

Modelos de Fragmentação para Otimização de Projetos de Escavação em Rocha – Estado de Arte

R.J. Llanque Ayala

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil,
jannethllanque@gmail.com

A. Pacheco Assis

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil,
aassis@unb.br

RESUMO: A otimização de custos em projetos de escavação em rocha aponta as operações de perfuração e explosão como condicionantes dos resultados das etapas seguintes. O objetivo deste trabalho foi verificar os modelos de fragmentação existentes na literatura, as ferramentas utilizadas para a sua modelação, e compara-los fazendo uma análise descritiva para identificar os parâmetros importantes para otimização do processo. O modelo tradicional de Kuz-Ram é comparado a outras técnicas de modelação, continua sendo fácil de utilizar, mesmo tendo outros de maior exatidão que se tornam ineficientes pelos requisitos que precisam para obter o resultado. No trabalho identificaram-se 3 grupos de parâmetros influentes na modelagem, sendo 3 os de maior relevância na literatura investigada: o afastamento, fator de carga e a relação afastamento/espacamento. O afastamento considera-se muito importante inclusive quando apresentado como combinação com outros parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos de fragmentação, otimização, sensibilidade de parâmetros, Kuz-Ram, afastamento.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Processo de escavação em rocha

Conhecer os objetivos da escavação em rocha é muito importante, existem dois objetivos claramente marcados: obter espaços com planos definidos para fins diversos ou obter material com valor econômico. Ambos objetivos devem seguir um processo de escavação.

O processo de escavação em rocha é composto das operações: perfuração, explosão, carregamento e transporte, depende do sucesso de cada uma delas para alcançar a otimização em custos. (Lopez *et al.*, 1995).

1.2 Fragmentação base da otimização da explosão

A fragmentação é uma forma de controle da otimização de um projeto de detonação, não

existem métodos exatos que possam estimar de forma quantitativa a distribuição granulométrica dos fragmentos de rocha resultantes da explosão.

Nos processos de fragmentação se identificam 3 grupos de parâmetros que influenciam nos modelos de fragmentação. A Figura 1 representa os três grupos de parâmetros, um primeiro grupo com as características dos maciços rochosos, essas propriedades são inalteráveis. No segundo grupo, as propriedades dos explosivos, é possível a escolha do tipo de explosivo segundo as necessidades do projeto. No terceiro consideram-se os parâmetros geométricos do plano de fogo, os parâmetros que são facilmente alteráveis.

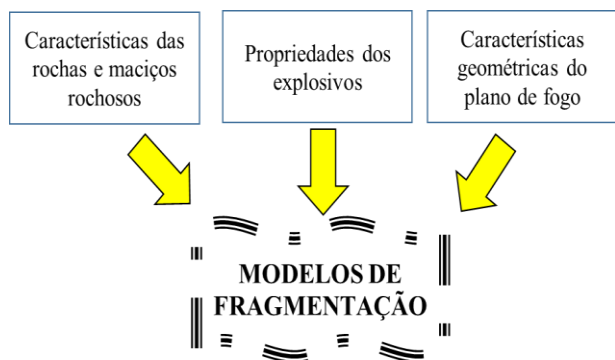


Figura 1. Grupos de parâmetros que influenciam diretamente nos modelos de fragmentação.

2 MODELOS E FORMULAS DE FRAGMENTAÇÃO

2.1 Parâmetros de influência nos modelos

O tamanho médio do fragmento e a distribuição granulométrica da pilha formada após o processo de explosão geralmente é medido através de peneiras e métodos digitais.

Na predição da fragmentação é necessário identificar e controlar aqueles fatores alteráveis que influenciam diretamente no processo de explosão e condicionam o tamanho médio do grão e distribuição granulométrica da pilha, para evitar o processo de segunda fragmentação.

Para alcançar esse objetivo, evidenciaram-se a existência de modelos na literatura, desde fórmulas matemáticas até modelos de simulação complexos.

2.2 Fórmulas empíricas

Existem fórmulas empíricas que determinam uma aproximação do tamanho médio do material da explosão. Citam-se algumas:

A equação de Larsson (Lopez *et al.* 1995):

$$K_{50} = s * e^{(0,58 \ln B - 0,143 \ln \left(\frac{S}{B}\right) - 1,18 \ln \left(\frac{CE}{c}\right) - 0,82)} \quad (1)$$

Sendo, s = constante de fragmentabilidade; B = afastamento (m); S/B = relação espaçamento/afastamento; CE = carga específica (kg/m^3); e c = constante da rocha (equivalente à carga específica do explosivo gelatinoso dinamite necessário para fragmentar a rocha).

