

ANDRÉ NASCIMENTO MOSSINATO

Determinação de parâmetros do plano de fogo para pré-fissuramento utilizando a teoria do crateramento

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do curso de graduação do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva

São Paulo
2011

ANDRÉ NASCIMENTO MOSSINATO

Determinação de parâmetros do plano de fogo para pré-fissuramento utilizando a teoria do crateramento

São Paulo
2011

TF-2011
M855d
2270998

3

M2011r

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700009063

FICHA CATALOGRÁFICA

Mossinato, André Nascimento

Determinação de parâmetros do plano de fogo para pré-fissuramento utilizando a teoria do crateramento / A.N. Mossinato. -- São Paulo, 2011.

26 p.

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

1. Desmonte de rochas 2. Explosivos em minas (Métodos de avaliação) 3. Métodos empíricos (Estudo comparativo) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

A minha família e meus amigos de verdade

RESUMO

Em muitos cenários de desmonte por explosivos, em especial desmontes subterrâneos, existe, além da necessidade de fragmentação das rochas, uma separação bem definida entre a zona desmontada e o entorno, que deve continuar intacto.

Em um desmonte convencional essa separação não é nítida, o que produz além das zonas desmontada e intacta uma faixa na qual a rocha está fraturada porém não arrancada.

A partir dos anos 50 foram desenvolvidos diversos métodos de desmonte por explosivos que produzem faces regulares, uma dessas técnicas criadas foi denominada pré-fissuramento.

Essa técnica consiste em executar furos de mina de pequeno diâmetro, com um pequeno espaçamento entre os mesmos, iniciando-os de maneira simultânea e desacoplando as cargas dentro do furo de mina.

Um problema encontrado na utilização de linhas de pré-fissuramento está na escassez de métodos de ajuste dos parâmetros do plano de fogo. Até hoje não existe um método de cálculo que leve em consideração as variações da rocha e do local onde será necessário fazer o pré-fissuramento.

Esse trabalho tem como objetivo propor um equacionamento para a criação de linhas de pré-fissuramento a partir da teoria do crateramento.

Palavras-chave: pré-fissuramento; teoria do crateramento; desmonte subaquático

ABSTRACT

In many scenarios of rock blasting, especially underground blasting, there is, besides the need for fragmentation of the rocks, a well-defined separation between the blasted and the surrounding area, which should remain intact.

In a conventional blasting this separation is not sharp, which produces besides the blasted and intact areas a range in which the rock is fractured but was not torn.

Since the 50s were developed various methods of rock blasting that produce regular faces, one of these created techniques has been called pre-splitting.

This technique consists of performing blastholes of small diameter, with a small spacing between them, starting them simultaneously and disengaging the charges inside the blastholes.

A problem encountered in the use of pre-splitting lines is the lack of methods for adjusting the parameters of the blastholes pattern. Even today there is not a calculation method that takes into account the variations of the rock and where you will need to do the pre-splitting.

This paper aims to propose an equation for the creation of pre-splitting lines from the crater theory.

Keywords: pre-splitting, crater theory, underwater blasting

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	TEORIA DO CRATERAMENTO.....	10
2.1.	Equacionamento	12
3.	DESMONTE DE CONTORNO.....	14
3.1.	Formação de trincas	15
3.2.	Fatores que influenciam na formação de trincas	15
4.	PRÉ-FISSURAMENTO.....	19
4.1.	Valores práticos de pré-fissuramento	21
5.	DESMONTE SUBAQUÁTICO	22
6.	CONSIDERAÇÕES.....	24
7.	CÁLCULO.....	25
8.	CONCLUSÕES.....	27
9.	REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

A atividade mineira existe desde os primórdios da humanidade e se tornou uma peça chave para o desenvolvimento tecnológico. Inicialmente a mineração era feita utilizando-se a força humana, com auxílio ou não de ferramentas, porém com a necessidade do aumento da demanda por insumos minerais surgiu a necessidade de uma maior eficiência na extração de minérios.

O desmonte por explosivos surgiu como uma resposta a estas necessidades, como uma técnica relativamente simples e de alta eficiência. Com o avanço tecnológico surgiram diversas variações e refinamentos dessa técnica, seja pela utilização de diferentes tipos de explosivos, disposição dos mesmos e outros avanços que tornaram o desmonte por explosivos o padrão de desempenho para a indústria da mineração.

Apesar de ser consideravelmente mais eficiente que qualquer outro método de extração de minérios existem inconvenientes associados ao desmonte por explosivo, por exemplo, o risco associado à manipulação de explosivos, o incomodo sonoro provocado pelas detonações, as vibrações nas estruturas próximas, entre outros.

Nesse trabalho será discutido o problema relativo a chamada “zona perturbada”, essa zona é uma região do maciço rochoso próxima ao local onde foi feito um desmonte por explosivos.

Quando uma detonação é realizada, as forças que promovem desmonte da rocha não ficam confinadas a um espaço específico, se espalhando pelo maciço enquanto perdem intensidade. Isso cria uma região próxima ao furo de mina no qual as forças de fraturamento não são suficientemente intensas para promover o fraturamento da rocha e por sua vez permitir a remoção das mesmas posteriormente.

A rocha na zona perturbada não será removida após o desmonte mas já não possui mais a resistência interna que o maciço inicialmente possuía. Na maioria das situações de mineração isso não consiste um problema para a operação, pois a fronteira de uma mina é dinâmica, com avanços nas frentes de lavra ocorrendo constantemente.

