

DANIEL MORIMOTO

**Comparativo dos resultados teóricos entre as equações de
Rustan, Konya e Jimeno para o dimensionamento de um plano de
fogo**

São Paulo
2017

DANIEL MORIMOTO

**Comparativo dos resultados teóricos entre as equações de
Rustan, Konya e Jimeno para o dimensionamento do plano de fogo**

Trabalho de formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Engenheiro de Minas

Orientador: Prof. Dr. Wilson Siguemasa
Iramina

São Paulo

2017

TF-2017

M825c

Sysno 2880945

H2017h

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010037

Catalogação-na-publicação

Morimoto, Daniel

Comparativo dos resultados teóricos entre as equações de Rustan, Konya e Jimeno para o dimensionamento de um plano de fogo / D. Morimoto -- São Paulo, 2017.

33 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Desmonte de rochas 2. Pedreiras I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

DANIEL MORIMOTO

**Comparativo dos resultados teóricos entre as equações de
Rustan, Konya e Jimeno para o dimensionamento do plano de fogo**

Trabalho de formatura apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Engenheiro de Minas

Área de Concentração:
Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Wilson Siguemasa
Iramina

São Paulo

2017

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por se sacrificarem para me dar uma educação de qualidade que me permitiu entrar e me formar na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, muito obrigado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Wilson Siguemasa Iramina que me guiou na realização deste trabalho.

Aos professores da Escola Politécnica, em especial do Departamento de Minas e Petróleo, que me ensinaram tudo o que sei sobre engenharia e me tornaram um profissional competente.

Aos amigos que fiz no curso de engenharia de minas, no time de beisebol da POLI-USP e a todos com os quais eu cultivei a amizade durante essa jornada, sem vocês o caminho teria sido mais penoso e bem menos divertido, muito obrigado.

“The secret of getting ahead is getting started.”

Mark Twain

Resumo

Este trabalho de formatura do curso de engenharia de minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo estudou os resultados teóricos de um plano de fogo através de diferentes formas de cálculo do afastamento. Para isso se determinou quais fórmulas de afastamento seriam usadas, sendo escolhidas as equações de Rustan, Konya e Jimeno. O segundo passo foi definir a forma de cálculo dos outros parâmetros e como seria feita a análise dos resultados, sendo escolhido o tamanho médio de partícula, como principal parâmetro de comparação, e a razão de carga, como segundo parâmetro. A terceira etapa foi se definir os parâmetros de rocha e quais explosivos seriam usados, sendo selecionada uma emulsão encartuchada da Orica, esses parâmetros foram estipulados a partir de desmontes reais realizados na pedreira. Em seguida se realizou os cálculos com os padrões definidos e se montou uma matriz para análise de resultados, contendo o explosivo, as equações escolhidas e os desmontes reais. Ao se analisar os resultados se concluiu que as equações de Rustan e Konya se mostraram opostas, parecendo-se que uma favoreceu a razão de carga e a outra o tamanho médio da partícula, e a equação de Jimeno apresentou resultados teóricos piores que a equação de Konya por utilizar uma razão de carga ligeiramente menor que a simulação utilizando Konya, mas apresentando um tamanho de partícula significativamente maior. Ao se comparar com o desmonte real, os resultados da equação de Konya se mostraram alinhados com os do desmonte real, contudo ambos se mostravam distantes dado que a razão de carga do desmonte real era o dobro da maior razão de carga da simulação e o seu tamanho médio de partícula era bem menor que o menor tamanho médio de partícula da simulação.

Palavras-chave: desmonte; afastamento; resultados teóricos; razão de carga.

Abstract

This final project of the course of mining engineering from Escola Politécnica of Universidade de São Paulo studied the theoretical results of a blasting design using different ways to calculate the burden, for this it was defined how the burden would be calculate and chosen the Rustan, Konya and Jimeno's equations. The second step was to defined how to calculate the others parameters and analyze the results, for this it was used the medium size of the particle as the main comparison parameter and the powder factor as the second parameter. The third step was to define the rock properties and which explosive would be used, it was chosen an emulsion from Orica, and those parameters came from real cases of a quarry. Later it was made all the calculous with the explosives and rock properties and it was made a matrix to analyze the results of the simulation and the real cases. When the results was analyzed, it was concluded that the Konya's and Rustan's equations are the opposite, in other words, looks like that one of them preferred the powder factor and the other the medium size of the particle. And the Jimeno's equation give worst theoretical results than the Konya's for using a little less powder factor and looks like that as a consequence the medium size of the particle was significantly bigger. When compared with the real cases the Konya's equation had the most similar results, but even if it was similar it wasn't the same, because the powder factor of the real cases was the double of the biggest powder factor in the simulation and the medium size of the particle it was smaller than the smallest medium size of the particle in the simulation.

Key words: blasting; burden; theoretical results; powder factor.