A equação de SVEDEFO (*Swedish Detonic Research Foundation*) adiciona novos parâmetros respeito da equação de Larsson (Lopez *et al.* 1995), ela é:

$$K_{50} = s * \left[1 + 4,67 * \left(\frac{T}{L} \right)^{2,5} \right] * e^{\left(0,29 \ln B^2 \sqrt{\left(\frac{S}{1,25} \right)} - 1,18 \ln \left(\frac{CE}{c} \right)^{-0,82} \right)} \quad (2)$$

Sendo, B = afastamento (m); S = espaçamento (m); CE = carga específica (kg/m^3); c = constante da rocha; s = constante de fragmentabilidade; T = comprimento do tamponamento (m); e L = comprimento do furo (m).

A equação de Kuznetsov (Kuznetsov *apud* Moraes, 2004) também empírica é dada por:

$$X_{50} = A * (K)^{-0,80} * Q_o^{0,167} * \left[\frac{115}{Er} \right]^{0,633} \quad (3)$$

Sendo, A = fator de rocha; K = razão de carga (kg/m^3); Q_o = massa do explosivo utilizado (kg); Er = representa a energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (ANFO-100).

A fórmula de Dnis da Gama (Lopez *et al.*, 1995) considera seguinte expressão:

$$PC = a * W^b * \left[\frac{T_b}{B} \right]^c \quad (4)$$

Sendo, PC = porcentagem acumulado de material menor do que a fração do tamanho T_b ; W = energia necessária para a fragmentação da rocha (kWh/t).

$$W = 10 * \frac{W_i}{\sqrt{K_{80}}} \quad (5)$$

W_i = índice de Bond da rocha; K_{80} = tamanho (peneira) para a qual passa 80% do material; B = tamanho do bloco; a , b , e c = constantes que dependem das características das rochas e do explosivo.

2.3 Modelos de fragmentação

O modelo de maior uso devido a sua simplicidade e facilidade de cálculo é o modelo Kuz-Ram, proposto por Cunningham. Este modelo tem como base a equação de Kuznetsov, para a determinação do tamanho

médio do fragmento e a equação de Rosin-Rammler para a determinação da curva granulométrica.

Foram identificados diferentes tipos de modelos: algoritmos genéticos, modelos estatísticos, modelos computacionais entre outros, tentando fornecer uma alternativa de dimensionamento capaz de otimizar os resultados fornecidos pelo modelo Kuz-Ram.

3 PREDIÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO NA LITERATURA

3.1 O uso de Redes Neurais e Algoritmos Genéticos

As redes neurais e os algoritmos genéticos são ferramentas que necessitam de uma base de dados de grande tamanho, mas os resultados fornecidos apresentam grande confiabilidade.

Assim, Monjezi e Dehghani (2008) avaliaram o *backbreak* ou quebre ultimo mediante o algoritmo BPNN, sendo 7 parâmetros de entrada os escolhidos para o teste, mediante uma análise de sensibilidade foram identificados 5 parâmetros como importantes no modelo. Foi evidenciado em campo que reduzindo a relação tampão/afastamento de 1,2 a 0,8, o *backbreak* é reduzido de 20 a 4 m, assim, pode-se identificar este parâmetro como importante no modelo identificado.

Um ano depois, Monjezi, *et al.* (2009) usaram a análise de regressão e compararam a um sistema de inferência Fuzzy (FIS), utilizaram 8 parâmetros e após a comparação entre os dois modelos identificou o FIS com R^2 igual a 0,96 é considerado o modelo que melhor se assemelha à realidade (de resultados) em comparação ao modelo de regressão linear com R^2 igual a 0,80.

Kulatilake, *et al.* (2012) avaliaram a base de dados apresentado por Hudaverki (2012) utilizando redes neurais e fizeram uma comparação com regressão multivariada, ambos modelos são apropriados, mas recomendaram as vantagens dos modelos das redes neurais.

