

SOFTWARE LIVRE PARA SIMULAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHAS À CÉU ABERTO EM PYTHON

André L. Ramos

Laboratório de Geometalurgia e Simulação de Processos

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (CPGEM),

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

andrelubene@gmail.com

Douglas B. Mazzinghy

Laboratório de Geometalurgia e Simulação de Processos

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (CPGEM),

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

RESUMO

O uso de explosivos industriais é largamente empregado na mineração como primeira etapa na fragmentação de maciços rochosos. Tanto o formato da pilha do material detonado, quanto a sua distribuição granulométrica influenciam nos demais processos: escavação, carregamento, transporte, britagem e moagem. Há, portanto, grande interesse em controlar a fragmentação por explosivos. Modelos matemáticos são normalmente utilizados para a previsão da distribuição de tamanho dos fragmentos e o modelo Kuz-Ram é um dos mais utilizados pela indústria mineral. O presente trabalho objetiva a divulgação do primeiro software livre para simulação de desmonte de rochas à céu aberto. Por ser livre, tal software pode ser aprimorado e ampliado não só pelos autores, mas por qualquer um que tenha interesse em contribuir.

Palavras-chave: Kuz-Ram; Simulação; Python; Desmonte de Rocha.

ABSTRACT

The use of industrial explosives is widely used in mining as the first step in the fragmentation of rock masses. Both the shape of the pile of the blasted material and its granulometric distribution influence other processes: excavation, loading, hauling, crushing, and grinding. There is, therefore, great interest in controlling explosive fragmentation. Mathematical models are normally used to predict the size distribution of fragments and the Kuz-Ram model is one of the most used by the mineral industry. The present work aims at the dissemination of the first open-source software for simulating rock blasting in open-pit mines. Because it is open-source, such software can be improved and expanded not only by the authors but by anyone interested in contributing.

Keywords: Kuz-Ram; Simulation; Python; Rock Blasting.

INTRODUÇÃO

O uso de explosivos industriais é largamente empregado na mineração como primeira etapa na fragmentação de maciços rochosos. Tanto o formato da pilha do material detonado, quanto a sua distribuição granulométrica influenciam nos demais processos: escavação, carregamento, transporte, britagem e moagem. Somado a isto, a formação de material de tamanhos extremos, muito grandes (matacos) e/ou muito pequenos (finos), pode gerar custos adicionais ao processo e produtos fora da especificação. Há, portanto, grande interesse em controlar a fragmentação por explosivos [1].

A fim de caracterizar o material formado a partir de um desmonte, surgiram modelos que buscam oferecer a previsão da distribuição de tamanho dos fragmentos. Esses modelos podem ser interpretados como um conjunto de equações que definem (i) a forma da curva de distribuição granulométrica e (ii) como essas propriedades são influenciadas por fatores como a quantidade explosivo usado, carga específica q (kg/m^3), força do explosivo, geometria do plano de fogo e propriedades da rocha. A relação entre essas funções é normalmente dada de forma multiplicativa para o tamanho mediano, x_{50} .

$$x_{50} = f1(\text{rocha}) \cdot f2(\text{geometria}) \cdot f3(\text{explosivo}) \quad (1)$$

onde $f_i (i = 1, 2 \text{ e } 3)$ denota as funções de dados que descrevem os argumentos [2].

O modelo Kuz – Ram é possivelmente a abordagem mais amplamente usada para estimar a fragmentação da detonação e o interesse cada vez maior no campo do controle de detonação traz um foco maior ao modelo [1]. Kuz – Ram é um modelo de fragmentação empírico baseado nas equações de Kuznetsov e Rosin & Rammler modificadas por Cunningham, em que o coeficiente de uniformidade para equação de Rosin & Rammler deriva a partir dos parâmetros do plano de fogo [3].

As vantagens do modelo estão em sua simplicidade em termos de facilidade de coleta de dados de entrada e em sua ligação direta entre o projeto de detonação e o resultado da quebra da rocha. Os algoritmos são facilmente incorporados em planilhas, mas um problema com isso é o perigo de entradas incorretas. Um outro perigo é a tendência de inexperientes usuários para usá-lo além de sua faixa adequada de aplicação [1].

Esses modelos de fragmentação permitem ao engenheiro, no planejamento do desmonte, avaliar os efeitos das alterações dos parâmetros do plano de fogo, características do explosivo e condições geomecânicas do maciço rochoso a ser desmontado. Busca-se assim, um plano de fogo otimizado, o qual gerará efeitos positivos em todas as etapas subsequentes.