Lista de Símbolos

A – fator de rocha

B – afastamento

d – diâmetro do furo

F – fator de correção baseado no tipo de rocha e de explosivo

H – altura da bancada

J – comprimento da sobre furação

L – comprimento do furo

I_c – comprimento da carga de coluna

I_f – comprimento da carga de fundo

PF – razão de carga

Q_e – massa de explosivo

RWS – energia relativa em massa do explosivo comparado ao ANFO

S – espaçamento

T – comprimento do tampão

V_C – velocidade da onda longitudinal

V_D – velocidade de detonação do explosivo

V_R – volume de rocha desmontada por furo

X₅₀ – tamanho médio da partícula

ρ_e – densidade/gravidade específica do explosivo

ρ_r – densidade/gravidade específica da rocha

Lista de Tabelas

Tabela 1: Matriz de comparação de fórmulas para o cálculo do afastamento	14
Tabela 2: Parâmetros de desmontes reais realizados na pedreira	21
Tabela 3: Características do maciço rochoso esperado.....	24
Tabela 4: Relatório técnico dos explosivos.	25
Tabela 5: Parâmetros do plano de fogo utilizados na simulação.	27
Tabela 6: Dados do desmonte real.	28
Tabela 7: Simulação utilizando-se a Equação de Rustan	28
Tabela 8: Simulação utilizando-se a Equação de Konya.	29
Tabela 9: Simulação utilizando-se a Equação de Jimeno.	29
Tabela 10: Matriz de comparação da razão de carga e do tamanho médio da partícula.	
.....	30

Sumário

1. Introdução	11
2. Objetivo	12
3. Revisão da literatura	13
3.1. Mecanismos de faturamento da rocha.....	14
3.2. Cálculo dos parâmetros do plano de fogo	17
3.3. Características do maciço rochoso e do explosivo	21
4. Metodologia.....	22
5. Desenvolvimento.....	24
6. Resultados	28
7. Discussão dos resultados	30
8. Conclusão	32

1. Introdução

O desmonte é uma operação que requer cuidado, pois ele influência diretamente na produção da mina. Um desmonte apropriado cominui o material de maneira adequada, sem gerar um excesso de finos ou fragmentos grandes demais. Isso é de interesse da mina, porque caso o material fragmentado esteja muito grande significa que no beneficiamento, mais especificamente na britagem e moagem, se gastará mais energia e consequentemente ocorrerá um aumento nos custos operacionais da mina, além de em alguns casos ser necessário a realização de fogacho. Enquanto que um material muito fino pode significar a perda do mesmo, ou seja, será necessário se desmontar e processar mais material para se atingir a mesma produção, isso também gera o aumento dos custos operacionais. Logo, a empresa sempre deve procurar implementar o conceito de *mine to mill* que, de acordo com Hustrulid (1999), é entender como a mudança de parâmetros pode alterar a produtividade e produção, além de entender os parâmetros de operação na lavra e na cominuição que podem ser alterados para diminuir os custos de operação. Essas alterações na operação de desmonte de rochas podem ser realizadas através do dimensionamento de diversos planos de fogo, mas além de se realizar o dimensionamento deve-se saber os resultados que serão obtidos através desses dimensionamentos, resultados esses que podem ser atingidos de forma teórica.

2. Objetivo

Esse trabalho de formatura do curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo tem como objetivo o estudo de três equações teóricas para o dimensionamento de um plano de fogo em uma pedreira determinada a partir dos dados de desmonte da mesma.

3. Revisão da literatura

Nesta etapa será realizado a revisão da literatura que servirá de base para a obtenção de resultados e discussões geradas neste trabalho.

Para se iniciar a revisão da literatura, irá se começar com a definição da operação tratada neste trabalho de formatura. Segundo Iramina (2016), o desmonte de rocha tem como objetivo fragmentar a rocha permitindo o seu transporte e alimentação das operações de beneficiamento subsequentes. Este mesmo autor define que o plano de fogo, que é o que se propõem calcular neste trabalho, é o projeto da malha de perfurações e de explosivos utilizados para fragmentar a rocha em frentes de desmonte.

Agora de acordo com Persson (1994), o afastamento (B) é a espessura da rocha entre o furo e a face livre paralela ao mesmo, ou seja, a espessura da rocha a ser removida. Jimeno (1995), define o afastamento como a dimensão mais crítica de um plano de fogo. Esse mesmo autor também fala que caso o afastamento seja pequeno, os gases gerados vão escapar e se expandir em alta velocidade contra a face livre, isso irá ocasionar ultra lançamentos, além de gerar a sobre pressão atmosférica e o aumento do ruído. Para grandes afastamentos, os gases gerados na detonação vão encontrar resistência para gerar fraturas e como consequência parte da energia se torna sísmica, aumentando as vibrações.

Jimeno (1995) também define o espaçamento (S) como a distância entre dois furos consecutivos de uma mesma linha. Ele cita que pequenos espaçamentos geram excesso de fraturamento entre as cargas, além de gerar matacos e repés. Já o espaçamento grande irá ocasionar o fraturamento inadequado entre as cargas, além de também gerar problemas de repé.

Após a definição, percebe-se que o cálculo do afastamento pode afetar diretamente o desempenho do desmonte, contudo deve-se ter em mente que a forma de se calcular esse parâmetro é bastante heterogênea, porque as equações feitas para dimensionar esse parâmetro são geradas empiricamente após vários desmontes testes. Além disso, cada autor achou uma fórmula que considerou mais adequada

para se encaixar nos resultados obtidos, isso fez com que cada fórmula considerasse diferentes variáveis. Isto pode ser verificado na Tabela 1, a seguir, retirada do Jimeno (1995) e que mostra diversas fórmulas de diferentes autores para o cálculo do afastamento e as variáveis que elas levam em conta.

Tabela 1: Matriz de comparação de fórmulas para o cálculo do afastamento.

