR 9653:2018 os limites de vibração no terreno permitidos para que não ocorram danos nas instalações circundantes.

Há vários fatores que devem ser considerados para realizar um desmonte de rochas bem sucedido. A fragmentação deve ser adequada aos equipamentos de carga, transporte e ao processamento. Além disso, é desejável que não ocorram danos ao maciço remanescente após o desmonte (sobrequebra), pois estes geram instabilidades que podem colocar em risco a segurança de pessoas e equipamentos, além de criarem fraturas que comprometem desmontes futuros.

3.3 Propriedades dos Explosivos

As propriedades dos explosivos são as condições materiais que os caracterizam, propriedades químicas ou físicas próprias a cada um deles. Na indústria mineral, o conhecimento das propriedades dos explosivos é extremamente importante para a escolha do produto adequado, que deve levar em consideração fatores como a geologia do local de desmonte e as características geomecânicas das rochas que se pretende fragmentar. Tais propriedades têm grande influência na predição da fragmentação de um desmonte, que é consequência direta dos explosivos utilizados na reação de detonação. Algumas das principais propriedades para o desmonte de rochas são:

3.3.1 Densidade

A densidade de um explosivo é a relação entre a massa e o volume do explosivo, medida em g/cm³. A densidade dos explosivos comerciais varia de 0,8 a 1,7 g/cm³. A densidade é um fator importante para a escolha do explosivo, uma vez que explosivos com densidade inferior ou igual a 1 (um) não devem ser utilizados em furos contendo água, para evitar que os mesmos boiem, o que os tornaria ineficazes. Para detonações com maior grau de dificuldade, em que uma fina fragmentação é desejada, recomenda-se um explosivo denso. Para rochas brandas, ou onde não é requerida uma fragmentação excessiva, um explosivo pouco denso é suficiente (SILVA, 2009).

3.3.2 Energia

Segundo Silva (2009), a finalidade da aplicação de um explosivo em um desmorte é gerar trabalho útil. A energia liberada pelo explosivo em um furo é utilizada da seguinte forma: pulverização da rocha nas paredes do furo, rompimento da rocha, produção de calor e luz, movimento da rocha, vibração do terreno e sobrepressão atmosférica. No passado, a energia de um explosivo era medida em função da porcentagem de nitroglicerina contida no mesmo. Porém, devido aos explosivos modernos, especialmente os agentes detonantes, não possuem nitroglicerina nas suas formulações, fez-se necessário estabelecer um novo padrão de comparação. Atualmente, utilizam-se os seguintes conceitos:

RWS - Relative Weight Strength (Energia Relativa por Massa) - é a energia disponível por massa de um explosivo “x”, comparada com a energia disponível por igual massa do ANFO, o explosivo tomado como padrão normalmente. O cálculo do RWS é feito através da equação 1 a seguir:

$$RWS = \frac{ETx}{ETp} \quad (1)$$

Em que:

ETx = energia termoquímica do explosivo “x”;

ETp = energia termoquímica do explosivo padrão (ANFO).

RBS - Relative Bulk Strength (Energia Relativa por Volume) - é a energia disponível por volume de um explosivo “x”, comparada com a energia disponível por igual volume de um explosivo tomado como padrão, sendo calculado pela equação 2:

$$RBS = \frac{ETx}{ETp} \times \frac{\rho x}{\rho p} \quad (2)$$

Em que:

ρx = densidade do explosivo x;

ρp = densidade do explosivo padrão (ANFO).

3.3.3 Velocidade e pressão de detonação

A velocidade de detonação (VOD) é um parâmetro importante na determinação do desempenho de explosivo, principalmente porque influencia como a energia é liberada: a energia é liberada mais rapidamente quando a VOD de um explosivo é mais alta e, mais lentamente, quando sua VOD é mais baixa. As velocidades típicas de explosivos comerciais variam entre 2000 e 8000 m/s.

Conforme Silva (2009), a velocidade de detonação de um explosivo (VOD) é o índice mais importante do desempenho do mesmo, uma vez que a pressão de detonação de um explosivo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação, conforme a equação 3 mostra. Uma maneira de avaliar o desempenho de um explosivo é pela comparação da pressão produzida no furo durante a detonação. Caso a pressão produzida no furo durante a detonação não supere a resistência dinâmica da rocha, a mesma não será fragmentada, entretanto a energia não utilizada no processo de fragmentação e deslocamento da rocha se propagará no terreno sob a forma de vibração. As pressões podem ser calculadas usando a equação 3:

$$PF = \rho \times VOD^2 / 4 \times 10^{-6} \quad (3)$$

Sendo:

PF = pressão produzida no furo quando o explosivo está totalmente acoplado ao furo (GPa);

ρ = densidade do explosivo (g/cm³);

VOD = velocidade de detonação de um explosivo confinado (m/s).

3.4 Principais Explosivos

O ANFO é uma mistura de aproximadamente 95:5% de Nitrato de Amônio (AN) e óleo combustível (FO - *Fuel Oil*) que possui a forma de pequenos grãos (figura 1). Suas principais características são sua baixa densidade e não apresentar resistência à água, o que torna sua utilização restrita a furos secos. Porém, possui a grande vantagem do transporte fácil e venda a granel ou encartuxado. Além disso, apresenta baixa velocidade de detonação (ALONSO *et al.*, 2013).

O ANFO é um explosivo estável, de fácil fabricação e custo reduzido, mas também é relativamente difícil de controlar, pois sua performance é afetada por muitos parâmetros, como temperatura e confinamento. Devido às suas propriedades, o ANFO é o explosivo mais utilizado no mundo (MENDES, 2019).



Figura 2 - Amostra de ANFO. Fonte: Nitro Teknik.

De acordo com Mendes (2019), a emulsão explosiva é um sistema bifásico formada de uma dispersão de um líquido imiscível em outro, composta por sais inorgânicos oxidantes dissolvidos em água e um combustível líquido imiscível em água (figura 2). Esse tipo de explosivo é do tipo denominado “água em óleo”. O surgimento das emulsões elevou a segurança das operações de desmonte de rochas. Como principais características, pode-se ressaltar a alta velocidade de detonação, resistência à água e baixíssima sensibilidade ao choque e à fricção (ALONSO *et al.*, 2013).



Figura 3 - Emulsões explosivas encartuchadas. Fonte: Dinadrill.

As emulsões podem ser utilizadas mesmo em perfurações com 100% de água. Por terem densidade maior que a da água e por sua elevada resistência a mesma, expulsam boa parte dela (da água), ocupando seu espaço. Mesmo nessas condições extremas, o rendimento do desmonte permanece elevado (Ricardo e Catalani, 2007).

A figura 3 mostra a composição típica do ANFO e da emulsão.