Para possibilitar a execução de várias tarefas, um computador precisa nos entender ou pelo menos, entender o que precisamos que eles façam. É aí que entram as linguagens de programação. Os humanos têm idiomas diferentes para lugares diferentes e os computadores têm idiomas diferentes para tarefas diferentes [4] [5]. Um dos idiomas (linguagem de programação) que os computadores entendem é Python. Criada em 1991, por um desenvolvedor chamado Guido Van Rossum, Python é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada, de script, imperativa, orientada a objetos, funcional,

de tipagem dinâmica e forte. Em outras palavras, Python é uma linguagem de programação mais próxima da linguagem humana (alto nível), que automatiza a execução de tarefas, a partir de uma sequência de comandos para o computador executar. Isso torna Python uma linguagem de programação muito popular usada para aplicativos independentes de desktop ou aplicativos online/web, bem como projetos de desenvolvimento em pequena ou grande escala [4].

A utilização da computação e da automação para o controle dos processos produtivos é uma realidade da indústria mineral, brasileira e mundial. Como exemplos, pode-se citar os softwares para o planejamento de lavra e avaliação de reservas, sistemas de controle das usinas de tratamento de minérios e os sistemas de despacho eletrônico para caminhões. A quase totalidade destes é classificada como software de código fechado (*proprietary source software*), onde, legalmente, apenas a pessoa ou organização que o criou mantém controle exclusivo. Já em um software de código livre (*open source*) o autor torna o código fonte disponível para que outros possam visualizar, inspecionar, copiar, modificar, melhorar e compartilhar tal código [6].

O presente trabalho tem como objetivo abordar as equações matemáticas que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram, além de apresentar e disponibilizar o acesso, gratuito, ao primeiro software livre (*open software*) de simulações de desmonte de rochas por explosivo.

MODELO KUZ-RAM

As características do maciço rochoso, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas em equações que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram:

- Teoria de quebra Kuznetsov: a quantidade de quebra que ocorre com uma conhecida quantidade de energia de um explosivo pode ser estimada usando a equação de Kuznetsov.
- Função de distribuição de tamanho Rosin & Rammler: a distribuição do tamanho das partículas da rocha fragmentada pode ser determinada a partir do tamanho médio, se o modelo de quebra é conhecido.
- Teoria de detonação do explosivo Tidman: a quantidade de energia liberada pelo explosivo é calculada usando a equação de Tidman.
- Correlação dos parâmetros do plano de fogo Cunningham: existe uma correlação entre as várias configurações dos planos de fogo e o modelo de fragmentação da rocha.
- Correlação dos tipos de rochas Lilly: as propriedades e características do maciço rochoso interferem no resultado da fragmentação da detonação. A classificação geomecânica de Lilly, e posteriormente modificada por Cunningham, é utilizada no modelo de fragmentação de Kuz-Ram.

O modelo proposto por Cunningham, denominado de Kuz-Ram, corresponde a uma modelagem empírica, que se sustenta basicamente nas seguintes equações [1] [2] [7]:

A adaptação da equação de Kuznetsov:

$$X_{50} = AK^{-0.8}Q_o^{\frac{1}{6}}\left(\frac{115}{E_r}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (2)$$

A = Fator de Rocha, que depende das características geomecânicas do maciço rochoso; K = Razão de Carga [kg/m^3]; Q_o = Carga de explosivo no furo [kg]; X_{50} = Tamanho médio dos fragmentos [cm]; E_r = Representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO.

A equação de Rosin-Rammler adaptada:

$$R_i = e^{(-0,693(\frac{x_i}{x_{50}})^n)} \quad (3)$$

X_i = Abertura da peneira [cm]; X_{50} = Tamanho médio dos fragmentos [cm]; n = Índice de uniformidade de Cunningham.

Sendo o percentual passante para uma determinada abertura da malha da peneira P_i , igual a:

$$P_i = 100(1 - R_i) \quad (4)$$

Índice de uniformidade de Cunningham:

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

B = Afastamento [m]; S = Espaçamento [m]; H = Altura da bancada [m]; D = Diâmetro do furo [mm]; W = Desvio do furo [m]; L = Comprimento da carga [m].

Equação de Tidman:

A energia do explosivo é calculada a partir da equação desenvolvida por Tidman:

$$E_r = RWS\left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right)^2 \quad (6)$$

E_r = Energia efetiva relativa por massa do explosivo; VOD_e = Velocidade de detonação efetiva do explosivo, medida em campo [m/s]; VOD_n = Velocidade de detonação nominal do explosivo [m/s]; RWS = Representa a energia por massa relativa ao ANFO [%].

Índice de blastabilidade de Lilly:

Cunningham modificou o índice de blastabilidade proposto por Lilly, dando origem ao “fator de rocha A ” que busca melhor quantificar a classificação geomecânica do maciço rochoso:

$$A = 0,06(RMD + RDI + HF) \quad (7)$$

Lilly levou em conta para desenvolver o índice de blastabilidade a densidade e orientação das descontinuidades, densidade da rocha e dureza da rocha que são representadas na equação (7), respectivamente, por RMD (descrição do maciço rochoso), RDI (influência da densidade) e HF (influência da dureza). A Tabela 1 permite classificar o maciço rochoso quanto ao Fator de rocha A, que pode variar de 1 para as rochas de fácil fragmentação, até 12 para as rochas extremamente difíceis de se detonar [8].