	Andersen	Frenkel	Pearse	Hino	Allsman	Ash	Langefors	Hansen	Ucar	Konya	Foldesi	Prallat	L. Jimeno	Berta	Carr	Konya	Olofsson	Rustan
Diâmetro do furo ou da carga	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Altura da bancada								X	X			X					X	
Comprimento do furo	X	X																
Tampão												X						
Sobrefuração												X						
Comprimento da carga		X							X	X								
Inclinação do furo							X							X		X		
Densidade da rocha				X	X					X			X		X	X		
Resistência a compressão da rocha		X	X	X							X	X		X				
Constantes da rocha	X		X				X	X									X	
Velocidade sísmica do maciço rochoso														X	X	X	X	
Densidade do explosivo							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Velocidade de detonação						X					X	X	X	X	X	X		
Pressão de detonação			X	X	X													
Constante binomial rocha-explosivo				X														
Relação afastamento/espacamento							X											
Força do explosivo								X									X	
Equipamento de carregamento													X					

Fonte: adaptado Jimeno (1995).

3.1. Mecanismos de faturamento da rocha

Antes de se iniciar o dimensionamento de um plano de fogo é interessante entender os mecanismos de fraturamento da rocha.

Segundo Jimeno (1995), durante a detonação de um explosivo dentro de um maciço rochoso há a presença de duas fases de ação:

1º Fase: um forte impacto é produzido pela onda de choque durante um curto período de tempo.

2º Fase: os gases produzidos pela detonação entram em ação, com uma alta temperatura e pressão.

Além disso, o mesmo autor ainda cita que pelo menos oito mecanismos de fratura entram em ação durante a fragmentação do maciço, com menor ou maior efeito, mas todos atuam durante a fragmentação.

- Trituração da rocha

Nos primeiros instantes da detonação, a onda de choque alcança valores que atingem facilmente os valores de resistência à compressão da rocha, dessa forma as estruturas intercristalinas e intergranulares são destruídas.

- Formação de gretas radiais

Durante a propagação da onda de choque, a área ao redor do furo sofre intensas compressões que acabam por ocasionar trações no plano tangencial. Dessa forma, quando essas tensões no plano tangencial excedem o valor da resistência à tração, há a formação de áreas de fraturas radiais ao redor do furo.

- Lasqueamento

Quando a onda de choque atinge a face livre duas tensões serão geradas, tração e cisalhamento. Isso ocorre quando as fraturas radiais não se propagam mais do que um terço da distância entre a carga e a face livre. As fraturas são geradas devida a reflexão da tração. Caso a tração seja maior do que a resistência à tração da rocha, o mecanismo de fratura conhecido como lasqueamento irá ocorrer.

- Ação da expansão dos gases na abertura de fraturas

Após a passagem da onda de choque, há a formação de um campo de tensões devido à pressão dos gases. Durante e após o mecanismo de formação de gretas radiais os gases começam a se expandir e penetrar nas fraturas geradas. Além disso, as fraturas radiais são prolongadas pela concentração de tensões nas extremidades das fraturas. Assim, o número e comprimento das fraturas depende diretamente da pressão dos gases.

- Fragmentação pela liberação de tensão

Antes da onda de choque atingir a face livre, toda a energia transferida à rocha pela compressão varia entre 60 e 70% da energia de detonação. Depois da onda de compressão passar, é gerado um estado de equilíbrio, seguido de uma subsequente queda de pressão nos furos devido ao escape dos gases. A energia acumulada é rapidamente liberada, ocasionando tensões e fratura de cisalhamento no maciço rochoso. Esse mecanismo afeta um grande volume de rocha, não apenas a porção a frente do furo (face livre) mas também a porção atrás da linha de corte.

- Fragmentação por coeficientes de elasticidade diferentes

Em rochas sedimentares, quando os coeficientes de elasticidade ou as propriedades mecânicas dos planos são diferentes, fraturas são geradas nos planos de separação quando a onda de choque passa, isso ocorre devido as diferentes tensões nesses pontos.

- Fragmentação por flexão

Durante e após os mecanismos de formação de gretas radiais e lascamento, a pressão gerada pelos gases da detonação contra o material a frente da coluna de detonação faz as rochas agirem como um feixe, isso causa deformação e faturamento por flexão.

- Fragmentação por colisão

As rochas fragmentadas pelo mecanismo de fragmentação por flexão e acelerada pelos gases são projetadas contra a face livre, colidindo uma contra a outra e como consequência produzindo uma fragmentação adicional.

3.2. Cálculo dos parâmetros do plano de fogo

Sabendo-se os principais mecanismos de fragmentação do maciço rochoso, pode-se iniciar a revisão da literatura para se estudar as formas de se calcular os parâmetros de um plano de fogo.

Segundo Jimeno (1995), o cálculo do afastamento e espaçamento é realizado levando-se em conta, basicamente, o diâmetro do furo, as propriedades da rocha e do explosivo, a altura da bancada e o grau de fragmentação e espalhamento desejado para o material fragmentado. Diversas fórmulas foram sugeridas para o afastamento, levando-se em conta um ou mais parâmetros citados a cima. Contudo, de acordo com Tamrock (1978), a maioria delas cai em um valor de 25 a 40 vezes o diâmetro do furo.

Enquanto isso, o espaçamento é calculado com base no afastamento, sendo uma função do mesmo.

Dessa forma se procurou três formas de se calcular o afastamento. A primeira equação selecionada depende de apenas uma variável e foi retirada de Rustan (1990), onde o afastamento é expresso por:

$$B = 18,1 * d^{0,689} \quad (1)$$

Onde:

B = afastamento (cm);

d = diâmetro do furo (varia de 89 à 311 mm).