Porém, em situações especiais, é necessário que exista uma separação nítida entre a zona fraturada e a zona intacta do maciço, isso acontece geralmente em locais onde haverá passagem de pessoal, por exemplo em uma galeria permanente de uma mina subterrânea, ou locais onde se necessite de uma face regular, por exemplo para a criação de um canal para passagem de água.

Quando se exige essa separação nítida, empregam-se técnicas conhecidas como desmontes de contorno. O desmonte de contorno não é um método único de trabalho, na verdade consiste de um conjunto diverso de técnicas de desmonte, porém todas com um mesmo objetivo: promover um corte na rocha, criando uma face livre o mais regular possível.

Existem diversas alternativas de desmonte de contorno, esse trabalho irá focar em uma delas, o pré-fissuramento, ou como é conhecido internacionalmente, o *presplitting*. Essa técnica foi desenvolvida nos anos 50, e vem sendo aperfeiçoada desde então por diversos autores.

Esse trabalho tem como objetivo propor um aperfeiçoamento a esta técnica, criando um modelamento para a criação dos planos de fogo necessários para a criação da face livre. Para isso será utilizada a teoria do crateramento.

A teoria do crateramento é uma teoria que tenta modelar detonações em condições de confinamento de carga, isto é, situações nas quais não exista uma face livre para a qual o material desmontado possa se expandir que seja paralela ao furo de mina, ficando somente disponível a face na qual foi feito o furo de mina.

Para utilizar-se essa teoria esse trabalho empregará o modelo matemático proposto por Jimeno & Jimeno (1997) para desmonte subaquático. Esse modelo utiliza a teoria do

crateramento, porém ele adiciona fatores não trabalhados inicialmente por essa teoria, como a utilização de uma carga cilíndrica em oposição à carga circular inicial, e também se preocupa com os diferentes materiais que dificultariam o desmonte, como por exemplo, o lençol de água ou uma possível camada de solo superficial.

O modelo proposto por Jimeno & Jimeno (1997), no entanto, não é totalmente válido para a situação de corte desejada, por isso foram feitas modificações para um melhor ajuste às condições pressupostas. Esses ajuste foram feitos com base em dados da literatura existentes para situações de desmonte de contorno.

Para validar os dados encontrados com o modelo proposto por esse trabalho esses valores serão confrontados com valores experimentais existentes na literatura, levando-se em conta a variância e as possíveis inconsistências que valores experimentais produzidos com número reduzido de amostras geram.

Por fim ressalta-se que o modelo proposto aqui ainda não tem validação experimental, portanto deve-se utilizar os valores obtidos com cautela e realizar os ajustes necessários para sua utilização.

2. TEORIA DO CRATERAMENTO

A teoria do crateramento tem origem relativamente recente e foi desenvolvida para auxiliar na modelagem de detonações de cargas confinadas, ou seja, não existem faces livre próximas para que haja a expansão do material desmontado, quando existe somente uma face livre; diferentemente do desmonte convencional produzido em uma bancada de uma mina, nesses casos a maior parte da energia fica confinada no maciço.

Esta teoria foi utilizada inicialmente para uso militar, para estudar a ação dos vários tipos de bombas em subsolo, e o como a energia produzida poderia afetar as estruturas próximas.

Seu uso foi posteriormente aplicado na atividade mineira, inicialmente por Livingstone (1956), que publicou suas ideias no artigo *Fundamentals of Rock Failure*.

Apesar de inicialmente criada por Livingstone a teoria do crateramento foi depois expandida por diversos autores, i.e. Grant (1964, 1965), Bauer (1961, 1965), Lang (1976, 1978, 1982), Sperry (1979, 1984), entre outros.

Dentre as diversas modificações feitas à teoria, algumas se destacam. Entre elas a modificação da geometria da carga de explosivo, passando de esférica para cilíndrica, uma geometria mais coerente para o uso em mineração; foram feitos também experimentos em outras escalas que não as inicialmente testadas.

Mesmo sendo uma teoria com certa complexidade ela pode ser explicada através de um experimento simples, que consiste de detonações de corpos esféricos em um material maciço em diferentes profundidades, esse experimento é descrito por Hustrulid, W. A. no livro *Blasting Principles For Open Pit Mining* (1999).

Este experimento consiste de detonações sucessivas de cargas circulares em uma placa de acrílico em diferentes profundidades e a verificação do volume arrancado por cada detonação.

Em uma profundidade suficientemente grande a detonação da carga implica somente em um fraturamento local do material, porém, sem propagação para a superfície, ou zonas distantes da carga.

A experiência continua com detonações sucessivas em diferentes profundidades. Em certo momento, com a diminuição da profundidade da detonação, chega-se a um ponto no qual acima dessa profundidade as fraturas produzidas pelo fogo conseguem chegar até a superfície, produzindo um arrancamento de material.

Conforme a profundidade de detonação da carga diminui, a cratera formada pela detonação vai se tornando cada vez maior, até atingir um ponto máximo.

Depois do ponto de máximo volume, a diminuição da profundidade da carga implica na diminuição gradual do volume arrancado, até que se atinja a superfície. Nesse caso toda a energia será dissipada para a atmosfera e não haverá arrancamento de material.

A figura abaixo foi retirada do livro *Blasting Principles For Open Pit Mining*, Hustrulid, W. A.. (1999), e demonstra a situação na maior arrancamento possível do material.