Tabela 1: Parâmetros necessários para a classificação geomecânica [8]

Parâmetro	Descrição		Índice
RMD	Descrição do maciço rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	JPS < 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Oversize da britagem primária (m)	Oversize britagem: 1m	
DP	Parâmetro da malha de perfuração	$DP = (B \cdot S)^{0,5}$	B = afastamento (m) S = espaçamento (m)
JPA	Direção e mergulho com relação a face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (<i>d</i> = densidade da rocha intacta g/cm ³)	$RDI = 25d - 50$	
HF	Se <i>E</i> < 50 GPa Se <i>E</i> > 50 GPa	$HF = E/3$ (<i>E</i> = módulo de Young GPa) $HF = UCS/5$ (<i>UCS</i> = Resistência à compressão uniaxial MPa)	

A Figura 1 apresenta a aplicação da equação (1), onde mostra a relação de como as funções (2), (3), (4), (5), (6) e (7) interagem dentro do modelo Kuz-Ram.

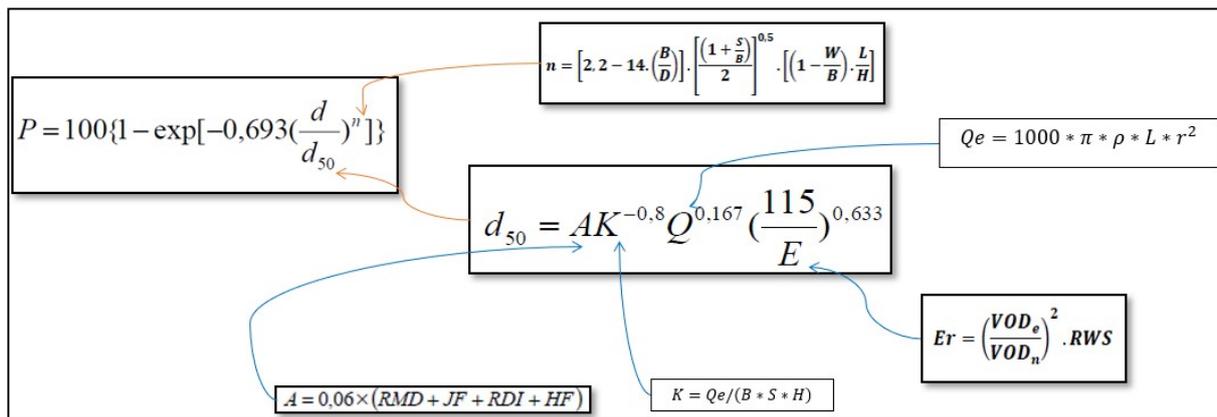


Figura 1. Resumo visual do modelo Kuz-Ram

METODOLOGIA

Na introdução, deste trabalho, foram discutidos: a importância do processo de detonação e o seu acompanhamento; o modelo matemático Kuz-Ram e suas equações que permitem simulações do desmorte. O restante do trabalho dedica-se a apresentar: orientações gerais para o uso da primeira versão do software; instruções para baixar o arquivo de instalação; apresentação de um exemplo numérico; e discute as possibilidades de novas versões do programa.

Pyblast é o primeiro software livre de simulação de desmorte de rochas, desenvolvido na linguagem Python. Atualmente, na sua primeira versão, o programa permite que os usuários simulem até três curvas granulométricas distintas a partir do modelo Kuz-Ram. A Figura 2 ilustra a tela inicial do programa, onde o usuário poderá inserir os dados de entrada (*inputs*) e terá como saída (*outputs*) as curvas granulométricas, além de outras informações sobre a simulação.