A segunda, a equação de Konya (1983), na qual a fórmula do afastamento é dada por:

$$B = \left[\frac{\rho e}{\rho r} + 1,5 \right] * d \quad (2)$$

Onde:

B = afastamento (pés);

ρ_e = gravidade específica do explosivo;

ρ_r = gravidade específica da rocha;

d = diâmetro do explosivo (polegadas).

A terceira e última equação pertence à Jimeno (1980), a fórmula do afastamento desse autor é dada pela equação 3 a seguir:

$$B = 0,76 * d * F \quad (3)$$

Onde:

B = afastamento (m);

d = diâmetro do furo (polegadas);

F = fator de correção baseado no tipo de rocha e de explosivo.

O fator F pode ser calculado pela fórmula abaixo:

$$F = fr * fe \quad (4)$$

$$fr = \left[\frac{2,7 * 3500^2}{\rho_r * VC} \right]^{0,33} \quad (5)$$

$$fe = \left[\frac{\rho_e * VD}{1,3 * 3660^2} \right]^{0,33} \quad (6)$$

Onde:

ρ_r = gravidade específica da rocha (g/cm^3);

VC = velocidade da onda longitudinal (m/s);

ρ_e = gravidade específica do explosivo (g/cm^3);

VD = velocidade de detonação do explosivo (m/s).

O cálculo dos outros parâmetros do plano de fogo, assim como o afastamento, foi levantado da literatura. As fórmulas para os outros parâmetros do plano de fogo encontram-se a seguir.

Jimeno (1995) propõe que o espaçamento deve variar de 1,0 B a 1,4 B .

Ash (1977) propõe uma relação ótima $H/B \geq 3$, ou seja, a altura da bancada (H) deve ser maior ou igual a três vezes o afastamento. Segundo esse mesmo autor se

$H/B=1$, os fragmentos serão grandes, com *overbrak* e problemas de repé. Para $H/B = 2$ esses problemas são atenuados e para $H/B \geq 3$ eles somem completamente.

Jimeno (1995) propõe que o comprimento do tampão (T) deve variar de 20 D à 60 D e sempre que possível deve-se optar por um tampão maior que 25 D, pois ele poderá evitar problemas de onda de pressão, ultra lançamentos, *cutoffs* e *overbreak*.

Jimeno (1995) ainda propõe calcular o comprimento da sobre furação (J) de acordo com a fórmula a seguir:

$$J = 0,3B \quad (7)$$

Onde:

J = comprimento da sobre furação (m);

B = afastamento (m).

Langefors (1978) sugere que o comprimento da carga de fundo (If) deve variar de 0,6 B à 1,3 B.

Sabendo-se o comprimento da carga de fundo pode-se calcular o comprimento da carga de coluna (Ic), conforme apresentado em Iramina (2016), que será o comprimento do furo menos o comprimento da carga de fundo e do tampão, e o comprimento do furo é dado pela soma da altura da bancada com a sobre furação. As fórmulas estão explicitadas abaixo:

$$Ic = L - If - T \quad (8)$$

$$L = H + J \quad (9)$$

Onde:

Ic = comprimento da carga de coluna (m);

If = comprimento da carga de fundo (m);

T = comprimento do tampão (m);

H = altura da bancada (m);

J = comprimento da sobre furação (m).

Outro parâmetro que deve ser calculado, e também é apresentado por Iramina (2016), é o volume de rocha desmontado por furo (VR), a fórmula do mesmo se encontra na página seguinte.

$$VR = H * B * S \quad (10)$$

Onde:

VR = volume de rocha desmontada por furo (m^3).

A massa de explosivo que irá em cada furo (Qe) será dado pela fórmula 11 a seguir e é apresentado por Iramina (2016).

$$Qe = \left(\frac{\pi * D^2}{4000} \right) * (\rho_{ef} * If + \rho_{ec} * Ic) \quad (11)$$

Onde:

ρ_{ef} = densidade do explosivo na carga de fundo (kg/m^3);

ρ_{ec} = densidade do explosivo na carga de coluna (kg/m^3).

Por fim, um último parâmetro, do plano de fogo, que deve ser calculado é a razão de carga (PF), apresentado por Iramina (2016). Ele é dado pela razão de explosivo necessária para se detonar desmontar um m^3 de rocha. A sua fórmula se encontra a seguir:

$$PF = \frac{Qe}{VR} \quad (12)$$

Para se realizar a análise da qualidade do desmonte, será utilizado a Equação de Kuznetsov, extraído do Kuznetsov (1973), que apresenta uma correlação entre o tamanho médio do material desmontado e a energia de detonação aplicada por unidade de volume de rocha em função do tipo de rocha.

$$X50 = A * (PF^{-0,8}) * Qe^{0,167} * \left(\frac{115}{RWS} \right)^{0,633} \quad (13)$$

Onde:

$X50$ = tamanho médio da partícula (cm);

A = fator de rocha;

Qe = massa do explosivo utilizado (kg);

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

3.3. Características do maciço rochoso e do explosivo

Nesta etapa irá se realizar a revisão da literatura dos desmontes reais que forneceram as características do maciço rochoso e do explosivo que serão utilizados na simulação, além dos seus parâmetros do plano de fogo.

Os dados dos desmontes reais são provenientes de Ramirez Canedo (2013). A Tabela 2 abaixo apresenta os parâmetros referentes aos desmontes estudados por Ramirez Canedo (2013).

Tabela 2: Parâmetros de desmontes reais realizados na pedreira.