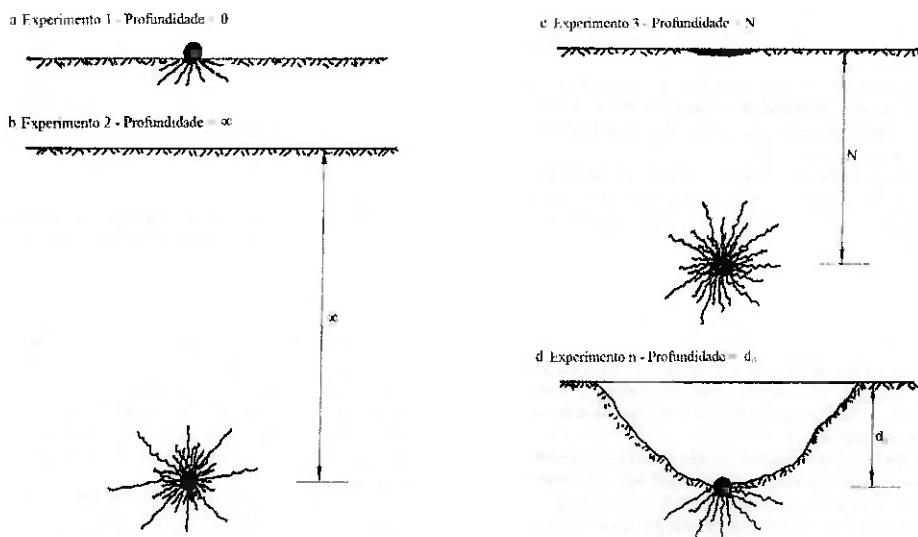


Figura 1 – Zonas de fraturamento criadas por três experimentos de crateramento mais a situação de maior volume de arrancamento – Hustrulid, W. A. (1999)

A detonação de cargas na superfície, bem como de cargas em profundidade maior que a máxima possível não provoca arrancamento, somente um fraturamento local do maciço.

Caso este experimento seja feito em diversas profundidades diferentes, e sempre em condições de carga e material similares, a relação entre profundidade e volume arrancado produzirá o gráfico abaixo. Esse gráfico foi retirado do livro *Blasting Principles For Open Pit Mining*, Hustrulid, W. A.. (1999).

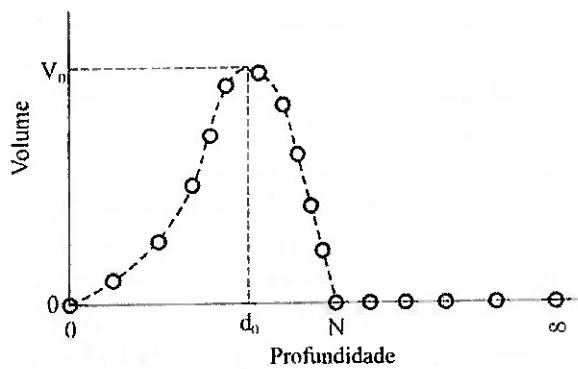


Figura 2 – Curva final de volume versus profundidade de detonação – Hustrulid, W. A. (1999)

Em mantendo-se as características de carga e material desmontado o volume máximo arrancado será alcançado em d_0 .

Essa curva é única para os parâmetros do experimento:

- carga esférica
- o tipo de explosivo
- a massa de explosivo
- o tipo de rocha

Podem ser realizados outros experimentos modificando-se algum dos parâmetros envolvidos, por exemplo o tipo de explosivo, e deixando os outros inalterados, para que se possa verificar a interferência de cada fator no resultado final.

2.1. Equacionamento

Para demonstrar as condições de validade da teoria do crateramento será feito o equacionamento a seguir, que foi descrito por Hustrulid em seu livro *Blasting principles for open pit mining*.

Considerando uma carga esférica com raio r_c , volume V_c , massa W_c e densidade ρ . O volume e a massa podem ser expressos por:

$$V_c = \frac{4\pi r_c^3}{3}$$

$$W_c = \frac{4\pi \rho r_c^3}{3}$$

A densidade de energia do explosivo por unidade de massa é denominada E_w , assim a energia total da carga é:

$$E = \frac{4\pi \rho r_c^3 E_w}{3} = W_c E_w \quad \text{eq. (1)}$$

Assim a densidade volumétrica da energia, sendo denominada E_v , é calculada como:

$$E_v = \rho E_w$$

A energia total da carga também pode ser escrita como:

$$E = \frac{4\pi r_c^3 E_v}{3}$$

Para uma situação como descrita no exemplo prático na profundidade máxima na qual a detonação da carga começa a influenciar na superfície. Nessa situação a zona de atuação da carga esférica toca a face livre.

Considerando a profundidade da carga (N) igual ao raio de influencia da carga (d) obtemos um volume da esfera fraturada:

$$V_R = \frac{4\pi N^3}{3} \quad \text{eq. (2)}$$

Uma propriedade fundamental utilizada para descrever a eficiência de fragmentação é a brizância, que pode ser descrita como a energia requerida para fraturar a rocha por unidade de volume; neste caso a rocha não foi quebrada, somente “perturbada”. Esse parâmetro pode ser descrito como:

$$E_{se} = \frac{\text{Energia do explosivo}}{\text{Volume de rocha afetada}} \quad \text{eq. (3)}$$

Substituindo as equações (1) e (2) na equação (3):

$$E_{se} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_c^3 E_w}{\frac{4}{3}\pi N^3} = \frac{\rho r_c^3 E_w}{N^3}$$

Ou:

$$E_{se} = \frac{WE_w}{\frac{4}{3}\pi N^3} = \frac{KW}{N^3}$$

Sendo K a constante para um dado tipo de explosivo:

$$K = \frac{3E_w}{4\pi}$$

Agora a equação pode ser descrita como:

$$N^3 = \frac{KW}{E_{se}} = E^3 W$$

Extraindo-se a raiz cúbica temos:

$$N = EW^{1/3}$$

Isto foi chamado de equação da Energia de Deformação (*Strain-Energy*) por Livingston (1981), e relaciona a profundidade (N) com a massa da carga (W).