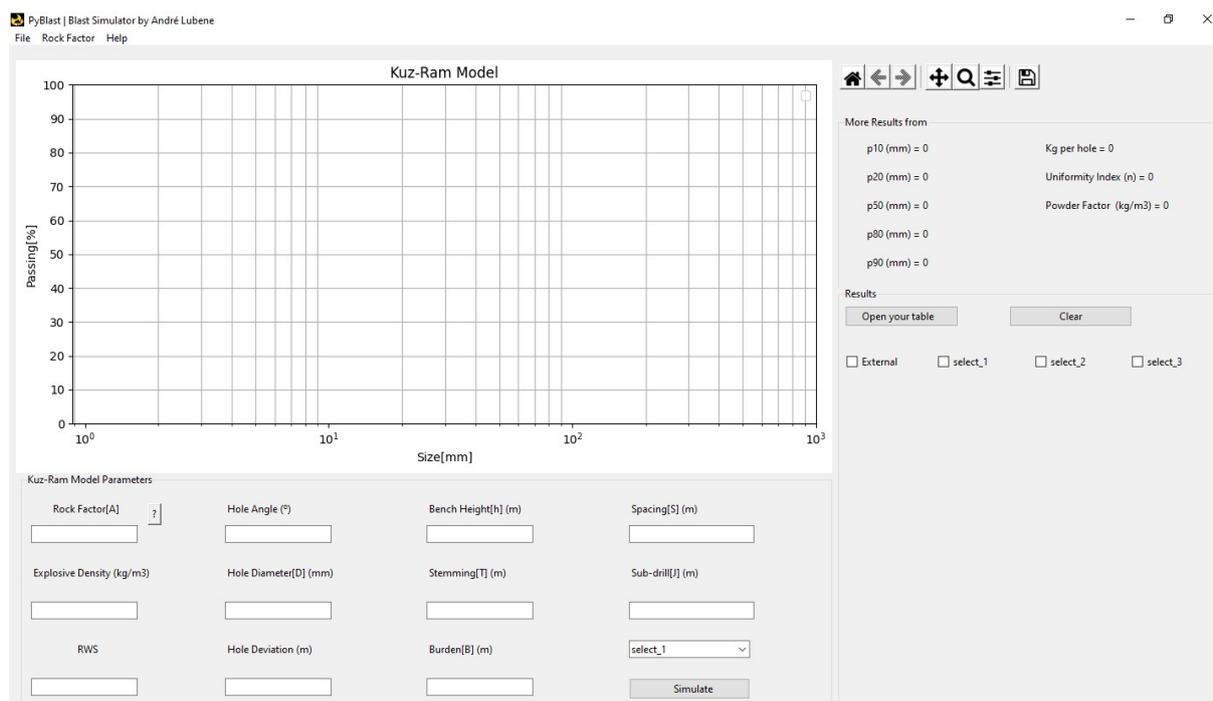


Figura 2. Tela inicial do Pyblast

O usuário pode inserir os parâmetros de entrada na parte inferior da tela inicial. Esses parâmetros são relacionados às características da rocha, do explosivo e do plano de fogo. A Figura 3 indica o local de inserção dos parâmetros.

Kuz-Ram Model Parameters

Rock Factor[A] ?	Hole Angle (°)	Bench Height[h] (m)	Spacing[S] (m)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Explosive Density (kg/m ³)	Hole Diameter[D] (mm)	Stemming[T] (m)	Sub-drill[J] (m)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
RWS	Hole Deviation (m)	Burden[B] (m)	select_1 ▾
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Simulate"/>

Figura 3. Parâmetros de entrada

O resultado das simulações são curvas de distribuição granulométrica, apresentadas em um gráfico de porcentagem passante por tamanho do fragmento (Figura 4).