Características	Fogo 1	Fogo 2	Fogo 3	Fogo 4
Data	16/10/2012	07/11/2012	16/11/2012	28/11/2012
D (mm)	89	89	89	89
Total de furos	168	147	125	157
Qe (kg)	12.370	11.094	9.365	12.543
B (m)	2,80	2,80	2,60	2,80
S (m)	2,50	2,50	2,50	2,50
H (m)	10,50	12,30	12,00	11,50
L (m)	11,50	13,30	13,10	12,60

Fonte: adaptado Ramirez Canedo (2013).

Entretanto, Ramirez Canedo (2013) não contém informações a respeito da litologia local onde se encontra a pedreira, contendo apenas a litologia regional que se caracteriza por se encontrar nos terrenos cristalinos do Grupo São Roque, onde os granitos intrusivos são abundantes, e pelo fato do principal produto da pedreira ser a brita.

Além disso, esse mesmo autor não contém informações sobre o tipo de explosivo utilizado nos desmontes.

4. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho se iniciou pelo levantamento na literatura sobre qual a variável mais importante de um plano de fogo, feito essa definição se iniciou a pesquisa sobre formas de se calcular essa variável, esse levantamento foi realizado através da pesquisa do termo afastamento, variável definida como a mais importante de um plano de fogo, nos livros utilizados na bibliografia. Dessa forma, se selecionou três equações para o cálculo do afastamento, sendo selecionadas as Equações de Rustan, Konya e Jimeno, a seleção das mesmas foi feita de forma a se manter pelo menos uma variável em comum entre elas e haver a inclusão de maneira constante de novas variáveis. Após se definir quais seriam as equações para o cálculo do afastamento se iniciou a pesquisa bibliográfica sobre como se calcular as outras variáveis do plano de fogo, como espaçamento, tampão e razão de carga, sendo utilizado principalmente o Jimeno (1995) e o material de aula da matéria PMI3321 – Perfuração e Desmonte de Rochas, matéria ministrada no oitavo semestre do curso de engenharia de minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Após se definir o cálculo dos principais parâmetros do plano de fogo, se escolheu a Equação de Kuznetsov para a análise teórica dos planos de fogo dimensionados, pois com essa equação pode se calcular de forma teórica qual o tamanho médio da partícula gerada pelo desmonte. O resultado da equação será considerado como o principal parâmetro para a avaliação do desmonte, sendo considerado que quanto menor o tamanho médio da partícula mais adequado será o desmonte, além disso se definirá a razão de carga como critério de desempate, ou seja, caso os resultados sejam muito semelhantes o desmonte que possuir a menor razão de carga será considerado o mais adequado.

Definido-se a forma de se calcular o plano de fogo e avalia-lo, se pesquisou por parâmetro de um plano de fogo real, esses dados foram obtidos em Ramirez Canedo (2013), no qual esta tese de doutorado possui os parâmetros de quatro desmontes que ocorreram em uma pedreira, contudo a mesma tese não possui informações sobre a litologia do local onde ocorreram os desmonte e os explosivos utilizados. Assim se faz necessário a definição dessas condições de contorno para a continuação do estudo.

Após se definir as condições de contorno, como características do maciço e do explosivo, pode-se iniciar as simulações teóricas a partir das equações para cálculo do afastamento escolhidas. Além de se calcular o tamanho médio da partícula e a razão de carga para os desmontes reais, extraídos de Ramirez Canedo (2013), para que se comparasse os resultados teóricos com resultados gerados por desmontes reais, sendo que será escolhida a equação que gerar um tamanho médio de partícula mais próximo do gerado pelo desmonte real, tomando como premissa que o desmonte realizado pela pedreira foi dimensionado de forma adequada e de forma a melhorar as operações posteriores, como a britagem, sem aumentar o custo operacional da pedreira.

5. Desenvolvimento

O desenvolvimento do trabalho deve-se iniciar definindo-se as condições de contorno do maciço rochoso e do explosivo.

De acordo com a revisão da literatura não há informações sobre a litologia local, apenas a litologia regional, que é abundante em granitos intrusivos, e o principal produto da pedreira, a brita. Assim se adotou, como condição de contorno, que o maciço rochoso seria formado integralmente por granito, sendo a densidade da rocha e a velocidade da onda longitudinal extraídos de Teixeira (2010), e se admitiu que o fator de rocha que será usado na Equação de Kuznetsov para se calcular o tamanho médio da partícula seria o mesmo que o de rochas duras e fracamente fissuradas, sendo extraído do Hustrulid (1999). A Tabela 3, a seguir, contém as principais características do maciço rochoso esperado.

Tabela 3: Características do maciço rochoso esperado.

ρ_r (g/cm ³)	2,65-2,75
VC (m/s)	5.000-6.000
A (rochas duras e fracamente fissuradas)	13

Fonte: adaptado Teixeira (2010) e Hustrulid (1999).

Como a densidade da rocha e a velocidade da onda longitudinal se encontram dentro de um intervalo, se optou pelo valor médio desses parâmetros, ou seja, densidade da rocha de 2,7 g/cm³ e velocidade da onda longitudinal de 5.500 m/s.

Em seguida deve-se escolher os explosivos que poderão ser utilizados na simulação. Os explosivos selecionados foram o ANFO derramado da Dyno Nobel e os explosivos Flexigel™ Control System, o Flexigel™ Advantage System, o Fortan™ Advantage, que são emulsões derramáveis, e o explosivo Senatel™ Magnafrac™, que é uma emulsão encartuchada, esses últimos quatro explosivos pertencem a Orica. Os relatórios técnicos dos explosivos se encontram compilados na Tabela 4 que se encontra na página seguinte.