Karami e Afiuni-Zadeh (2013) compararam os resultados da predição da fragmentação comparando dois modelos, o ANFIS, um algoritmo de rede neural Fuzzy adaptado e o RBF uma rede neural função base radial. Os

autores verificaram que o ANFIS é um método simples com menos parâmetros (2) e fornece resultados satisfatórios em comparação ao modelo RBF que utiliza sete (7) parâmetros para fornecer resultados semelhantes ao primeiro.

Sayadi, *et al.* (2013) modelaram dois processos: a fragmentação e o *backbreak*. Comparando 2 tipos de redes neurais, a BPNN rede neural de retroalimentação e a RBFNN função base radial e finalmente comparadas ambas com um modelo de regressão multivariada, a BPNN forneceu melhores resultados, alcançando a identificar os parâmetros de maior influência: o tampão (T) no modelo *backbreak* e o afastamento (B) no modelo de fragmentação.

Esmaeili *et al.* (2015) verificaram os parâmetros de explosão através de dois modelos: Vetor de suporte (SVR) e o sistema de inferência neuro-fuzzy (ANFIS) e ambos foram comparados aos resultados fornecidos pelo modelo clássico Kuz-Ram. Foram testados 6 parâmetros em ambos modelos e utilizando o método estatístico de análise das componentes principais (PCA) foi possível determinar que a combinação de 3 elementos: relação espaçamento/afastamento, índice de explosão e carga específica do explosivo são efetivos no processo. O ANFIS apresentou menor probabilidade de erros.

3.2 Outras ferramentas de modelação

Outras técnicas utilizadas para estimar a fragmentação são investigadas. Assim, Chakraborty *et al.* (2004) determinaram o tamanho médio do fragmento mediante análise digital de imagem da pilha obtida em três minas categorizando o RQD dos maciços rochosos. O tamanho dos fragmentos tende a incrementar com o incremento do RQD e os parâmetros do plano de fogo segundo as características dos maciços rochosos. Mediante uma análise de regressão linear foram identificados a densidade do explosivo e a relação espaçamento/afastamento como parâmetros importantes.

Latham, *et al.* (2006) compararam 4 modelos de aproximação para enrocamentos: o modelo Kuz-Ram; modelo Bond-Ram; modelo EBT;

modelo Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony (KCO). O KCO apresentou os melhores resultados para enrocamentos, devido a que este modelo alcança desenhar os finos (materiais com diâmetro menores a 50 mm). É válida esta conclusão porque atende os objetivos do estudo.

Morin e Ficarazzo, (2006) utilizaram a simulação de Monte Carlo como ferramenta para simular o modelo Kuz-Ram e otimizar os dados de um projeto de explosão. Identifica a combinação de um afastamento e um espaçamento como críticos no modelo além do fator de carga.

Gheibie, *et al.* (2009) apresentaram uma modificação do modelo clássico de Kuz-Ram, são levados em consideração as aberturas das descontinuidades e o preenchimento delas no maciço rochoso através de um coeficiente 0,073 que substitui o 0,06, sendo que esses aspectos não são considerados no modelo original de Kuz-Ram. Assim também substitui com a função de Swebrec no lugar da função de Rosin-Rammler para melhor adequação de fino na curva granulométrica. Mas o novo modelo não considera efeitos temporais da explosão nem limites superiores na distribuição assim como o modelo Kuz-Ram.

Shim, *et al.* (2009) utilizaram a técnica do indicador sequencial de simulação (SIS) para modelar 4 tipos de resultados de explosões e representar neles o fator de rocha em uma distribuição espacial 3-D. A análise está em relação aos custos de produção, identificando $0,03 \text{ m}^3$ como ícone de comparação entre custos altos para volumes menores em fragmentação primária e custos baixos para volumes superiores para fragmentação secundária. O parâmetro que varia para a modelação é a carga específica dos explosivos.

Hudaverdi, *et al.* (2012) avaliaram o modelo de fragmentação e a fórmula do índice de fragmentação, reuniram em uma base de dados muitos casos de projetos de explosões no mundo e reportados na literatura. Mediante uma análise multivariada é desenvolvido um modelo de predição de fragmentação. São considerados 7 parâmetros, ordenados segundo a intensidade de fragmentação em 3 grupos, baixa, média e alta fragmentação. Foi comparado o resultado obtido da análise multivariada com o obtido do método tradicional de Kuznetsov. Demonstrou-se

mínimos erros na comparação dos valores reais obtidos em campo e os dois modelos, Kuznetsov e Análise Multivariada.