Produtos	Ingredientes % em peso				TOTAL %
	Nitrato de amônio	Água	Óleo Diesel	Oleato de sódio ou monoleato de ezorbitol	
ANFO	94,50	0,00	5,50	0,00	100
Emulsão	77,30	16,70	4,90	1,10	100

Figura 4 - Comparação da composição entre ANFO e Emulsão.

3.5 Parâmetros do Plano de Fogo

Segundo Geraldi (2011), o plano de fogo é o projeto executivo para o desmonte de rocha com explosivos, no qual são definidos e apresentados o plano de perfuração, a qualificação e quantificação dos explosivos e os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados. Por ser um projeto executivo, o plano de fogo deve sofrer um processo contínuo de ajustes, adaptações e correções, conforme as observações de campo durante as detonações até se obter um grau de fragmentação e um controle estrutural e ambiental satisfatórios (SILVA, 2009).

A figura 4 mostra alguns parâmetros de um plano de fogo.

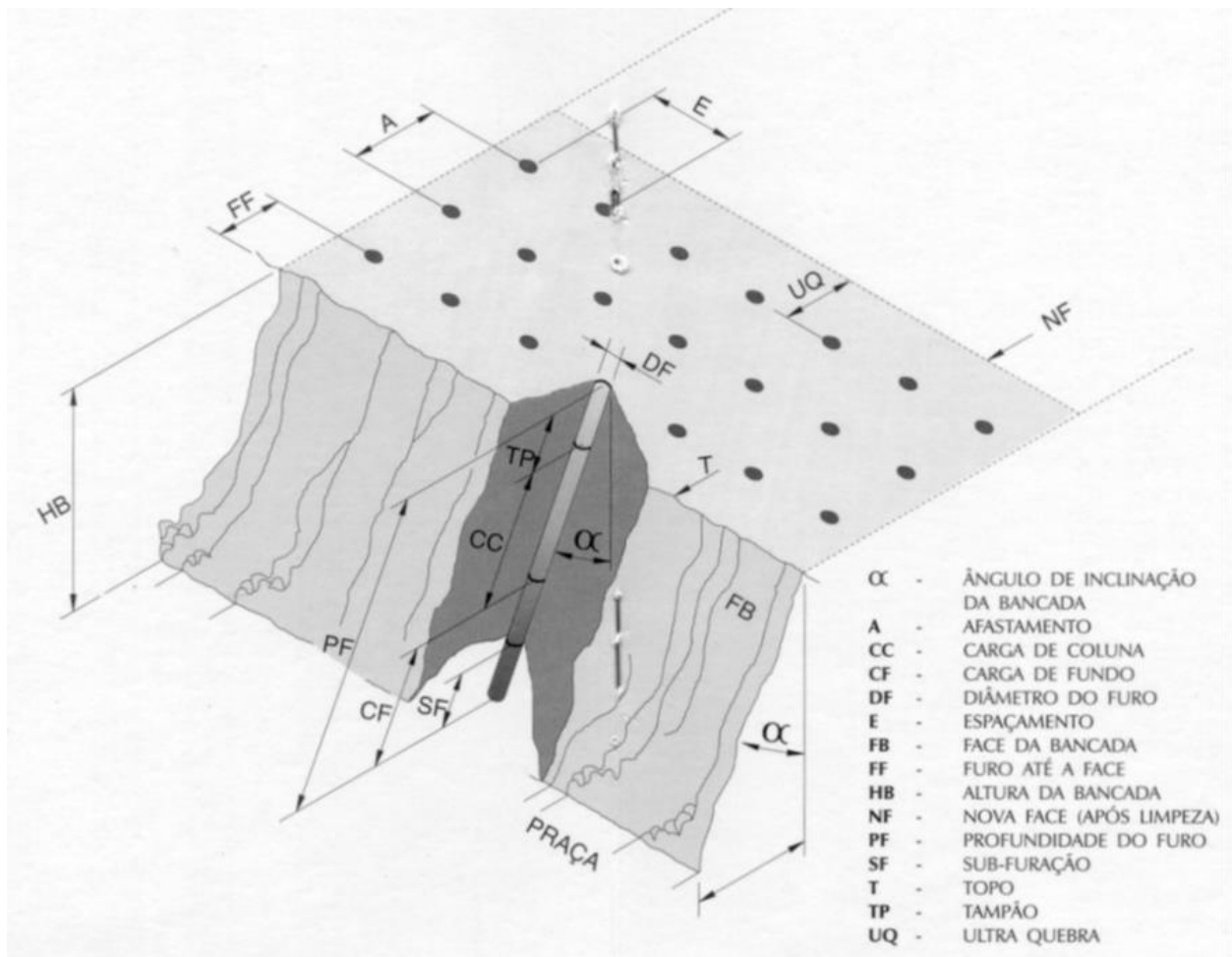


Figura 5 - Parâmetros geométricos de um plano de fogo. Fonte: Silva, 2019.

3.5.1 Afastamento

O afastamento (A) é a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos à outra. É a dimensão mais crítica do plano de fogo e a menos flexível. O erro na estimativa do afastamento pode prejudicar drasticamente o resultado. Furos pouco afastados causam uma fragmentação exageradamente fina além de provocar ruído excessivo. Já furos com afastamento superior ao ideal propiciam o ultralançamento das partículas e a ocorrência de vibrações no maciço rochoso (SILVA, 2019).

A escolha correta do afastamento é feita em função do diâmetro de furo, sendo que o afastamento máximo em metros deve ser menor do que o diâmetro do furo em polegadas (GERALDI, 2011). Há de se considerar que na etapa de perfuração podem ocorrer desvios dos furos, devido à fatores como a presença de fraturas e trincas, o comprimento do furo, e erro de emboque. Tais ocorrências pode interferir no resultado do desmonte (QUAGLIO, 2003).

3.5.2 *Espaçamento*

O espaçamento (E) é a distância entre dois furos de uma mesma linha. Segundo Silva (2019), um cálculo razoável do espaçamento entre os furos de rocha duras é igual a 1,15 vezes o afastamento entre os furos, e 1,75 vezes o afastamento para rochas brandas. Espaçamentos muito pequenos provocam o excesso de fragmentação entre os furos e propiciam repés no piso da bancada, enquanto espaçamentos muito grandes resultam em uma fragmentação grosseira e uma frente irregular no maciço remanescente.

3.5.3 *Altura da bancada*

A altura da bancada (H) é a distância (em metros) entre o piso (praça) e o topo da bancada. Sua medida é de grande importância para o sucesso do desmonte, sendo, dentre outros, um fator que interfere no resultado da fragmentação. De acordo com Ricardo e Catalani (2007), bancadas muito altas (superiores a 20 m) devem ser evitadas, dando-se preferência a várias bancadas de menor altura, a menos que as perfurações sejam executadas com perfuratriz de furo baixo. Com esse procedimento são criadas várias frentes de escavação independentes que permitem a utilização de quantidade maior de equipamentos, possibilitando aumentar a produção.