Este fator tem a seguinte unidade:

$$\frac{\text{massa do explosivo}}{\text{volume de rocha}}$$

Que é o mesmo que a razão de carregamento volumétrico (*powder factor*). Na prática a constante E é determinada através de diversos ensaios com diferentes profundidades de detonação, até se determinar a profundidade quando a superfície é perturbada pela primeira vez.

3. DESMONTE DE CONTORNO

Em mineração deseja-se que durante um desmonte por explosivo toda a energia armazenada na carga seja destinada à fragmentação e ao volume da rocha a qual se deseja desmontar. Infelizmente uma grande parte dessa energia é desperdiçada, podendo chegar a até 85% da energia do explosivo, Jimeno & Jimeno (1995). A energia pode ser desprendida na forma de calor, ruído entre outras.

Uma forma de perda de energia, que é objeto de estudo desse trabalho, acontece quando as ondas de choque produzidas afetam a estrutura da rocha, porém sem intensidade suficiente para fratura-la.

No entorno do furo de mina existe uma região na qual as ondas de choque não conseguem fraturar a rocha, mas têm intensidade suficiente para enfraquecê-la, essa região é denominada de “zona perturbada”.

O contorno de um desmonte utilizando-se técnicas padrões de detonação resulta numa face irregular, além de gerar uma zona de rocha que não foi removida porem foi enfraquecida.

Essa irregularidade tem diversas consequências negativas, entre elas estão:

- A diluição do minério nas zonas de contato
- O aumento dos custos de transporte devido ao aumento do volume desmontado
- Aumento nos custo com concreto quando da necessidade de proteção
- Necessidade de colocação de suportes na rocha remanescente
- Aumento do fluxo de água em virtude da criação de fissuras na rocha

Porém o desmonte convencional ainda é vantajoso na maior parte das situações de mineração, sendo esta necessidade de limite bem definido acontecendo geralmente em locais onde haverá passagem de pessoal ou maquinário, como por exemplo em uma galeria permanente de uma mina subterrânea, ou locais onde haja a necessidade de uma face regular, por exemplo para a criação de um canal para passagem de água ou algum outro fluido.

A detonação de contorno acontece antes da detonação ordinária, pois com a criação de uma face livre bem definida as ondas de choque dos desmontes serão refletidas e não se propagarão além da zona desejada do maciço.

A face livre criada pela detonação de contorno é auxiliar não somente para impedir a propagação das ondas de choque: a reflexão faz com que haja uma sobreposição das ondas de choque indo e vindo e essa sobreposição gera tensões maiores no maciço, promovendo uma melhor fragmentação. Esse mesmo modelo rege o desmonte em bancada.

A figura 3 a seguir mostra um exemplo retirado do livro *The Modern Technique Of Rock Blasting*, Langefors, U.. Kihlström, Björn. (1978), de um desmonte de contorno realizado em uma galeria subterrânea.