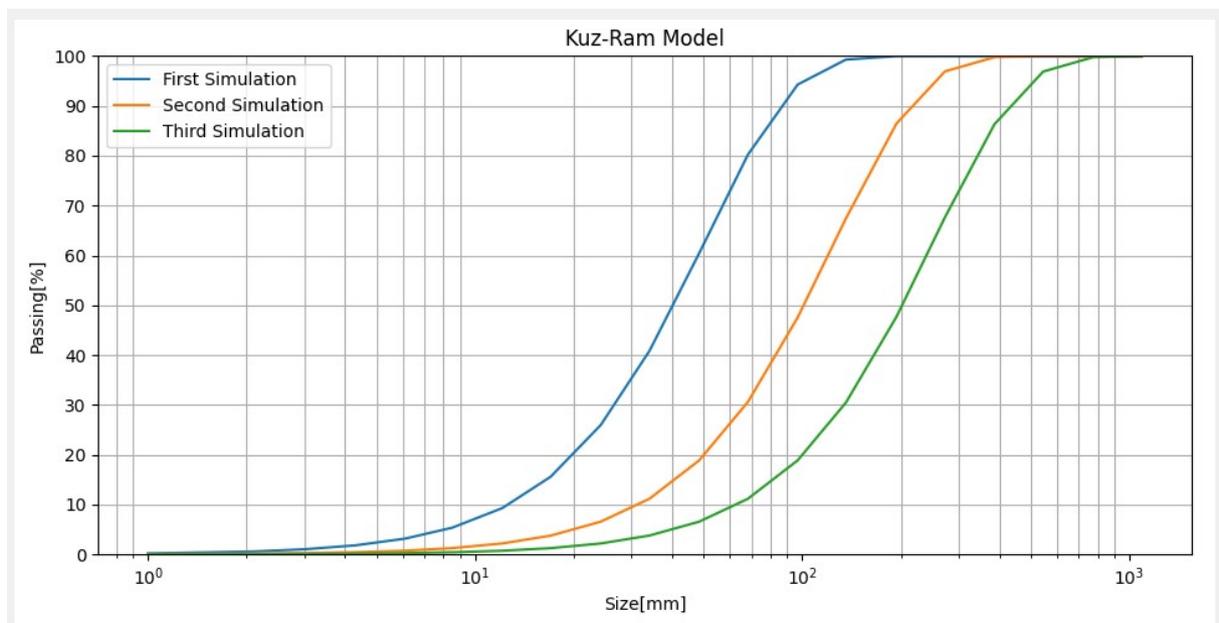


Figura 4. Representação gráfica do resultado de três simulações hipotéticas

Outras informações da simulação são apresentadas: quantidade explosivo por furo, razão de carga (quantidade de explosivo em quilograma por metro cúbico de rocha) e o índice de uniformidade, além dos valores numéricos das curvas granulométrica. A Figura 5 apresenta um exemplo dessas informações.

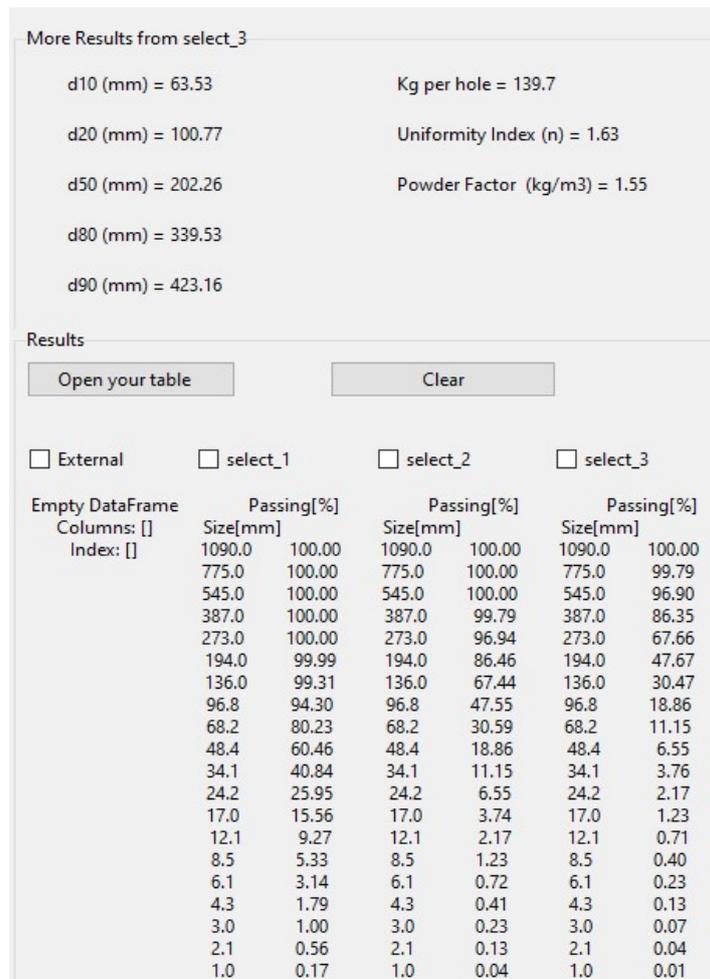


Figura 5. Valores numéricos das simulações

Nessa versão do Pyblast, o programa apresenta algumas funcionalidades, como a possibilidade de importar uma curva granulométrica e salvar, em Excel, os resultados simulados.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Exemplo numérico

Essa seção se dedica a apresentar um exemplo de uma simulação, para isso o trabalho de Souza [9] foi usado como referência. A Figura 6 ilustra a inserção dos parâmetros de entrada do modelo.