Díaz-martínez, *et al.* (2012) utilizaram a programação estruturada, consiste em elaborar e analisar um algoritmo em função do diâmetro do furo, inclinação da perfuração, densidade do explosivo, resistência à compressão e calcula os parâmetros geométricos do plano de fogo, avalia os resultados frente aos manuais, argumenta que esses parâmetros são importantes para a otimização do processo de explosão, mas não apresenta dados quantitativos de validação do método.

Sanchidrián, *et al.* (2012) analisaram 10 funções: Weibull, Swebrec, Gilvarry, Gradyntre e as variações deles. Modelou 448 casos de dados obtidos em diferentes lugares e diferentes tipos de material, foi feito um ajuste estatístico demonstrando que a função Swedrec representa um ajuste confiável em comparação às outras funções.

Shi, *et al.* (2012) utilizaram o modelo de regressão vector de suporte (SVR) para calcular o tamanho médio do fragmento de uma explosão e os resultados foram comparados a uma rede neural (ANN), a um modelo de regressão multivariada (MVRA), à equação convencional de Kuznetsov e aos valores mensurados. Os resultados obtidos indicam que o SVR com R^2 igual a 0,962 é o mais confiável em relação aos outros.

Faramarzi, *et al.* (2013) apresentaram um modelo denominado “Sistema de Engenharia de Rochas” (RES) e compara os resultados com os obtidos do Kuz-Ram e cinco modelos estatísticos, alcançando um R^2 de 0,65 e RMSE de 14,51, o modelo RES está composto de três passos; 1º passo: identificar os parâmetros responsáveis da fragmentação crítica, 2º passo: determinar a vulnerabilidade, o nível de risco da fragmentação. 3º passo: determinar a relação entre a granulometria da pilha e o índice de vulnerabilidade, valores altos têm fragmentação pobre e vice-versa. Este modelo trabalha com a elaboração de uma matriz de interação, ela ajuda na avaliação de pesos dos parâmetros. O modelo trabalha com 16 parâmetros sem identificar os mais importantes.

Akbari, *et al.* (2015) avaliaram 51 blocos de detonação, de três minas de ferro. Compararam

os resultados de fragmentação das três minas e entre 10 parâmetros sensíveis, identificaram a carga específica, perfuração, afastamento, e a inclinação do ângulo do talude os parâmetros de influência na estimação do tamanho da partícula da pilha. Utilizaram-se modelos de regressão linear e validaram-se o modelo mediante um método de imagens.

Bakhtavar, *et al.* (2015) identificaram 49 parâmetros como influentes nos modelos de fragmentação categorizados em controláveis e incontroláveis, testaram 10 parâmetros nos modelos de regressão, Kuz-Ram, Kuz-Ram modificado e validaram com as medidas em campo e análise por imagens, os modelos de regressão têm melhor aproximação aos reais, no entanto os modelos Kuz-Ram o sobredimensionam. Dos parâmetros simulados são 7 os controláveis e 3 os incontroláveis.

4 PARÂMETROS OBTIDOS DOS MODELOS SIMULADOS

4.1 Identificação de referências dos cenários

Primeiramente é assignado a cada caso um número, cada número representa um cenário, ferramenta utilizada, autor e alvo do trabalho (Tabela 1). Alguns autores além de calcular a o tamanho médio do fragmento estudaram também o *breakback*.

Tabela 1. Identificação de número de caso por autor.

No.	cenário	ferramenta	autor	alvo
1	mina	ANFIS/SVR	Esmaili, et al.	FR
2	mina	ANFIS/RBF	Karami, et al.	FR
3	mina	BPNN	Kulatilake, et al.	FR
4	mina	BPNN	Monjenzi, 2008	BB
5	mina	FUZZY	Monjenzi, 2009	FR
6	mina	BPNN	Sayadi, et al.	BB/FR
7	mina	Regressão linear	Akbari, et al.	FR
8	mina	Regressão linear	Bakhtavar, et al.	FR
9	mina	Regressão linear	Charaborty, et al.	FR
10	mina	Programação estruturada	Diaz-Martínez, et al.	FR
11	mina	RES	Faramarzi, et al.	FR
12	mina	Algoritmos simples	Gheibie, et al.	FR
13	mina	Análise Multivariada	Hudaverdi, et al.	FR
14	pedreira	KCO/Swedrec	Latham, et al.	FR
15	mina	Monte-Carlo	Morin, et al.	FR
16	mina	Ajustes funções	Sanchidrián, et al.	FR
17	mina	SIS - 3D	Shim, et al.	FR
18	mina	SVR	Shi, et al.	FR