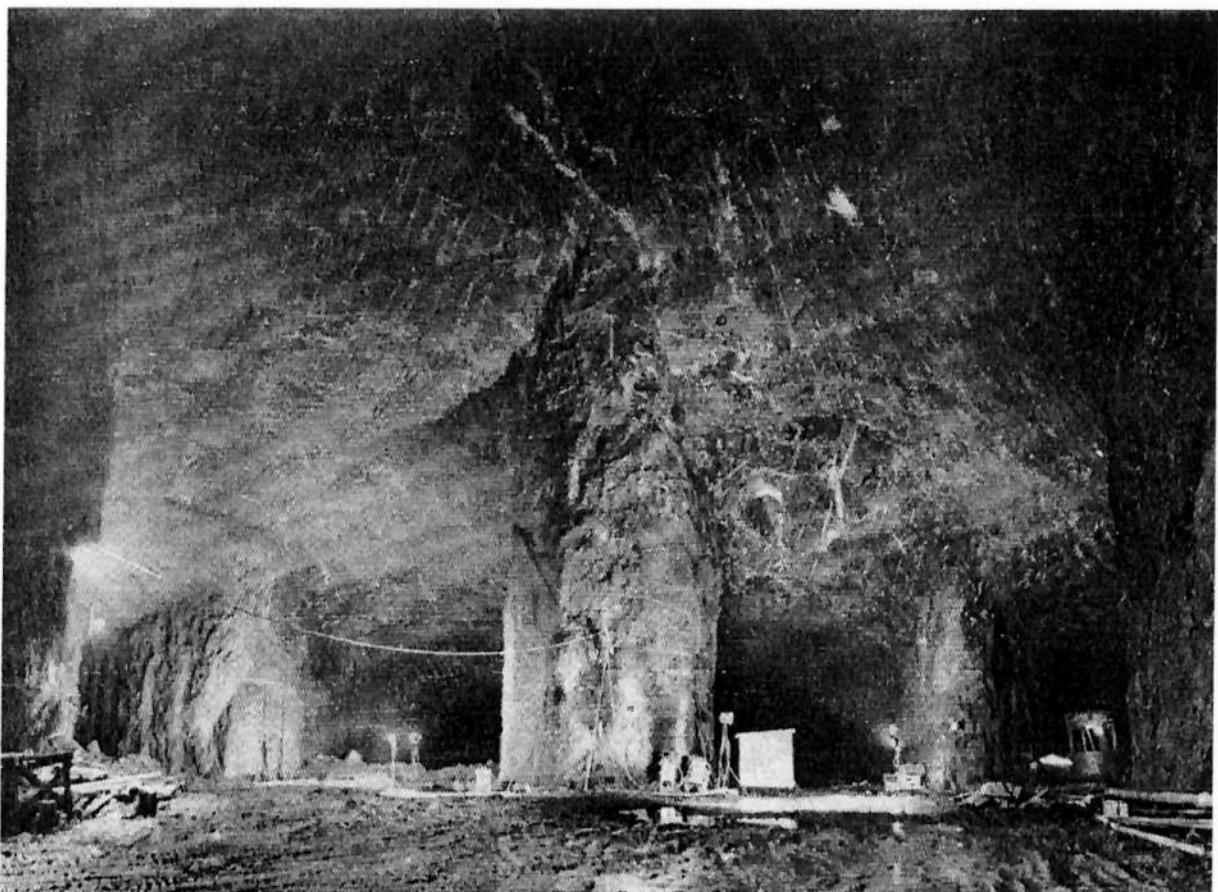


Figura 3 – Desmonte de contorno realizado no teto e nas paredes na usina hidroelétrica de Stornorrfors, Suécia – Langefors, U. Kihlström, Björn (1978)

3.1. Formação de trincas

A técnica de desmonte de contorno utiliza-se da propagação das trincas para criar a face livre.

Na detonação de uma carga em um furo de mina, na região próxima ao furo formam-se trincas em todas as direções a partir do ponto de detonação. Essas trincas fraturam a rocha e permitem que os gases provenientes da detonação se propaguem pela rocha.

O desmonte de contorno trabalha na tentativa de orientar as trincas em uma direção preferencial, para que a união das trincas forme um corte no maciço.

Demonstra-se experimentalmente que existem fatores que influenciam na orientação das trincas; uma situação importante é quando existem furos próximos entre si, a proximidade facilita a conexão das trincas dos furos adjacentes, criando a face livre desejada.

A qualidade da linha de descontinuidade depende de vários fatores, essa combinação de situações criadas durante a detonação irá moldar uma face livre com maior ou menor grau de regularidade.

3.2. Fatores que influenciam na formação de trincas

A seguir serão discutidos os diversos fatores que influenciam na criação e na qualidade das trincas:

Os exemplos serão exemplificados por figuras retiradas do livro *The modern technique of rock blasting*, U.. Kihlström, Björn. (1978),

O primeiro fator relevante é a proximidade entre furos, em considerando uma razão de carregamento volumétrica necessária para a criação da linha de descontinuidade, a colocação de furos de mina mais próximos e consequentemente com uma menor carga por furo em oposição a utilização de furos mais espaçados e com maior carga gera no primeiro caso um número menor de trincas em direções não desejadas.

A figura abaixo exemplifica a necessidade de se utilizar o valor adequado de carga para cada furo, um excesso de carga pode implicar em uma carga adicional desnecessária que será distribuída para as outras direções, perturbando a rocha no entorno.

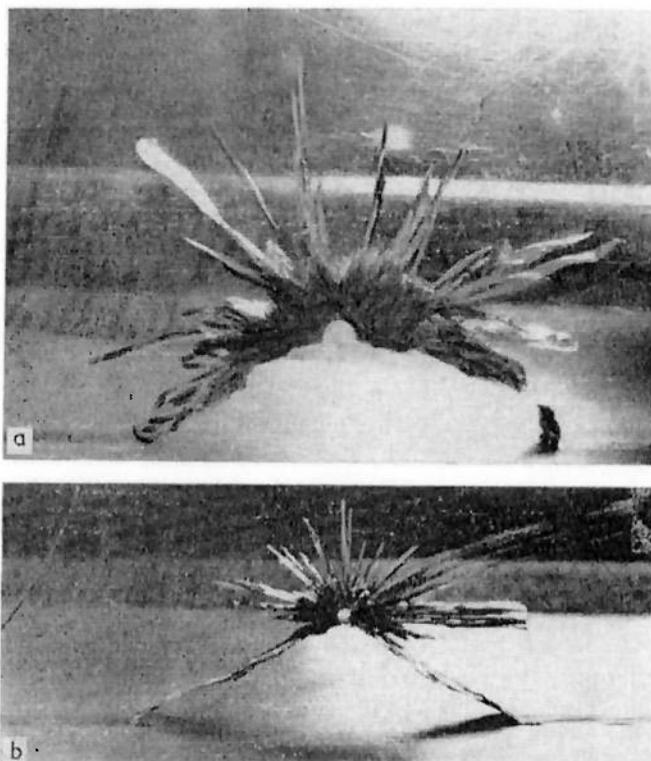


Figura 4 – Para se ter o menor estresse na rocha é essencial se evitar o carregamento excessivo. Em (a) a carga usada é quatro vezes maior que a correta (b) – U.. Kihlström, Björn. (1978)

Uma situação discutida por diversos autores é a utilização de cargas desacopladas, isto é, a carga não preenche totalmente o furo de mina.

Este desacoplamento é considerado essencial para o desmonte de contorno, pois nessa situação existe uma considerável diminuição no numero de trincas criadas durante a detonação, independente de qualquer outro fator.

O uso de cargas desacopladas é utilizado não somente quando se deseja criar uma linha de descontinuidade, mas é importante caso seja necessária uma produção de blocos maiores durante um desmonte ordinário.

A figura abaixo mostra a diferença entre a utilização de cargas desacopladas, figura A, e cargas acopladas, figura B, mesmo utilizando-se a mesma quantidade de carga por furo, neste caso na figura A o furo tem diâmetro maior que em B.