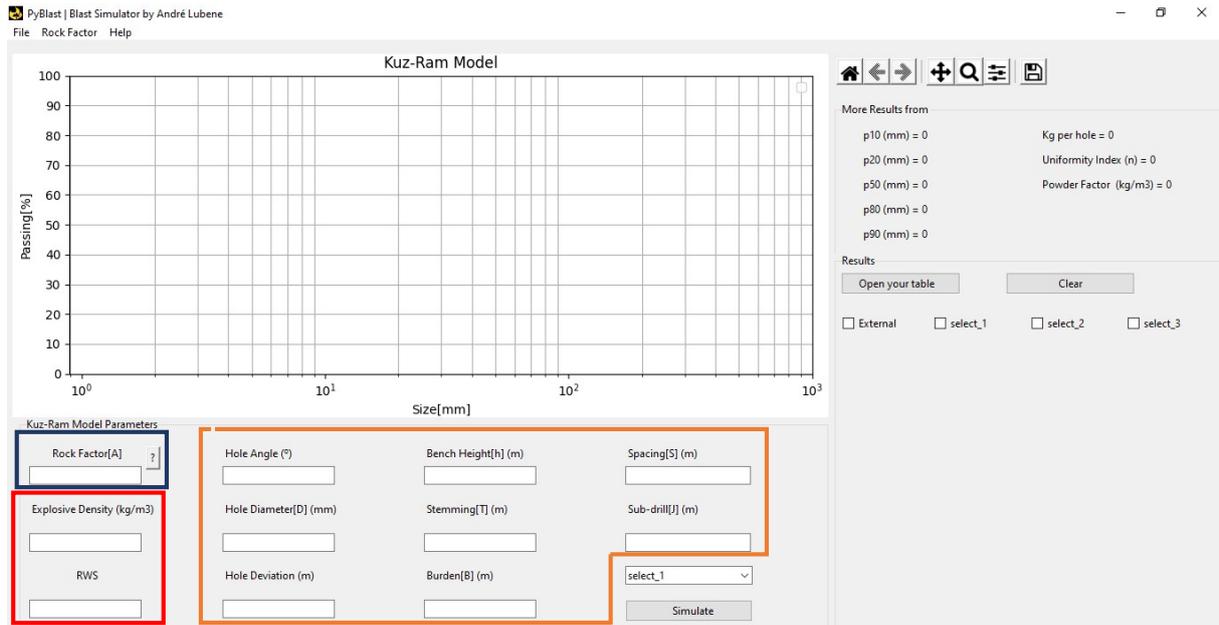


Figura 6. Tela do programa destacando os parâmetros de entrada

Características da Rocha

Rock Factor [A]

Destacado em azul na Figura 6, este parâmetro pode ser obtido a partir da classificação geomêcnica do maciço rochoso, Tabela 1, a ser desmontado ou ao lado do Rock Factor há um botão com uma interrogação “?”. Ao clicar nesse botão abrirá uma janela que permitirá classificar o maciço.

A Figura 7 apresenta um exemplo de um maciço a ser detonado e a Figura 8 a classificação geomecânica do mesmo [9].



Figura 7. Imagem do maciço rochoso a ser desmontado por explosivos [9]

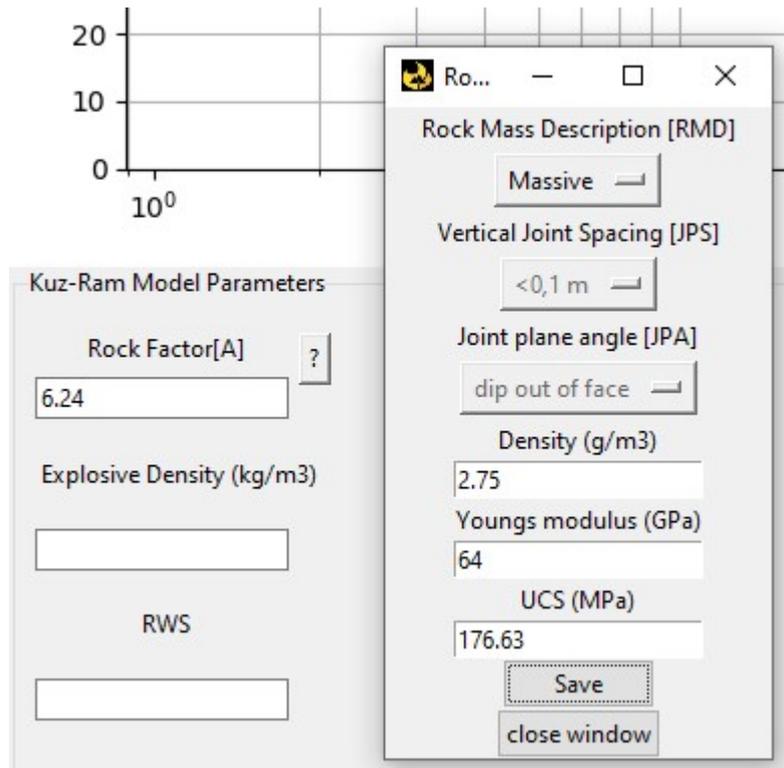


Figura 8. Classificação geomecânica do maciço e o valor obtido para Rock Factor

Características do Explosivo

Explosive Density e RWS

Destacados em vermelho na Figura 6, estes parâmetros podem ser obtidos no rótulo técnico do explosivo a ser usado. A Figura 9 ilustra a ficha técnica de um explosivo encartuchado [10].



Emulsão encartuchada com elevada resistência à água e alta potência de detonação. Apresenta-se em embalagens plásticas com tamanhos e diâmetros variados, adequando-se a diversos tipos de aplicação. Pode ser aplicada em mineração a céu aberto e subterrânea, desmontes subaquáticos e construção civil em geral.

Características técnicas:

Densidade (g/cm ³)	1,15
Velocidade de detonação (m/s)*	3.500 a 5.100
Volume gasoso a 25°C (L/kg)	800
RWS** (%)	86
RBS** (%)	122
Resistência à água	Excelente
Classe de gases	1 (não tóxico)
Pressão de detonação (kbar)	48

*A VOD real depende das condições de uso, incluindo a densidade do explosivo e o grau de confinamento. Os valores adotados referem-se a um diâmetro de teste de 51 mm não confinado.**Comparados ao ANFO padrão.