A partir da altura da bancada, do afastamento e do espaçamento é calculado o volume de rocha por furo (V) por meio da equação 4:

$$V = A \times E \times H \quad (4)$$

Sendo:

V = Volume da rocha por furo (m³);

A = afastamento (m);

E = espaçamento (m);

H = altura da bancada (m).

3.5.4 *Diâmetro de furo*

O diâmetro de furo (D) é determinado em função do equipamento previsto para executar as perfurações. A perfuratriz deve estar coerente com o equipamento disponível para o carregamento da rocha detonada para evitar que ocorra ociosidade de algum tipo de equipamento (Ricardo e Catalani, 2007). Os fatores que determinam o melhor diâmetro de perfuração para um determinado trabalho são: características do maciço rochoso que se deseja furar, grau de fragmentação desejada, altura do banco e comprimento das cargas, economia do processo de perfuração e quebra, e dimensões do equipamento de carga (JIMENO *et al.*, 2003).

3.5.5 *Tampão*

O tampão (T) é a parte superior do furo que não é carregada com explosivos, mas sim com brita, areia ou terra, que tem como função confinar os gases do explosivo para controlar impactos gerados pela perda de energia como o ruído e o ultralancamento de partículas. De acordo com Silva (2019), o tampão é calculado em função do afastamento, como mostrado na equação 5:

$$T = 0,7 \times A \quad (5)$$

Em que:

T = tampão (m);

A = afastamento (m).

3.5.6 *Carga de fundo e carga de coluna*

Devido à heterogeneidade dos maciços rochosos, são necessárias diferentes energias para se quebrar a rocha no fundo e no meio do furo. Por isso, comumente se utilizam explosivos de diferentes densidades em um mesmo furo, sendo que no fundo do furo é alocado o explosivo de maior densidade e força, onde é mais difícil de se deslocar a rocha, e explosivos de força média e baixa densidade na carga de coluna, onde é mais fácil a retirada (JIMENO *et al.*, 2003).

Segundo Silva (2019), as equações 6 e 7 são apropriadas para o cálculo do comprimento da carga de fundo (L_{cf}) e comprimento da carga de coluna (L_{cc}), respectivamente:

$$L_{cf} = 0,3x(L_f - T) \quad (6)$$

Sendo:

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

L_f = comprimento do furo (m);

T = tampão (m).

$$L_{cc} = L_f - L_{cf} - T \quad (7)$$

Em que:

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

L_f = comprimento do furo (m);

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

T = tampão (m).

O comprimento total da carga é a soma das cargas de fundo e de coluna, conforme a equação 8:

$$L_t = L_{cf} + L_{cc} \quad (8)$$

Sendo:

L_t = comprimento total da carga (m);

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

L_{cc} = comprimento da carga de coluna (m).

3.6 Modelos de Simulação da Fragmentação das Rochas

A extração mineral é uma fase de alta complexidade que depende da combinação de diversos fatores para que ocorra uma fragmentação adequada do material gerado no desmonte com uso de explosivos. Estes fatores estão relacionados às características da rocha, ao plano de fogo e propriedades do explosivo utilizado. A predição e o controle sobre o material fragmentado é de extrema importância pois é capaz de evitar que o desmonte resulte em tamanhos diferentes do desejado para seguir às etapas posteriores no beneficiamento, o que provocaria aumento no custo do processo, perda de material, afetaria a cadeia produtiva e, como resultado, encareceria o produto final (SANTANA, 2018).

Ao longo dos anos, foram apresentados vários modelos de simulação da fragmentação de rochas com uso de explosivos para se prever o resultado da distribuição granulométrica das rochas desmontadas e, assim, possibilitar o ajuste do plano de fogo para melhorar a qualidade do desmonte de acordo com o resultado desejado (CUNNINGHAM, 2005). Entre estes modelos, alguns citados por Kansake *et al.* (2016) são: Kuz-Ram (1983), KCO (Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony, 2005), CZM (*Crushed Zone Model*, 1999), TCM (*Two Component Model*, 1999), ANN (*Artificial Neural Networks*, 2005).

Atualmente, o modelo Kuz-Ram é possivelmente o modelo mais utilizado para estimar a fragmentação a partir de um plano de fogo. Este modelo originalmente foi proposto por Cunningham em 1983 e passou por duas modificações que melhoraram o modelo original: a segunda versão, de 1987, e a terceira e mais recente, de 2005. Para possibilitar a realização deste trabalho, a versão aqui utilizada é a de 1987, que não considera a influência do tempo de retardo no processo de previsão de fragmentação e calcula o fator de rocha com menor grau de detalhamento que a versão de 2005.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Modelo KUZ-RAM

Diversos autores propõem fórmulas que permitissem a estimativa da granulometria do desmonte de rochas a partir de parâmetros relacionados aos explosivos, à geometria do plano de fogo e às características do maciço rochoso. Entre estes autores, destaca-se Kuz-Ram, cujo modelo de fragmentação é bastante utilizado na mineração devido à facilidade de recolher dados de entrada e na sua ligação direta entre o projeto de desmonte e o resultado da quebra da rocha (Cunningham, 2005).

As três principais equações que compõem o modelo de Kuz-Ram são a equação de Kuznetsov, a equação de Rosin-Rammler e o Índice de Uniformidade de Cunningham.

4.1.1 Equação de Kuznetsov

A equação de Kuznetsov estima a quantidade de quebra que ocorre com uma conhecida quantidade de energia de um explosivo (Morais, 2004). A equação 9 relaciona o tamanho médio do fragmento e a energia explosiva (razão de carga) aplicada por unidade de volume de rocha em função do tipo de rocha. Esta equação foi modificada por Cunningham (2005) e é dada por:

$$X_{50} = A \times \left(\frac{Q}{V}\right)^{-0,8} \times Q^{0,167} \times \left(\frac{115}{E}\right)^{0,633} \quad (9)$$

Em que:

X_{50} = tamanho médio de partícula (cm);

A = fator de rocha;

V = volume de rocha desmontado por furo (m^3);

Q = massa do explosivo utilizado (kg);

E = energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparado ao ANFO (= 100).

O fator da rocha A está relacionado diretamente com a dureza e ao grau de fraturamento do maciço rochoso. Normalmente, esse fator varia de 7, para as rochas de fácil fragmentação, até 13, para as rochas extremamente difíceis de detonar (MORAIS, 2004).