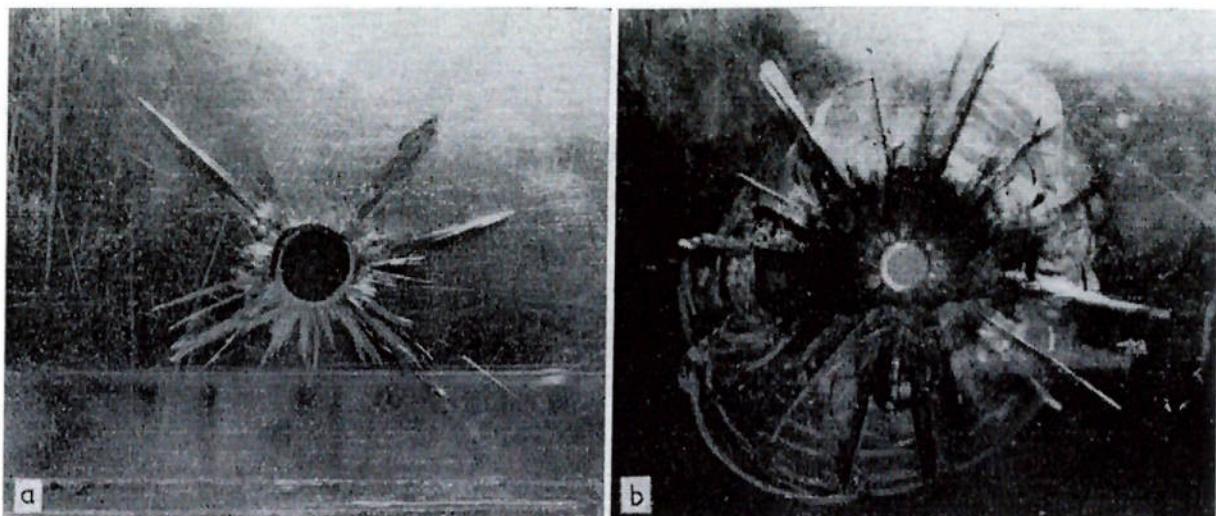


Figura 5 – Mais trincas são produzidas com a mesma carga quando ela está acoplada. O furo em (a) é quatro vezes maior que em (b), porém a carga é a mesma – U.. Kihlström, Björn. (1978)

A detonação dos furos de mina de maneira simultânea produz uma linha de descontinuidade com uma maior regularidade que a detonação com pequeno intervalo entre os furos. Esse por sua vez é mais eficiente no direcionamento das trincas do que a situação na qual os furos são detonados separadamente.

Isso se deve graças à sobreposição das ondas de choque dos furos adjacentes. Quando a detonação é simultânea na linha entre furos as forças de tração se somam produzindo um corte regular entre os furos.

A figura abaixo exemplifica as três situações, da detonação furo a furo, figura A, passando pela detonação simultânea, figura B, e a situação intermediária, com um pequeno retardo entre os furos, figura C.

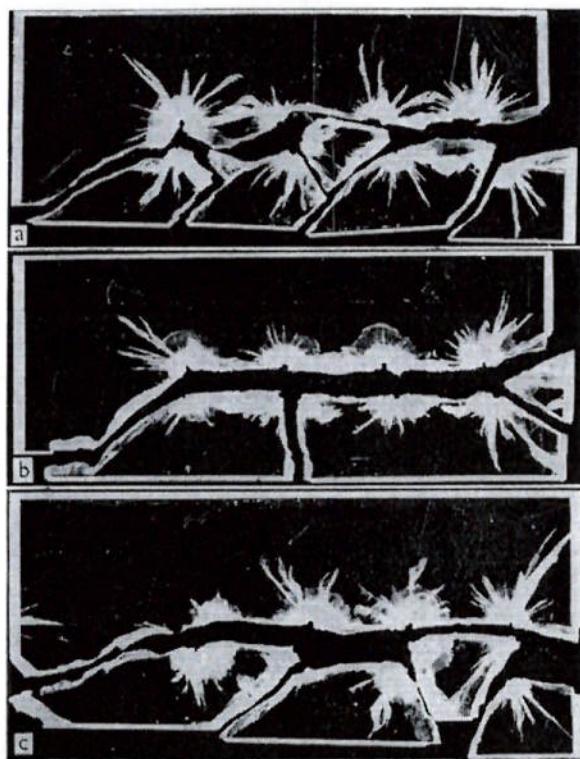


Figura 6 – Detonação de linhas de furos (em plexiglass): (a) detonação furo a furo, (b) detonação instantânea, (c) detonação com pequeno atraso entre furos – U.. Kihlström, Björn. (1978)

A proximidade com uma face livre paralela ao furo influencia na criação da linha de descontinuidade; caso haja uma face livre próxima, a reflexão das ondas de choque na mesma pode influenciar negativamente na tentativa de guiar as trincas.

Descobriu-se experimentalmente que, caso a relação entre o espaçamento dos furos e o afastamento da linha de furos da face livre seja alto o desmonte ficará prejudicado, assim recomenda-se que a relação seja $E/A \leq 0,8$, assim garantindo uma face livre regular.

A figura abaixo mostra uma detonação na qual os furos estavam muito espaçados em relação ao afastamento à face livre.