Figura 9. Características técnicas do explosivo Ibelgel® [10]

Características do plano de fogo

Angulo do Furo, Diâmetro do Furo, Desvio do Furo, Altura da Bancada, Tampão, Afastamento, Espaçamento e Subfuração

Destacados em laranja na Figura 6, estes parâmetros são definidos a fim de distribuir a energia, na forma de explosivos, necessária para fragmentar o maciço rochoso. A Figura 10 ilustra uma bancada a ser desmontada e os parâmetros do plano de fogo aplicados a ela [11].

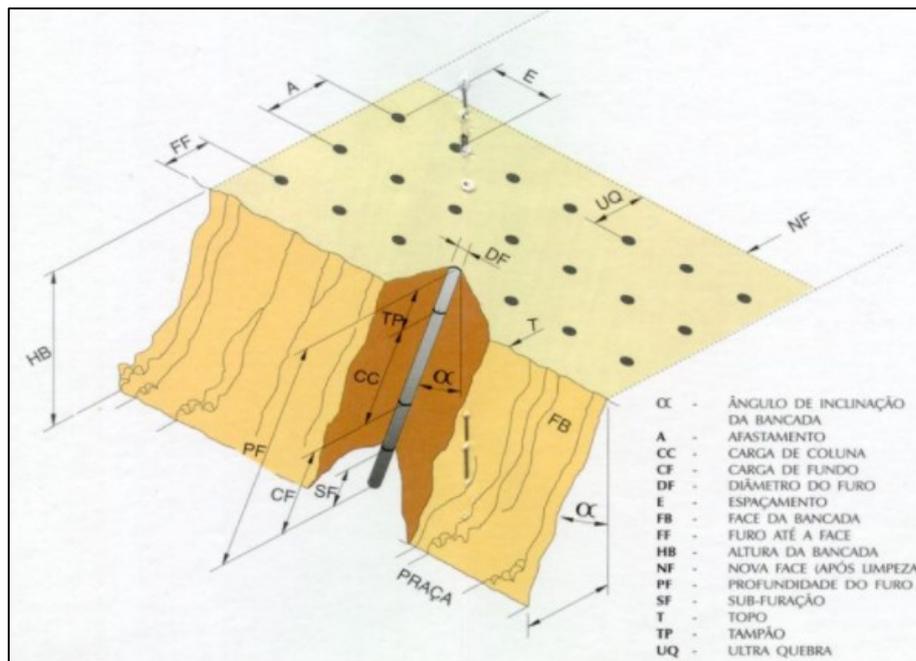


Figura 10. Parâmetros do plano de fogo [11]

A Tabela 2 apresenta todos os parâmetros de entrada usados nesse exemplo.

Tabela 2: Parâmetros necessários para simulação do exemplo numérico

Parâmetro	Valor
Rock Factor [A]	6.24
Explosive Density (kg/m³)	1150
RWS	86
Hole Angle (°)	15
Hole Diameter [D] (mm)	76.2
Hole Deviation (m)	0
Bench Height [H] (m)	6.5
Stemming [T] (m)	1
Burden [B] (m)	3.2
Spacing [S] (m)	1.6
Sub-drill [J] (m)	0

A Figura 11 mostra o resultado da simulação (curva granulométrica) com os parâmetros da Tabela 2. Outras informações da simulação são apresentadas: quantidade explosivo por

furo, razão de carga (quantidade de explosivo em quilograma por metro cúbico de rocha) e o índice de uniformidade, além dos valores numéricos das curvas granulométricas.