A energia relativa ao ANFO é encontrada pela equação de Tidman (equação 10):

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

Sendo:

E = energia efetiva relativa por massa do explosivo;

VOD_e = velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo em m/s);

VOD_n = velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s);

RWS = energia por massa relativa ao ANFO (%).

4.1.2 Índice de Uniformidade de Cunningham

Cunningham (1987) desenvolveu uma expressão a partir de dados observados em campo. A equação (11), que determina o índice de uniformidade de Cunningham, relaciona os parâmetros geométricos do plano de fogo:

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{A}{D} \right) \times \left(\frac{1 + \frac{E}{A}}{2} \right)^{0,5} \times \left(1 - \frac{W}{A} \right) \times \left[\text{abs} \frac{(Lcf - Lcc)}{Lt} + 0,1 \right]^{0,1} \times \left(\frac{Lt}{H} \right) \quad (11)$$

Em que:

A = afastamento (m);

D = diâmetro do furo (mm);

E = espaçamento (m);

W = desvio padrão da perfuração;

Lt = comprimento total de carga (m);

H = altura do banco (m);

abs = valor absoluto ou módulo;

Lcf = comprimento da carga de fundo (m);

Lcc = comprimento da carga de coluna (m).

4.1.3 Equação de Rosin-Rammler

A equação 12 foi proposta por Rosin-Rammler e correlaciona o índice de uniformidade de Cunningham e a equação de Kuznetsov e, a partir dela, é possível traçar a curva de distribuição granulométrica das partículas:

$$P = 100 \times \left[1 - e^{-0,693 \times \left(\frac{X}{X_{50}} \right)^n} \right] \quad (12)$$

Sendo:

P = percentagem passante em uma abertura de tamanho X;

X = tamanho da malha da peneira (cm);

X₅₀ = tamanho médio do material (cm);

n = índice de uniformidade de Cunningham.

4.2. Sistema Computacional

A ferramenta utilizada no desenvolvimento do projeto foi o Lazarus (Figura 5), uma IDE (*Integrated Development Environment* = Ambiente de Desenvolvimento Integrado) para desenvolvimento de aplicações. A linguagem de programação utilizada é o Pascal.



Figura 5 - IDE utilizada no desenvolvimento do projeto. Fonte: *software Lazarus*.

A figura 6 mostra a interface do Lazarus no momento que este é inicializado pela primeira vez, antes que o programador faça qualquer alteração no formulário. É possível visualizar vários recursos na faixa superior do Lazarus, onde se encontram as guias com os componentes que podem se adicionados ao formulário tais como botões interativos, campos editáveis, campos de leitura e gráficos, entre outros.

À esquerda, em “Inspetor de Objetos”, são listados todos os componentes já inseridos no formulário. Em “Propriedades”, o programador pode fazer alterações nas propriedades do componente selecionado, possibilitando a personalização da interface do programa (do *software*) para deixá-la mais amigável (*user friendly*). Entre as possibilidades oferecidas, pode-se, por exemplo, redimensionar os componentes, alterar o tamanho e a cor da fonte, além de inserir a mensagem desejada para facilitar a compreensão do usuário.

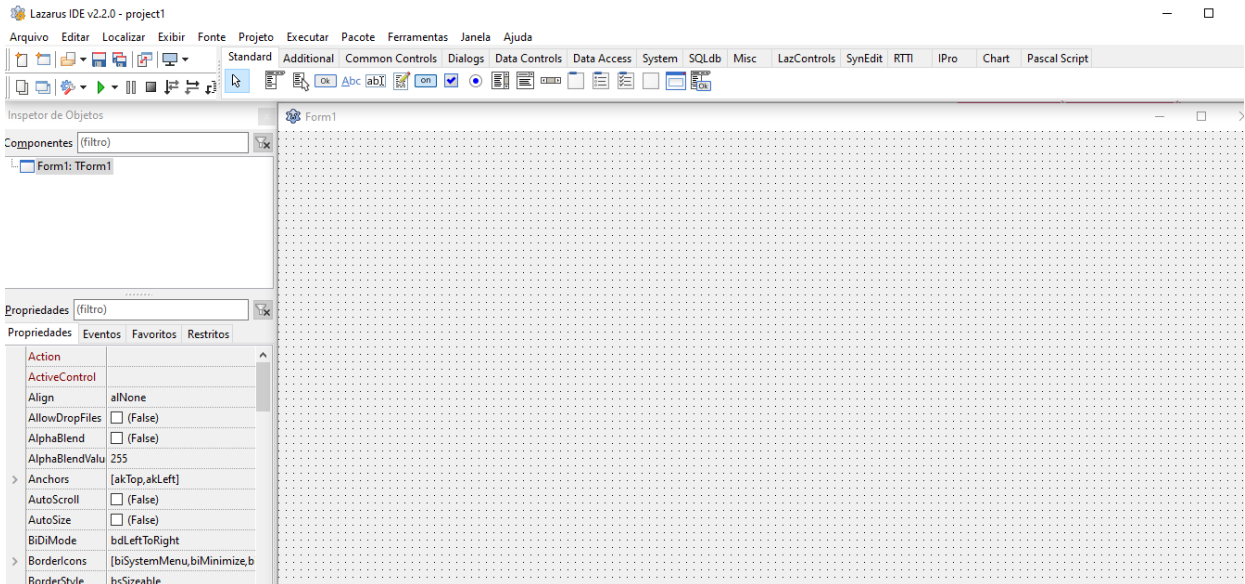


Figura 6 - Interface do Lazarus: ambiente de desenvolvimento do aplicativo computacional.

A figura 7 mostra o Editor de Código do Lazarus, ambiente de programação no qual o programador utiliza a linguagem Pascal para implementar o código.



Depois de realizada a programação no Editor de Código, ao se executar o programa, a interface final do aplicativo computacional desenvolvido neste trabalho e que será visualizada pelo usuário é mostrada na figura 8. Nela, é possível ver, à esquerda, os parâmetros que são utilizados no programa para se calcular a curva de distribuição granulométrica com base nas fórmulas do modelo de Kuz-Ram. À frente de cada parâmetro, existem campos editáveis onde o usuário do aplicativo pode alterar os valores (dados de entrada). Para o valor do Fator de Rocha, há um campo com uma lista de três valores que o usuário poderá escolher, conforme descrição na legenda imediatamente abaixo.