Tabela 4: Relatório técnico dos explosivos.

Explosivo	ρ_e (g/cm ³)	Diâmetro mínimo (mm)	VOD (m/s)	RWS	RBS
ANFO derramado	0,82	75	3.500	100	0,82
Flexigel™ Control System 50	0,50	200	2.500	53	0,50
Flexigel™ Control System 60	0,60	200	2.700	60	0,60
Flexigel™ Control System 70	0,70	150	3.000	67	0,70
Flexigel™ Control System 80	0,80	150	3.300	74	0,80
Flexigel™ Advantage System 90	0,90	150	3.700	80	0,90
Flexigel™ Advantage System 100	1,00	150	4.000	87	1,00
Flexigel™ Advantage System 110	1,10	150	4.300	93	1,10
Fortan™ Advantage System 20	1,00	89	4.150	112	1,00
Fortan™ Advantage System 30	1,11	102	4.450	111	1,11
Fortan™ Advantage System 40	1,18	102	4.700	111	1,18
Fortan™ Advantage System 50	1,23	127	4.750	111	1,23
Senatei™ Magnafrac™	1,15	25	6.100	107	1,58

Fonte: adaptado site Dyno Nobel e site Orica.

A Tabela 4 já apresenta o valor médio das propriedades dos explosivos, dado que algumas propriedades eram dadas por um intervalo definido nos relatórios técnicos. Além disso, se considerou que o diâmetro mínimo do Senatei™ Magnafrac™ seria o diâmetro do cartucho mais fino, 25 mm.

Em uma palestra realizada por um profissional da mesma pedreira estudada por Ramirez Canedo (2013) e ministrada na matéria PMI3321 – Perfuração e Desmonte de Rochas foi mostrado que a pedreira utiliza emulsões encartuchadas para a realização de desmontes, assim como outra condição de contorno, se admitiu que as simulações também seriam realizadas com emulsão encartuchada. Dessa forma, dos explosivos pesquisados se utilizou o Senatel™ Magnafrac™.

Após se ter definido o maciço rochoso e o explosivo, deve-se definir o diâmetro do furo, para isso será utilizado os dados dos desmontes reais realizados na pedreira, esses dados foram obtidos de Ramirez Canedo (2013) e se encontram na Tabela 2 que está na revisão da literatura. Sendo o diâmetro do furo de 89 mm.

Tendo sido definido o maciço rochoso, o explosivo e o diâmetro do furo, que será o mesmo do desmonte real, 89 mm, será inferido que o furo será vertical, inclinação de 0°, pois os dados contidos em Ramirez Canedo (2013) não especificavam a inclinação do furo.

Após se estipular todas as condições de contorno, deve-se definir as equações dos outros parâmetros do plano de fogo para se realizar as simulações, pois algumas das equações descritas na revisão da literatura se encontram dentro de um intervalo. Os outros parâmetros do plano de fogo que serão utilizados nas simulações encontram-se na Tabela 5 na página seguinte.

Tabela 5: Parâmetros do plano de fogo utilizados na simulação.

Parâmetro
D = 89 mm
Inclinação = 0°
S = 1,2 B
H = 3 B
T = 30 D = 4500 mm = 4,5 m
J = 0,3 B
L = H + J
If = B
Ic = L - If - T
VR = H * B * S
$Qe = \left(\frac{\pi * D^2}{4000} \right) * (pef * If + pec * Ic)$
PF = Qe/VR
$X50 = A * (PF^{-0,8}) * Qe^{0,167} * \left(\frac{115}{RWS} \right)^{0,633}$

Fonte: elaboração própria.

Para a fórmula da massa de explosivo por furo, se considerou que a carga de fundo será a mesma que a carga de coluna, assim na equação 11 se utiliza apenas a densidade do explosivo, não havendo qualquer diferenciação entre a carga de fundo e a de coluna.

Uma última consideração que se deve realizar antes de se iniciar as simulações são as dimensões dos cartuchos de emulsão, para as simulações será considerado cartuchos de 600 mm de comprimento, sendo que o que irá variar entre eles será o seu diâmetro. Assim o diâmetro dos cartuchos será de 25, 38, 50, 65 e 75 mm e todos com 600 mm de comprimento.

6. Resultados

Com as informações contidas na Tabela 2 e com algumas das equações contidas na Tabela 5, pode-se calcular os principais parâmetros que serão utilizados para se comparar os resultados, que são a razão de carga e o tamanho médio de partícula. Essas informações encontram-se na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6: Dados do desmonte real.

Explosivo	B (m)	S (m)	H (m)	T (m)	J (m)	L (m)	lf (m)	lc (m)	VR (m ³)	Qe (kg)	PF (kg/m ³)	X50 (cm)
Fogo 1						11,50	-	-	73,50	73,63	1,00	27,82
	2,80	2,50	10,50	-	-							
Fogo 2						13,30	-	-	86,10	75,47	0,88	31,07
	2,80	2,50	12,30	-	-							
Fogo 3						13,10	-	-	78,00	74,92	0,96	28,86
	2,60	2,50	12,00	-	-							
Fogo 4						12,60	-	-	80,50	79,89	0,99	28,47
	2,80	2,50	11,50	-	-							

Fonte: elaboração própria.