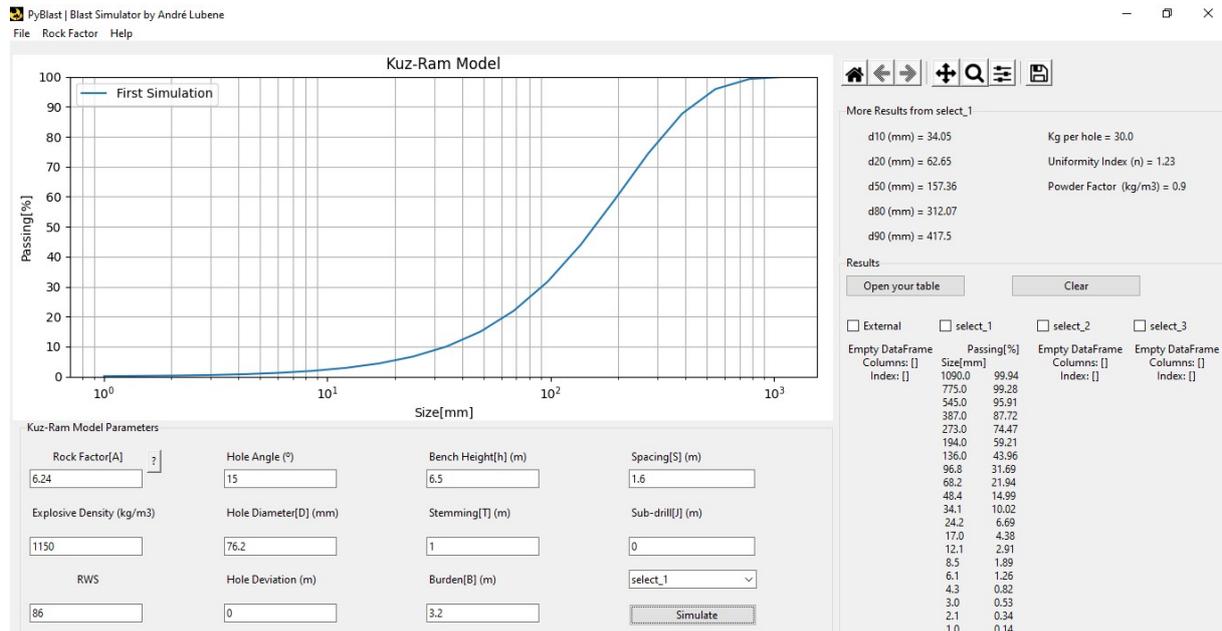


Figura 11. Tela com parâmetros de entrada e resultado da simulação no *Software* PyBlast

CONCLUSÕES

A criação do primeiro software gratuito de simulação de desmonte de rochas torna este projeto relevante, uma vez que permitirá o acesso democrático a esta ferramenta pela comunidade técnica, academia e a empreendimentos mineiros de todos os portes.

Na sua primeira versão, o *Software* PyBlast possui apenas o modelo Kuz-Ram (1983) implementado, o qual possui deficiências como: a baixa capacidade de prever fragmentos finos; não levar em consideração o efeito da temporização no desmonte.

A expectativa futura é que, esse programa seja ampliado, aperfeiçoado e aprofundado. Espera-se que essas contribuições não sejam apenas feitas pelos autores deste trabalho, mas por outros interessados em desmonte de rocha, programação e compartilhamento de conhecimento.

Os autores identificaram algumas funcionalidades que podem ser implementadas, ao programa:

- ✓ Novos modelos matemáticos;
- ✓ Cálculo de custo do desmonte;
- ✓ Previsão da onda de choque;
- ✓ Previsão de ultralanchamento;
- ✓ Relações matemáticas entre os parâmetros, segundo boas práticas de desmonte;
- ✓ Sequência de iniciação;
- ✓ Visualizador 3D do banco a ser desmontado;
- ✓ Otimizador do plano de fogo.

BIBLIOGRAFIA

1. CUNNINGHAM, C. V. (2005). The Kuz-Ram Fragmentation Model—20 Years on. European Federation of Explosive Engineers. Brighton: [s.n.].
2. OUCHTERLONY, F.; SANCHIDRIÁN, J. A. (2019). A review of development of better prediction equations for blast fragmentation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11, 1094-1109.
3. ENGIN, I. C. (2009). A practical method of bench blasting design for desired fragmentation based on digital image processing technique and Kuz-Ram model. FRAGBLAST9, 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Granada: [s.n.].
4. PYTHONBASICS. pythonbasics.org. pythonbasics. Disponível em: <<https://pythonbasics.org/7-reasons-to-learn-python/>>. Acesso em: 07 fev. 2021.
5. PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. python.org. python. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/essays/blurb/>>. Acesso em: 07 fev. 2021.
6. GNU. gnu.org. GNU Operating System. Disponível em: <<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>>. Acesso em: 31 janeiro 2021.
7. HUISTRULID, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam: Balkema: [s.n.], v. 1.
8. MORAIS, J. L. D. (2004). *Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos*. Tese de doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.
9. SOUZA, J. C. D.; SILVA, A. C. S. D.; ROCHA, S. S. (2018). ANALYSIS OF BLASTING ROCKS PREDICTION AND ROCK FRAGMENTATION RESULTS USING SPLIT-DESKTOP SOFTWARE. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, 15, Janeiro/Março, 22-30.
10. BRITANITE. Catálogo de produtos. britanite.com.br, 2019. Disponível em: <<http://www.britanite.com.br/site2019/wp-content/uploads/2019/04/produtos1.pdf>>. Acesso em: 14 Fevereiro 2021.
11. BRITANITE. Guia de utilização de explosivos. Britanite.com.br, 2019. Disponível em: <<http://www.britanite.com.br/site2019/wp-content/uploads/2019/03/Guia-de-Utilizac%CC%A7a%CC%83o-de-Explosivos-V8.pdf>>. Acesso em: 14 Fevereiro 2021.