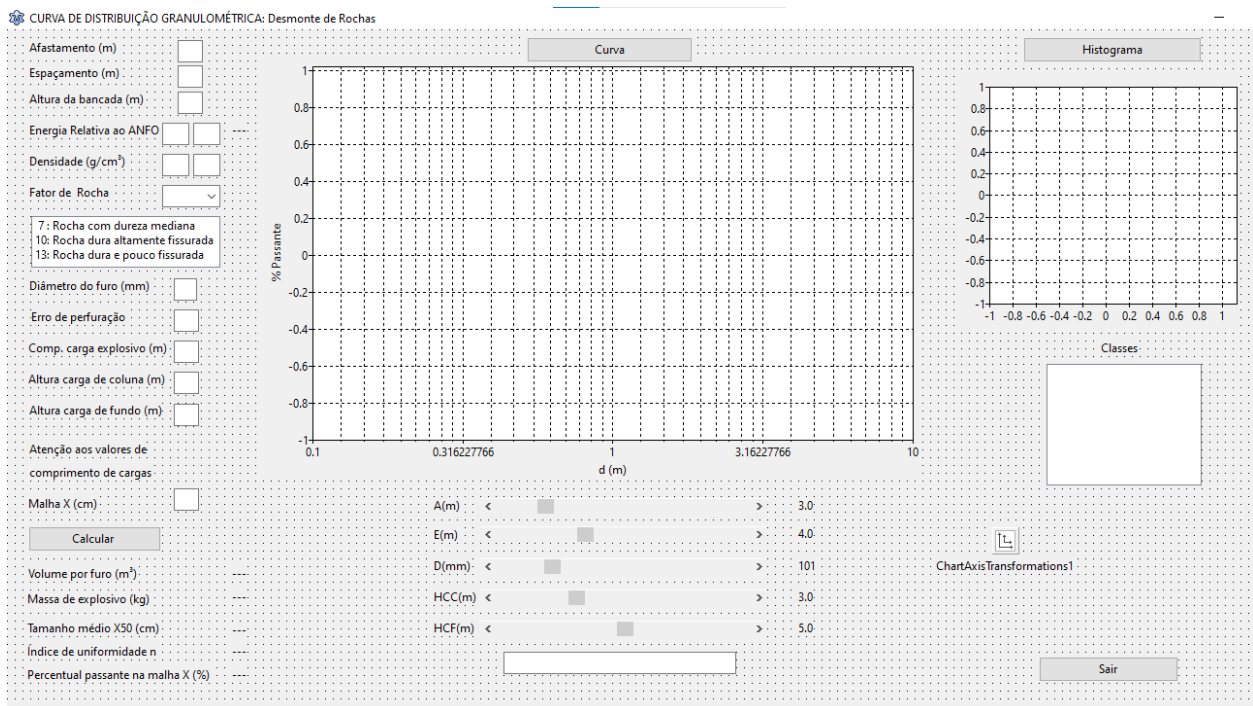


Figura 8 - Interface inicial do *software* desenvolvido.

O botão “Calcular” executa os cálculos para o volume por furo, tamanho médio, índice de uniformidade e o percentual passante na malha X (em cm) escolhida, conforme as equações 4, 9, 11 e 12, respectivamente. Como é comum as detonações utilizarem dois tipos de explosivos, o botão calcular também determina a energia relativa ao sistema da carga total nos furos, levando em consideração as características de cada explosivo (suas densidades, energias e, também, o comprimento das cargas de fundo e coluna), conforme a equação 13:

$$E = \frac{(\rho c \times Lcc \times Ec) + (\rho f \times Lcf \times Ef)}{(\rho c \times Lcc) + (\rho f \times Lcf)} \quad (13)$$

Sendo:

E = energia equivalente;

ρ_c = densidade do explosivo da carga de coluna;

L_{cc} = comprimento da carga de coluna;

E_c = energia do explosivo da carga de coluna;

ρ_f = densidade do explosivo da carga de fundo;

L_{cf} = comprimento da carga de fundo;

E_f = energia do explosivo da carga de fundo.

A massa de explosivo por furo é calculada de acordo com a equação 14 que leva em consideração os dois tipos de explosivos :

$$Q = \left(\frac{\pi D^2}{4000} \times \rho_c \times L_{cc} \right) + \left(\frac{\pi D^2}{4000} \times \rho_f \times L_{cf} \right) \quad (14)$$

Na qual:

Q = carga total de explosivo por furo (kg);

D = diâmetro do furo (mm);

ρ_c = densidade do explosivo da carga de coluna (g/cm³);

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

ρ_f = densidade do explosivo da carga de fundo (g/cm³);

L_{cf} = comprimento da carga de fundo (m).

Ao centro, na figura 8, encontra-se a área gráfica onde a curva de distribuição granulométrica será apresentada ao usuário através do botão “Curva”. Abaixo, estão as barras de rolagens (*scrollBars*) onde é possível alterar os valores do afastamento, do espaçamento, do diâmetro de furo e dos comprimentos das cargas de coluna e de fundo.

À direita, ao clicar em “Histograma”, serão exibidas barras verticais com alturas relativas às porcentagens de material compreendido entre alguns intervalos (classes) de tamanhos, de acordo com o modelo Kuz-Ram.

Finalmente, o botão “Sair”, na parte inferior do formulário, foi programado para encerrar o aplicativo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Finalizado o desenvolvimento do aplicativo computacional, este se encontra pronto para auxiliar na análise prévia de um futuro desmonte de rochas e, quaisquer alterações necessárias a fim de melhorar o resultado da fragmentação do desmonte, poderão ser feitas antecipadamente. O caráter interativo do sistema torna viável a simulação, em tempo real, de diferentes cenários para o desmonte de rochas, ou seja, à medida que o usuário insere e altera os valores dos principais parâmetros do plano de fogo, ele poderá visualizar imediatamente as consequências dessas alterações no resultado esperado da fragmentação após a detonação, antes mesmo que ela seja realizada.

5.1 Variáveis de cálculo

Os parâmetros considerados para realizar os cálculos, a título de exemplo, com seus respectivos campos para entrada de dados (*inputs*) são mostrados na figura 9:

Afastamento (m)	<input type="text" value="3"/>
Espaçamento (m)	<input type="text" value="4"/>
Altura da bancada (m)	<input type="text" value="10"/>
Energia Relativa ao ANFO	<input type="text" value="100"/> <input type="text" value="115"/>
Densidade (g/cm ³)	<input type="text" value="1.05"/> <input type="text" value="1.20"/>
Fator de Rocha	<input type="text" value="10"/> ▾
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> 7: Rocha com dureza mediana 10: Rocha dura altamente fissurada 13: Rocha dura e pouco fissurada </div>	
Diâmetro do furo (mm)	<input type="text" value="101"/>
Erro de perfuração	<input type="text" value="0.02"/>
Comp. carga explosivo (m)	<input type="text" value="8"/>
Altura carga de coluna (m)	<input type="text" value="3"/>
Altura carga de fundo (m)	<input type="text" value="5"/>
Atenção aos valores de comprimento de cargas	
Malha X (cm)	<input type="text" value="32"/>

Figura 9 – Dados do plano de fogo considerado no exemplo e os campos para entrada de dados (*input*).