FR = fragmentação

BB = *breakback*

4.2 Parâmetros da geometria do plano de fogo

Identificaram-se 9 parâmetros característicos da geometria do plano de fogo apresentados na Tabela 2. Estes parâmetros são considerados alteráveis.

Tabela 2. Identificação parâmetros característicos da geometria do plano de fogo.

No.	Parâmetros característicos								
	Geometria plano de fogo								
	B	S	T	H	H _f	D	N	INCL	DEV
1			X			X			
2	X						X		
4	X						X		
5	X	X	X		X				
6	X	X	X		X				
7	X	X							
8			X		X	X	X		
10						X		X	
11	X					X	X	X	X
14	X	X		X			X		
15	X	X		X	X	X			
17	X	X		X	X	X			
18								X	

X = parâmetro utilizado no modelo

X = parâmetro considerado importante no modelo

Sendo; B = afastamento; S = espaçamento; T = tampão; H = altura bancada; H_f = profundidade do furo; D = diâmetro do furo; N = número de linhas de furos; INCL = inclinação dos furos; DEV = desvio do furo.

4.3 Parâmetros característicos do explosivo

Na Tabela 3 apresentam-se 7 parâmetros característicos dos explosivos.

Os parâmetros da Tabela 3 estão resumidos em: PF = fator de carga (g/ton); SC = carga específica (kg/m³); SD = perfuração específica (m/m³); MC = carga máxima instantânea (kg); BI = índice de explosão; CpD = carga por atraso (kg/ms); DLY = tempo de atraso (ms).

Tabela 3. Identificação parâmetros característicos do explosivo.

No.	Parâmetros característicos						
	Explosivo						
	PF	SC	SD	MC	BI	CpD	DLY
1		X			X		X
2	X						
3	X						
4	X					X	
5	X		X			X	
6		X	X				
7		X	X				
8		X			X		X
10		X					
11	X			X	X		X
13	X						
14	X	X		X			
15	X			X			
17		X	X				
18	X						

X = parâmetro utilizado no modelo

X = parâmetro considerado importante no modelo

4.4 Parâmetros característicos do maciço rochoso

Na Tabela 4 foram identificados 7 parâmetros característicos do maciço rochoso.

Tabela 4. Identificação parâmetros característicos do maciço.

No.	Parâmetros característicos						
	Rocha e maciço rochoso						
	De	UCS	E	RQD	DIP	DIP/DIR	eDIP
2		X					
3			X				
5	X						
7		X		X		X	X
8		X	X				
9	X	X	X	X			
10		X					
12		X	X				
13			X				
15		X	X		X	X	X
18			X				

X = parâmetro utilizado no modelo

X = parâmetro considerado importante no modelo

Sendo: De = densidade da rocha (g/cm^3); UCS = resistência à compressão (GPa); E = módulo de elasticidade (GPa); RQD = qualidade da rocha; DIP = mergulho da descontinuidade ($^\circ$); DIP/DIR = orientação do mergulho da descontinuidade ($^\circ$); eDIP = espaçamento da descontinuidade (cm).

4.5 Parâmetros de combinações utilizadas no modelo

Na Tabela 5 identificam-se 6 combinações.

Tabela 5. Combinações de parâmetros.

No.	Combinações utilizadas no modelo					
	S/B	S _T /B	H/B	J/B	B/D	C/SC
1	X					
2		X				X
3	X	X	X		X	
4	X	X				X
8	X					
9	X		X		X	
11	X	X	X	X	X	
13	X	X	X		X	
14	X					
18	X	X	X		X	

X = parâmetro utilizado no modelo

X = parâmetro considerado importante no modelo

Sendo: S/B = relação espaçamento/afastamento; S_T/B = relação de comprimento do tampão/afastamento; H/B = relação altura de bancada/afastamento; J/B = relação de subperfuração/afastamento; B/D = relação afastamento/diâmetro do furo; C/SD = relação última linha/carga total.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Identificação de parâmetros importantes

Na Tabela 6 apresenta-se os parâmetros selecionados de frequência superior a 5. Contando-se um total de 13 entre parâmetros e suas combinações.