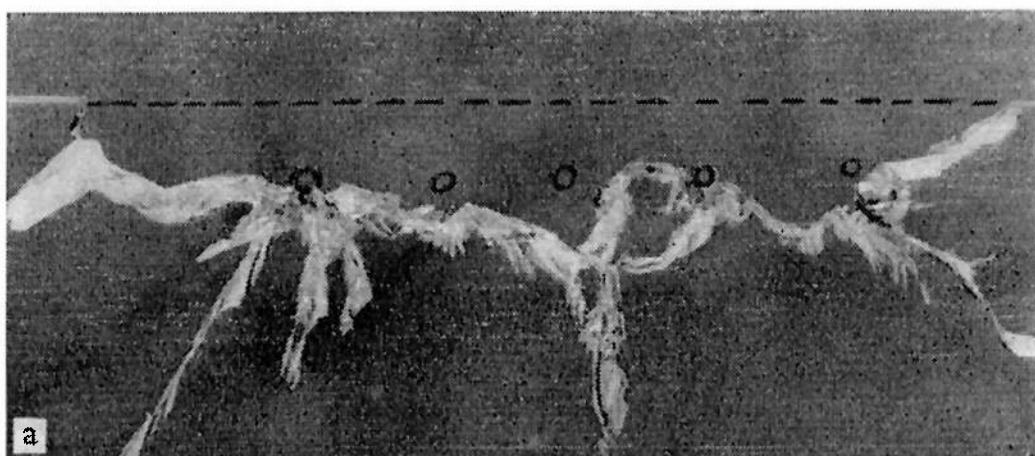


Figura 7 – Detonação com espaçamento igual ao dobro do afastamento – U.. Kihlström, Björn. (1978)

Uma última possibilidade para guiar as trincas seria a colocação de furos vazios entre os furos de mina; esses furos proveriam uma face livre para a reflexão das ondas de choque e não aumentariam a relação de carregamento volumétrica, o que poderia provocar a formação excessiva de trincas, como mostrado na figura abaixo.

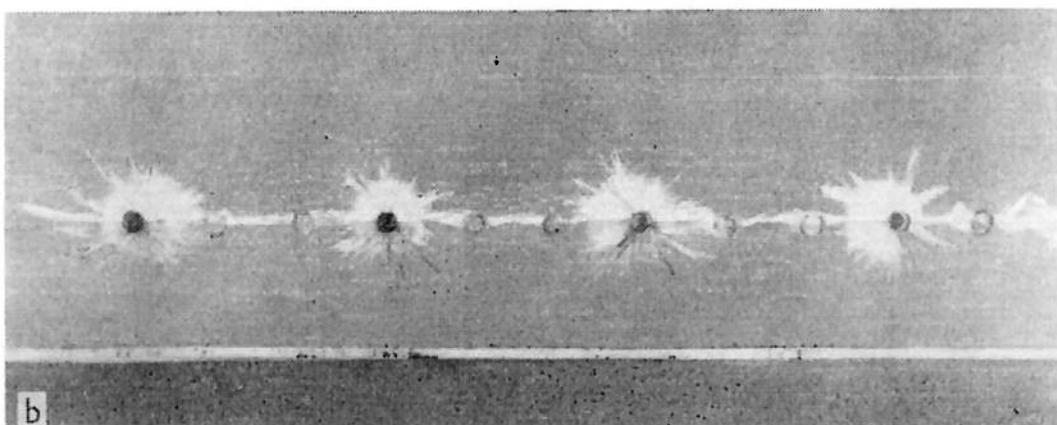


Figura 8 – Detonação com espaçamento entre furos carregados igual ao dobro do afastamento, porém adicionando-se furos guia (vazios) entre os furos carregados – U.. Kihlström, Björn. (1978)

4. PRÉ-FISSURAMENTO

O pré-fissuramento, ou *presplitting*, é um dos métodos de desmonte de contorno, ele foi desenvolvido inicialmente por D. K. Holmes para a utilização na construção das valas necessárias para a usina hidroelétrica de Lewiston, EUA.

O grande avanço para a utilização deste método deu-se durante a construção da hidroelétrica do rio Niagara, EUA.

O método foi posteriormente descrito por S. Paine, D. K. Holmes e H. E. Clark, sendo uma grande contribuição para as técnicas de desmonte de contorno.

No pré-fissuramento a linha de descontinuidade é criada detonando-se os furos ao mesmo tempo, ou com o menor atraso possível, assim, recentemente começou-se a adotar a utilização de detonadores eletrônicos para esses desmontes.

Segundo Langefors & Kihlström esse método tem bom funcionamento tanto em rochas fraturadas como em um maciço coeso, diferentemente de um desmonte ordinário, que tem comportamento diferenciado dependendo da coesão da rocha.

Ainda segundo Langefors & Kihlström uma característica notável deste método é o fato de não se formarem fraturas no fundo do furo de mina. Essa peculiaridade é vantajosa para o corte, pois forma uma parede homogênea em toda a extensão do furo, porém torna-se um inconveniente durante o desmonte ordinário posterior, pois os furos de mina próximos à face livre necessitarão de uma carga de fundo mais potente que a carga do furo para que não exista a formação de “repé”, quando a rocha em torno do fundo no furo não é fraturada gerando uma superfície de fundo irregular.

O corte no pré-fissuramento é bastante homogêneo, mesmo próximo ao fundo, o que permite que o desmonte seja feito em camadas, podendo gerar paredes de grande altura e superfície regular.

Um exemplo clássico da possibilidade de desmonte em camadas é do pré-fissuramento feito durante a construção da usina hidroelétrica do rio Niagara.