Tendo-se as informações do desmonte real, pode-se iniciar a primeira simulação com a Equação de Rustan que foi realizada utilizando-se a equação 1, os dados da Tabela 3, o explosivo escolhido da Tabela 4 e as equações da Tabela 5. O resultado da simulação se encontra na Tabela 7 a seguir:

Tabela 7: Simulação utilizando-se a Equação de Rustan.

Explosivo	B (m)	S (m)	H (m)	T (m)	J (m)	L (m)	lf (m)	lc (m)	VR (m ³)	Qe (kg)	PF (kg/m ³)	X50 (cm)
Senatel TM Magnafrac TM 25mm	3,99	4,79	11,97	2,67	1,20	13,16	3,99	5,31	228,42	5,36	0,02	362,61
Senatel TM Magnafrac TM 38mm	3,99	4,79	11,97	2,67	1,20	13,16	3,99	5,31	228,42	12,09	0,05	216,56
Senatel TM Magnafrac TM 50mm	3,99	4,79	11,97	2,67	1,20	13,16	3,99	5,31	228,42	20,84	0,09	153,44
Senatel TM Magnafrac TM 65mm	3,99	4,79	11,97	2,67	1,20	13,16	3,99	5,31	228,42	31,25	0,14	118,73
Senatel TM Magnafrac TM 75mm	3,99	4,79	11,97	2,67	1,20	13,16	3,99	5,31	228,42	46,88	0,21	91,84

Fonte: elaboração própria.

A simulação com a Equação de Konya, assim como a de Rustan levou em conta a equação 2, os dados da Tabela 3 e o explosivo escolhido da Tabela 4, além das equações presentes na Tabela 5. Os resultados estão expressos na Tabela 8 a seguir

Tabela 8: Simulação utilizando-se a Equação de Konya.

Explosivo	B (m)	S (m)	H (m)	T (m)	J (m)	L (m)	lf (m)	lc (m)	VR (m ³)	Qe (kg)	PF (kg/m ³)	X50 (cm)
Senatel™ Magnafrac™ 25mm	2,51	3,01	7,54	2,67	0,75	8,29	2,51	3,11	57,05	3,21	0,06	162,15
Senatel™ Magnafrac™ 38mm	2,51	3,01	7,54	2,67	0,75	8,29	2,51	3,11	57,05	7,25	0,13	98,63
Senatel™ Magnafrac™ 50mm	2,51	3,01	7,54	2,67	0,75	8,29	2,51	3,11	57,05	12,50	0,22	69,89
Senatel™ Magnafrac™ 65mm	2,51	3,01	7,54	2,67	0,75	8,29	2,51	3,11	57,05	18,75	0,33	54,07
Senatel™ Magnafrac™ 75mm	2,51	3,01	7,54	2,67	0,75	8,29	2,51	3,11	57,05	28,13	0,49	41,83

Fonte: elaboração própria.

Finalmente, a simulação com a Equação de Jimeno, foi realizada calculando-se o afastamento a partir da equação 3 e levou em conta os dados da Tabela 3 e o explosivo escolhido da Tabela 4, além das equações presentes na Tabela 5. Os resultados desta simulação se encontram na Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Simulação utilizando-se a Equação de Jimeno.

Explosivo	B (m)	S (m)	H (m)	T (m)	J (m)	L (m)	lf (m)	lc (m)	VR (m ³)	Qe (kg)	PF (kg/m ³)	X50 (cm)
Senatel™ Magnafrac™ 25mm	2,57	3,08	7,71	2,67	0,77	8,48	2,57	3,24	61,06	3,21	0,05	174,39
Senatel™ Magnafrac™ 38mm	2,57	3,08	7,71	2,67	0,77	8,48	2,57	3,24	61,06	7,25	0,12	104,15
Senatel™ Magnafrac™ 50mm	2,57	3,08	7,71	2,67	0,77	8,48	2,57	3,24	61,06	12,50	0,20	73,79
Senatel™ Magnafrac™ 65mm	2,57	3,08	7,71	2,67	0,77	8,48	2,57	3,24	61,06	18,75	0,31	57,10
Senatel™ Magnafrac™ 75mm	2,57	3,08	7,71	2,67	0,77	8,48	2,57	3,24	61,06	28,13	0,46	44,17

Fonte: elaboração própria.

Com a tabela 9 se termina as simulações e pode-se iniciar a discussão dos resultados.

7. Discussão dos resultados

A discussão dos resultados será feita construindo-se uma matriz, onde nas colunas teremos a equação de afastamento escolhida ou o desmonte realizado e nas linhas os explosivos selecionados. Para se realizar a análise se utilizará a razão de carga e o tamanho médio da partícula, porque esses dois parâmetros são os resultados teóricos selecionados para a comparação. A matriz de comparação se encontra na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10: Matriz de comparação da razão de carga e do tamanho médio da partícula. Onde: PF em kg/m³ e X50 em cm.

PF / X50	Rustan	Konya	Jimeno	Fogo 1	Fogo 2	Fogo 3	Fogo 4
Senatel™ Magnafrac™ 25mm	0,02/ 362,61	0,06/ 165,15	0,05/ 174,39				
Senatel™ Magnafrac™ 38mm	0,05/ 216,56	0,13/ 98,63	0,12/ 104,15				
Senatel™ Magnafrac™ 50mm	0,09/ 153,44	0,22/ 69,89	0,20/ 73,79				
Senatel™ Magnafrac™ 65mm	0,14/ 118,73	0,33/ 54,07	0,31/ 57,10				
Senatel™ Magnafrac™ 75mm	0,21/ 91,84	0,49/ 41,83	0,46/ 44,17	1,00/ 27,82	0,88/ 31,07	0,96/ 28,86	0,99/ 28,47

Fonte: elaboração própria.