Tabela 6. Seleção de parâmetros importantes.

No.	Parâmetros importantes												
	B	S	H _f	D	N	PF	SC	UCS	E	S/B	S _T /B	H/B	B/D
1				X			X			X			
2	X				X	X		X			X		
3						X			X	X	X	X	X
4	X				X	X				X	X		
5	X	X	X			X							
6	X	X	X				X						
7	X	X					X	X					
8			X	X	X		X	X	X	X			
9								X	X	X		X	X
10				X			X	X					
11	X			X	X	X				X	X	X	X
12								X	X				
13						X			X	X	X	X	X
14	X	X			X	X	X			X			
15	X	X	X	X		X		X	X				
16													
17	X	X	X	X			X						
18						X			X	X	X	X	X
#	9	6	5	6	5	9	7	7	7	9	6	5	5

X = parâmetro utilizado no modelo

X = parâmetro considerado importante pelo autor no modelo

Com os dados obtidos da Tabela 6 foi elaborado um gráfico com os parâmetros mais importantes selecionados e os indicados pelos autores.

Na Tabela 2 observa-se o gráfico com estes parâmetros. Sendo: p = parâmetros importantes identificados no presente trabalho e r = parâmetros importantes identificados pelos autores.

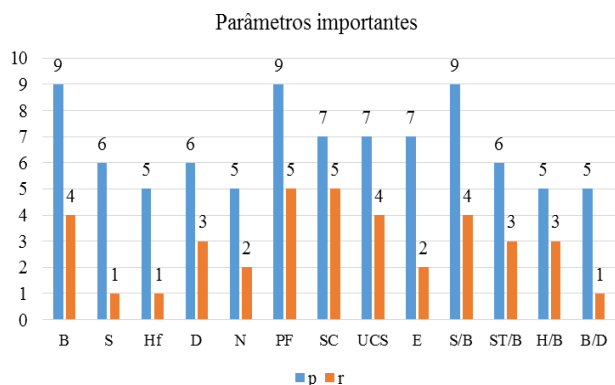


Figura 2. Identificação parâmetros importantes no trabalho e pelos autores.

Organizando a Tabela 6 e Figura 2 foi elaborada a Tabela 7 agrupando os parâmetros em 3 categorias. Na Tabela 7 para identificam-se os grupos.

Tabela 7. Identificação parâmetros importantes.

No.	Parâmetros importantes		(%)	(%) média
G-I	B	p	50%	36%
		r	22%	
	PF	p	50%	39%
		r	28%	
G-II	S/B	p	50%	36%
		r	22%	
	D	p	33%	25%
		r	17%	
	SC	p	39%	33%
		r	28%	
	UCS	p	39%	31%
		r	22%	
	E	p	39%	25%
		r	11%	
	S _T /B	p	33%	25%
		r	17%	
G-III	H _f	p	28%	17%
		r	6%	
	N	p	28%	19%
		r	11%	
	H/B	p	28%	22%
		r	17%	
	B/D	p	28%	17%
		r	6%	

p = presente nos modelos

r = definido pelos autores como importante

O Grupo I conformado por 3 parâmetros considerados muito relevantes: o fator de carga PF (50%); o afastamento B (50%) e a relação espaçamento/afastamento S/B (50%) e considerado importante nos modelos em média de 24%.

O Grupo II conformado por 5 parâmetros: diâmetro do furo (33%); carga específica (39%); resistência à compressão da rocha (39%); módulo de deformabilidade (39%); relação tampão/afastamento (33%); considerado relevante para os autores em uma média de 38%.

O Grupo III conformado por 4 parâmetros: a profundidades do furo (28%); número de furos (28%); relação altura de bancada/afastamento (28%); relação afastamento/diâmetro (28%).

5.2 Considerações finais

Feita a quantificação dos modelos e análise respectiva, pode-se concluir que:

- A maioria dos trabalhos utilizaram redes neurais para a modelagem, esta técnica

necessita de uma ampla base de dados, mas resultados que fornecem são muito próximos dos reais.