Um “lembrete” (uma mensagem) foi inserido abaixo dos campos de altura de carga de coluna e de carga de fundo para que o usuário verifique estes valores, os quais, somados, devem ser igual ao comprimento da carga de explosivo informado.

Ao se clicar no botão “Calcular”, são exibidos os resultados utilizados para a representação da curva de distribuição granulométrica como mostrado na figura 10:

Calcular	
Volume por furo (m ³)	120.00
Massa de explosivo (kg)	73.31
Tamanho médio X50 (cm)	31.28
Índice de uniformidade n	1.38
Percentual passante na malha X (%)	51.08

Figura 10 - Resultados de saída (*outputs*) referentes às equações do modelo de Kuz-Ram.

As equações utilizadas para calcular estes valores forem descritas no capítulo 4 deste trabalho. Esses valores fornecem informações de grande interesse para os profissionais envolvidos, tais como o tamanho médio dos fragmentos e o percentual passante para uma malha específica de interesse do profissional que utiliza o aplicativo computacional.

5.2 Curva de Distribuição Granulométrica

Ao se clicar no botão “Curva”, um gráfico com a curva de distribuição granulométrica é exibido conforme a figura 11 mostra. Nela, o eixo das abcissas corresponde ao tamanho dos fragmentos do desmonte de rochas, em escala logarítmica, variando de 0,001 até 3 metros, intervalo que normalmente abrange todos os tamanhos dos fragmentos resultantes de um desmonte de rochas. O eixo das ordenadas, por sua vez, corresponde ao percentual do material passante para uma certa malha. A análise da curva permite a interpretação do resultado do desmonte, em termos de tamanho do material fragmentado. Por exemplo, para os valores inseridos na figura 9, a curva na figura 11 mostra que 10% do material fragmentado apresenta tamanho menor que 0,08 metros e, os 10% de maiores dimensões, são referentes a blocos maiores que 0,75 metros.

Estas análises possibilitam avaliar se o desempenho esperado do desmonte será satisfatório, ou seja, se os parâmetros utilizados produzirão os resultados esperados pela equipe técnica que elaborou o plano de fogo. Gráficamente, o usuário conseguirá avaliar mais facilmente o desempenho esperado.

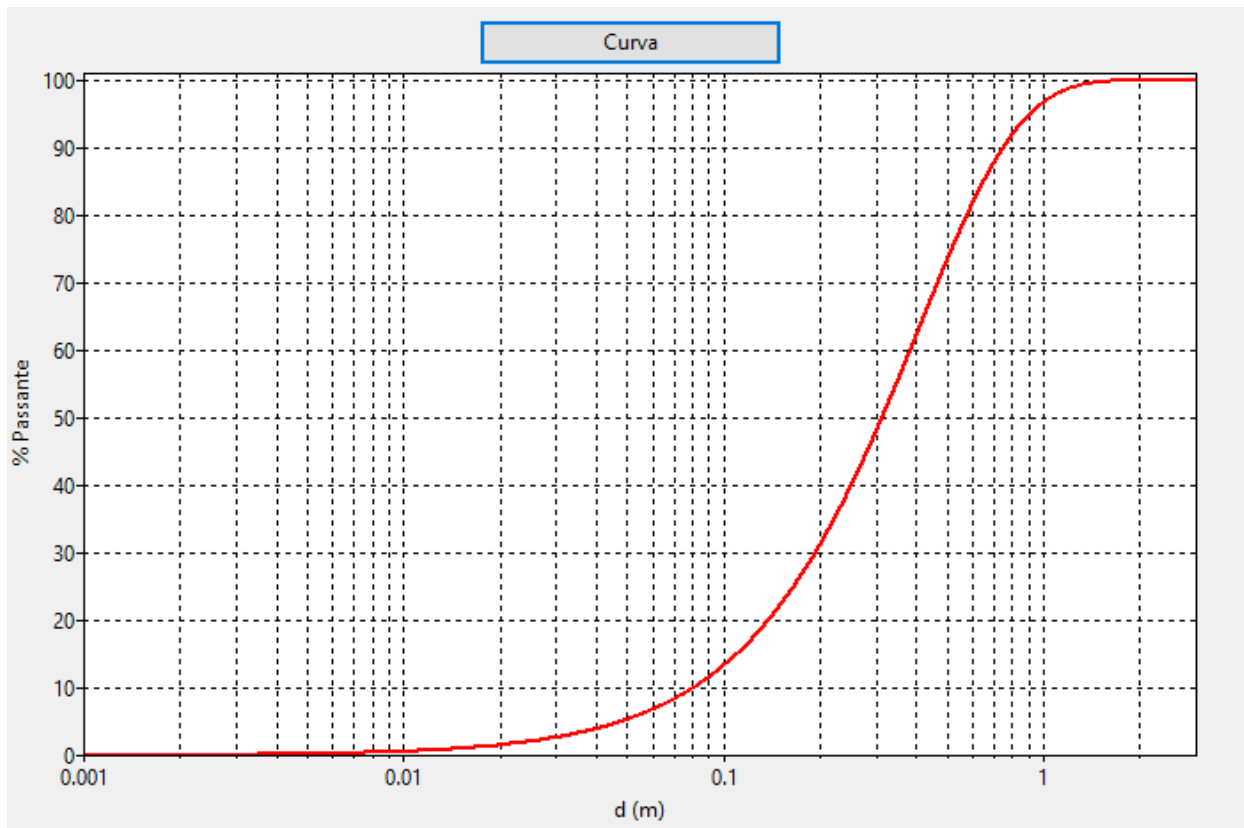


Figura 11 - Gráfico com a representação da curva de distribuição granulométrica simulada pelo aplicativo.

Abaixo da área onde é mostrada a curva de distribuição granulométrica, ficam as barras de rolagem (*scrollBars*) que permitem ao usuário uma alteração rápida dos valores referentes à alguns parâmetros geométricos do plano de fogo: afastamento, espaçamento, diâmetro do furo, altura da carga de coluna e altura da carga de fundo, respectivamente. Para diminuir ou aumentar os valores destas variáveis, basta que o usuário clique nas setas à esquerda ou à direita, respectivamente. A figura 12 exhibe estas barras.