As colunas Fogo 1, 2, 3 e 4 só apresentam os resultados nas linhas do Senatel™ Magnafrac™ 65mm e Senatel™ Magnafrac™ 75mm, pois em Ramirez Canedo (2013) não havia informações do tipo de cartucho utilizado no desmonte, apenas a massa de explosivo e as dimensões básicas de um plano de fogo, mas entende-se que a pedreira não colocaria um cartucho muito menor que o diâmetro do furo, pois isso não acarretaria em resultados satisfatórios para o desmonte, assim os explosivos com 65mm e 75mm de diâmetro seriam os prováveis explosivos utilizados na pedreira.

Assim, ao analisar os resultados da Tabela 10, percebe-se resultados bem distintos. A Equação de Rustan apresentou a menor razão de carga, mas em contrapartida possui o maior tamanho médio de partícula. Já a Equação de Konya obteve resultados contrários apresentando a maior razão de carga e o menor tamanho médio de partícula, entre as equações selecionadas. Enquanto que a Equação de Jimeno apresentou resultados piores que a Equação de Konya, pois de acordo com o critério utilizado para se definir a qualidade de um desmonte, a Equação de Jimeno gerou um tamanho médio de partícula maior que a Equação de Konya, mas em compensação teve uma razão de carga menor.

Agora comparando-se os resultados das equações selecionadas com os resultados dos desmontes reais percebe-se que a razão de carga média dos desmontes ($PF_{médio} = 0,96 \text{ kg/m}^3$) é muito maior que a maior que a razão de carga das simulações, Equação de Konya com Senatel™ Magnafrac™ 75mm ($PF = 0,49 \text{ kg/m}^3$), isso na ordem de 100%. Mas em compensação apresenta um tamanho médio de partícula de apenas 29,00 cm frente aos 41,83 cm do menor tamanho médio de partícula gerado a partir das equações teóricas, também Equação de Konya com Senatel™ Magnafrac™ 75mm.

Assim, percebe-se que os resultados teóricos variam de acordo com a equação selecionada para se calcular o afastamento. Além disso, dar-se a entender que as equações de Rustan e Konya são opostas, dado que a Equação de Rustan parece favorecer uma menor razão de carga em troca de um tamanho médio de partícula. Já a Equação de Konya favoreceu um menor tamanho médio de partícula, mas como *trade off* há um aumento da razão de carga, e a Equação de Jimeno ficou no meio das duas, apresentando resultados piores que a da Equação de Konya de acordo com principal parâmetro de comparação, mas em compensação obteve uma razão de carga menor quando comparado com os resultados da mesma equação. Além disso, ao se comparar os resultados das três equações com os desmontes reais, percebe-se que a equação que se encontra mais alinhada com os resultados dos desmontes reais é a Equação de Konya.

8. Conclusão

Esse trabalho de formatura do curso de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo conclui que pelo método de avaliação escolhido, a equação de Konya foi a que apresentou melhores resultados e foi essa mesma equação que obteve resultados mais alinhados com os desmontes reais realizados na pedreira, assim se sugere testes de campo com a Equação de Konya nesta pedreira, por seus resultados estarem alinhados com os desmontes reais. Contudo para considerar a sua aplicação deve-se realizar cálculos econômico posteriores no qual se verificará qual o melhor tamanho de partícula e razão de carga que fará com que os custos operacionais sejam os menores possíveis, tanto os relacionados ao desmonte quanto a cominuição.

Além disso, como foi necessário assumir algumas condições de contorno, devido à ausência de informação. Sugere-se que, caso se queira dar continuidade ao trabalho, seja realizado uma análise de sensibilidade.

Referências

- ASH, R. L. *Blasting characteristics of large diameter boreholes*. In: ANNUAL DRILLING AND BLASTING TECHNOLOGY, 6., 1977, Houston.
- Handbook on Surface Drilling and Blasting. Tamrock, 1978.
- HUSTRULID, W. Blasting principles for open pit mining: general design concepts. Rotterdam: Balkema, 1999.
- IRAMINA, W. S.; Sansone, E. C. Material didático da matéria PMI3321 – Perfuração e Desmonte de Rochas. São Paulo, 2016.
- JIMENO, E. L. *Parámetros críticos em la fragemtación de rocas com explosivos*. In: JORNADAS MINEROMETALÚRGICAS, 4., 1980, Hueva.
- JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam: Balkema, 1995.
- KONYA, C. J. *Blasting Design. Surface Mining Environmental Monitoring and Reclamation Handbook*. New York: Elsevier Science Publishing Co., 1983.
- KUZNETSOV, V. M. *The mean diameter of the fragments formed by blasting rock*. Novosibirsk: Academy of Sciences of the USSR: 1973.
- LANGEFORS, U.; KIHLSTROM, B. *The modern technique of rock blasting*. New York: Wiley, 1978.
- PERSSON, P.; Holmberg, R.; Lee, J. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- RAMIREZ CANEDO, G. *Mapa de iso-velocidades: uma ferramenta para o controle das vibrações nas pedreiras*. 2013. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.
- RUSTAN, P. A. *Burden, spacing and borehole diameter at rock blasting*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING, 3. 1990, Brisbane.
- TEIXEIRA, W. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2010.