- Verifica-se o uso do modelo Kuz-Ram na maioria dos trabalhos, sendo a natureza deles a mineração, os resultados obtidos com diferentes métodos e ferramentas fornecem resultados satisfatórios. Mas quando o alvo do projeto muda para ter um maior controle na distribuição granulométrica dos fragmentos é necessário fazer ajustes no modelo clássico, alguns autores substituem a função de Rosin-Rammler pela função de Swedrec para obter maior informação dos fragmentos finos.

- Identificam-se 13 parâmetros considerados importantes no processo de explosão, pela importância foram agrupados em 3.

- Identificam-se principalmente 3 parâmetros muito influentes: o afastamento, a relação espaçamento/afastamento e o fator de carga que também é considerado importante, mas ele está condicionado ao tipo de explosivo e a característica da rocha.

- O parâmetro afastamento (B) evidentemente é considerado na bibliografia como muito importante tanto só quanto em combinação com outros parâmetros geométricos é um parâmetro que pode ser alterado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbari, M., Lashkaripour, G., Yarhamdi Bafghi, A., e Ghafoori, M. (2015). Blastability evaluation for rock mass fragmentation in Iran central iron ore mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 59–66.
- Bakhtavar, E., Khoshrou, H., e Badroddin, M. (2015). Using dimensional-regression analysis to predict the mean particle size of fragmentation by blasting at the Sungun copper mine. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4), 2111–2120.
- Chakraborty, a. K., Raina, a. K., Ramulu, M., Choudhury, P. B., Haldar, a., Sahu, P., e Bandopadhyay, C. (2004). Parametric study to develop guidelines for blast fragmentation improvement in jointed and massive formations. *Engineering Geology*, 73(1-2), 105–116.
- Díaz-martínez, J. C., Guarín-aragón, M. A., e Jiménez-builes, J. A. (2012). Voladuras En Minería De Superficie Empleando El Analysis and Design of Drilling and Blasting Operation on Open Pit Mining Using Focus on Structured Programming, 15–22.
- Esmaeili, M., Salimi, A., Drebenstedt, C., Abbaszadeh, M., e Aghajani Bazzazi, A. (2015). Application of PCA, SVR, and ANFIS for modeling of rock fragmentation. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 6881–6893.
- Faramarzi, F., Mansouri, H., e Ebrahimi Farsangi, M. a. (2013). A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 82–94.
- Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S. H., e Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz-Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967–973.
- Hudaverdi, T., Kuzu, C., e Fisne, a. (2012). Investigation of the blast fragmentation using the mean fragment size and fragmentation index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 136–145.
- Kulatilake, P. H. S. W., Qiong, W., Hudaverdi, T., e Kuzu, C. (2010). Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks. *Engineering Geology*, 114(3-4), 298–311.
- Latham, J. P., Van Meulen, J., e Dupray, S. (2006). Prediction of fragmentation and yield curves with reference to armourstone production. *Engineering Geology*, 87(1-2), 60–74.
- Monjezi, M., e Dehghani, H. (2008). Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(8), 1446–1453.
- Monjezi, M., Rezaei, M., e Yazdian Varjani, a. (2009). Prediction of rock fragmentation due to blasting in Gol-E-Gohar iron mine using fuzzy logic. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1273–1280.
- Morin, M. a., e Ficarazzo, F. (2006). Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz-Ram model. *Computers and Geosciences*, 32(3), 352–359.
- Sanchidrián, J. a., Ouchterlony, F., Moser, P., Segarra, P., e López, L. M. (2012). Performance of some distributions to describe rock fragmentation data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 53, 18–31.
- Sayadi, a., Monjezi, M., Talebi, N., e Khandelwal, M. (2013). A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(4), 318–324.
- Shi, X. Z., Zhou, J., Wu, B. B., Huang, D., e Wei, W. (2012). Support vector machines approach to mean particle size of rock fragmentation due to bench blasting prediction. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(2), 432–441.
- Shim, H. J., Ryu, D. W., Chung, S. K., Synn, J. H., e Song, J. J. (2009). Optimized blasting design for large-scale quarrying based on a 3-D spatial distribution of rock factor. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(2), 326–332.