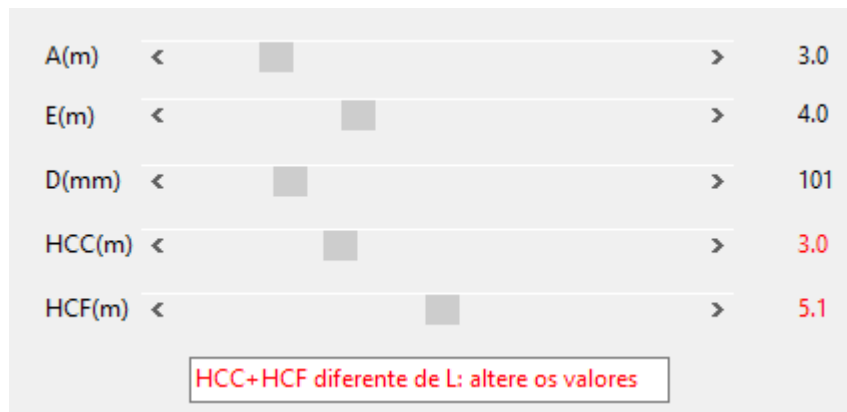


Figura 12- Barras de rolagem (*scrollBars*).

Destaca-se, nesta figura, um campo inserido para “alertar” o usuário caso a soma dos valores da altura da carga de coluna e de fundo não estejam em conformidade com o comprimento total da carga de explosivo informada pelo usuário (que neste exemplo, é igual à 8 metros).

A alteração da curva (ajuste da curva) ocorre simultaneamente à alteração dos valores nas barras de rolagem, ou seja, não é necessário que o usuário clique novamente no botão “Curva” para que a nova curva seja exibida no gráfico. De maneira semelhante, os valores apresentados na figura 10 também são recalculados automaticamente, bem como a exibição do histograma.

Na figura 13, é exibida outra curva, com valores diferentes de afastamento e espaçamento da figura 11, mas com os demais parâmetros fixos (i. e., com os mesmos valores da figura 11). Na figura 13, os valores do afastamento e espaçamento foram exagerados, não estando em conformidade entre si e, portanto, buscam representar valores impraticáveis. O objetivo de se exibir esta figura neste trabalho é permitir a comparação com a curva da figura 11 e trazer reflexões que podem ser feitas a partir da alteração dos parâmetros.

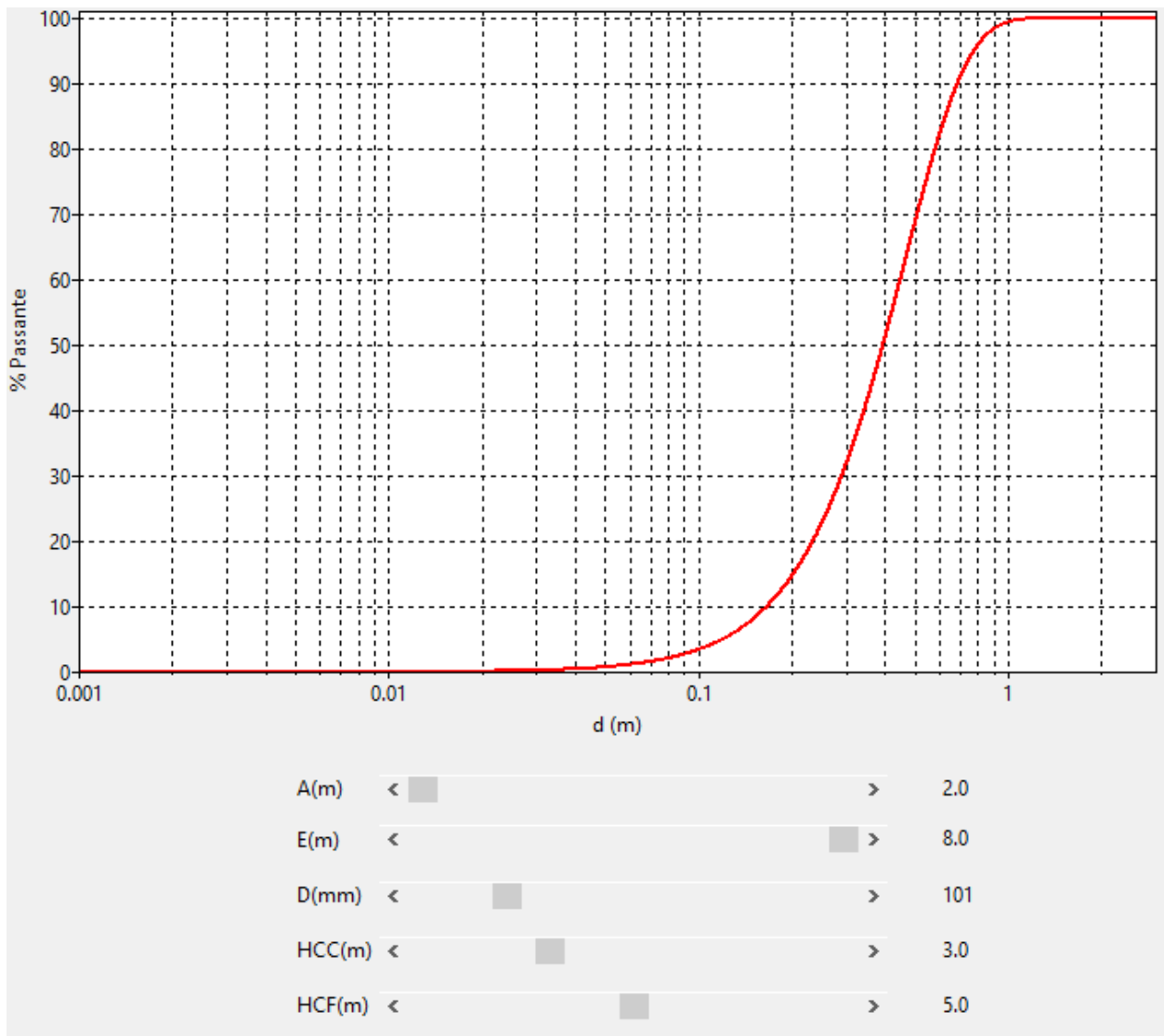


Figura 13 - Curva de distribuição granulométrica com alteração nos valores de dois parâmetros: A (afastamento) e E (espaçamento).

Uma observação que pode ser feita pela comparação entre as imagens é que o aumento do espaçamento e a diminuição do afastamento entre os furos deslocou a curva para a direita rotacionado-a no sentido anti-horário, indicando que esta alteração irá gerar uma quantidade maior de material com tamanho maior que 1 m e, também, menor quantidade de finos.

Outra comparação entre as imagens é que, quando o afastamento foi reduzido e o espaçamento aumentado, a variabilidade nos tamanhos dos fragmentos do desmonte foi reduzida (a faixa com as maiores porcentagens dos fragmentos se estreitou). O efeito contrário é observado quando o espaçamento é diminuído e o afastamento aumentado (não mostrado nas figuras).

5.3 Histograma

O programa desenvolvido neste trabalho também fornece a representação de um histograma (gráfico de barras) que é exibido quando o usuário clica no botão “Histograma” mostrado na figura 14.

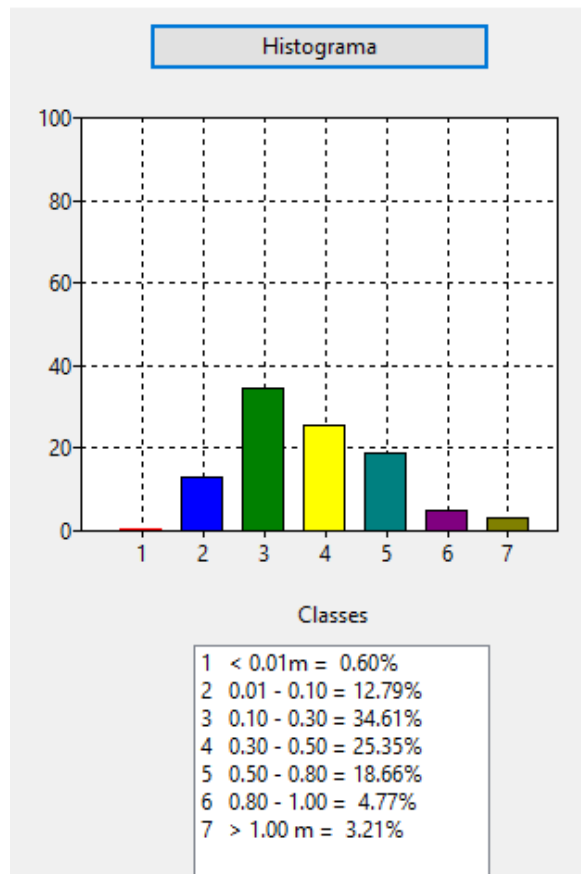


Figura 14 - Histograma referente aos parâmetros mostrados na figura 9.

No histograma, cada classe com intervalos pré-definidos é representada por uma barra (as barras possuem cores diferentes), cujo tamanho é compatível com a porcentagem dos fragmentos pertencentes à cada classe. Na figura 14, percebe-se que a maior parte dos fragmentos de um desmonte executado com os valores definidos na figura 9 pertencem às classes 3 e 4, ou seja, é esperado que a maior parte dos fragmentos possuirão tamanhos entre 0,10 e 0,50 m após o desmonte, sendo 34,61% com granulometria entre 0,10 e 0,30 m e 25,35% entre 0,30 e 0,50 m.

A partir de tais análises, o sistema computacional oferece ao usuário a oportunidade de redimensionar o plano de fogo para que o resultado do desmonte elimine ou mitigue fragmentos indesejados, como matacões e materiais finos, que são vistos como perdas operacionais que devem ser evitados para a melhoria do empreendimento mineiro.

6. CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho, foi desenvolvido um sistema computacional que tem a capacidade de fornecer informações úteis para que os profissionais da mineração tomem decisões assertivas no momento de elaborar o plano de fogo, de forma a possibilitar que os desmontes sejam corretamente executados, conforme as expectativas. Dessa forma, a otimização do desmonte de rochas poderá proporcionar maior produtividade e redução dos custos envolvidos na atividade minerária em geral, uma vez que o resultado do desmonte exerce grande influência em toda a cadeia produtiva do empreendimento.

O objetivo do trabalho foi alcançado pois o sistema computacional é capaz de simular a curva de fragmentação do desmonte, que é facilmente interpretada e possibilita a adequação dos parâmetros controláveis do plano de fogo. É esperado que, por meio desta simulação, o profissional possa ajustar o plano de fogo para melhorar o resultado do desmonte utilizando-se de seus conhecimentos e experiências prévias.

A análise das classes de tamanhos dos fragmentos também poderá ser feita através dos histogramas mostrados pelo aplicativo computacional desenvolvido.

A realização desse trabalho mostrou a importância do uso de técnicas de programação por parte dos profissionais da mineração, pois, através destas técnicas, é possível a implementação de soluções viáveis, econômicas e seguras na mineração.

Por fim, ressalta-se, neste momento, o caráter acadêmico do *software* apresentado neste trabalho, visto que foi desenvolvido em uma disciplina do curso de Engenharia de Minas denominada Trabalho de Conclusão de Curso, não tendo sido, portanto, realizado todos os testes necessários para análise e validação dos resultados obtidos devido, principalmente, à limitação de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, J. B.; GÓMEZ, J. C. e HERBERT, J. H. **Perforación y voladura de rocas en minería**. Madri, 2013.
- BOTELHO, A. H. **Influência da Operação de Desmonte de Rochas no Carregamento de Material Fragmentado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CUNNINGHAM, C. V. B. **The Kuz-Ram fragmentation model-20 years on**. In: Brighton conference proceedings, 2005.
- DANCE, A. **Mine-to-mill optimisation: effect of feed size on mill throughput**. Austrália: SRK Consulting, 2013.
- DARLING, P. **SME Mining Engineering Handbook**. Society for mining, metallurgy, and exploration, Inc., 2011.
- FERREIRA, D. R. **Método de Otimização de Desmonte de Rocha por Explosivos**. 2017. 63 f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- GERALDI, J. L. P. **O ABC das Escavações de Rocha**. Rio de Janeiro: Interciências Ltda, 2011.
- JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; BERMÚDEZ, P. G. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 2003.
- KANSAKE, B. A.; TEMENG, V. A. e AFUM, B. O. **Comparative Analysis of Rock Fragmentation Models–A Case Study**. 4 th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference, p. MP 1 – 11, 2016.
- MENDES, M. L. **Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos – Formação de Blaster**, 2018 83p. Belo Horizonte. Disponível em: <https://www.academia.edu/10183750> – acessado em: 08/03/2023.
- MORAIS, J. L. **Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos**. Tese (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- QUAGLIO, O. A. **Otimização da Perfuração e da Segurança nos Desmontes de Agregados Através dos Sistemas *laser profile* e *boretrak***. 2003. Dissertação – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.
- RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação: Terraplanagem e Escavação de Rocha**. 3. ed. rev. e ampliada. São Paulo: Editora Pini, 2007.

SANTANA, M. C. **Aplicação do Modelo de Kuz-Ram e Fotoanálise na Avaliação da Eficiência do Desmonte em Mineração de Gipsita na Região do Araripe.** Dissertação – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SCOOT, A.; COCKER, A.; DJORDJEVIC, N.; HIGGINS, M.; LA ROSA, D.; SARMA, K. S.; WEDMAIER, R. **Open pit blast design – Analysis and Optimization.** Queensland: Mining and Mineral Processing, 1996.

SILVA, V. C. **Desmonte de Rochas.** Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2019.

SILVA, V. C. **Curso de MIN210 - Operações Mineiras.** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas/UFOP, 2009.