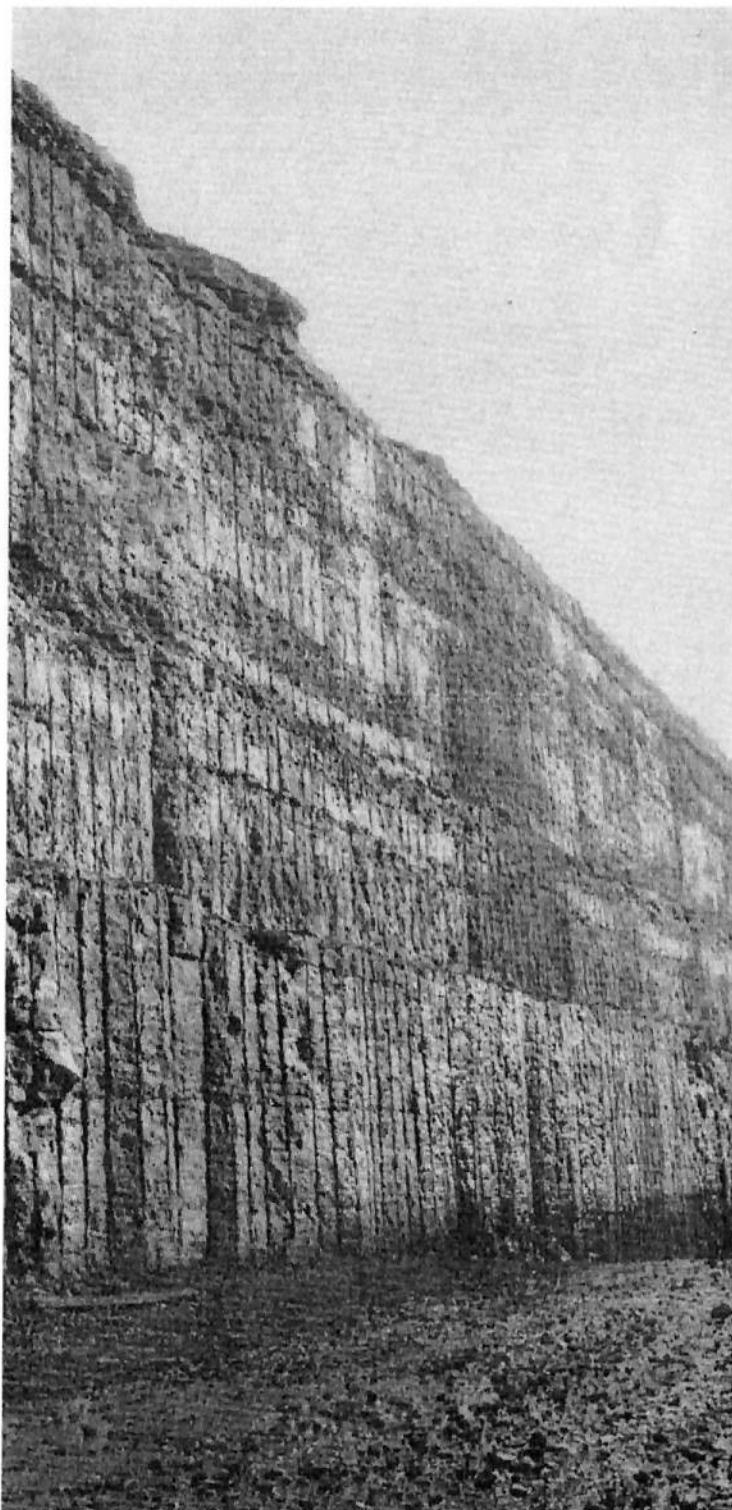


Figura 9 – Corte feito para a construção da usina hidroelétrica do rio Niagara, EUA – Langefors, U.. Kihlström, Björn. (1978)

Nessa figura é possível observar a capacidade do método de pré-fissuramento de produzir superfícies regulares, bem como a possibilidade de se fazer o desmonte em camadas.

4.1. Valores práticos de pré-fissuramento

Existem diversas tabelas relacionando o espaçamento dos furos de mina com diâmetro dos mesmos, essas tabelas tentam fornecer um guia para a criação dos planos de fogo, porém os valores geralmente são muito amplos e as vezes incoerentes entre autores.

Como referência o autor coloca a tabela sugerida por Langefors & Kihlström no livro *The Modern Technique of Rock Blasting* (1978).

Tabela 1 – Parâmetros de espaçamento para pré-fissuramento em função do diâmetro do furo – Langefors, U..
Kihlström, Björn. (1978)

Diâmetro do furo <i>d</i>	Concentração de carga <i>l</i>		Tipos de carga	Pré-fissuramento <i>E₁</i>	
	mm (in)	kg/m (lb/ft)		m (ft)	
30 (1½)			Gurit	0.25–0.	(1–1½)
37 (1¾)	0.12 (0.08)		Gurit	0.30–0.5	(1–1½)
44 (1¾)	0.17 (0.11)		Gurit	0.30–0.5	(1–1½)
50 (2)	0.25 (0.17)		Gurit	0.45–0.70	(1½–2)
62 (2½)	0.35 (0.23)		Nabit 22 mm	0.55–0.80	(2–2½)
75 (3)	0.5 (0.34)		Nabit 25 mm	0.6 –0.9	(2–3)
87 (3½)	0.7 (0.5)		Dinamite 25 mm	0.7 –1.0	(2–3)
100 (4)	0.9 (0.6)		Dinamite 29 mm	0.8 –1.2	(3–4)
125 (5)	1.4 (0.9)		Nabit 40 mm	1.0 –1.5	(3–5)
150 (6)	2.0 (1.3)		Nabit 50 mm	1.2 –1.8	(4–6)
200 (8)	3.0 (2.0)		Dynamite 52 mm	1.5 –2.1	(5–7)

5. DESMONTE SUBAQUÁTICO

O desmonte subaquático é um tipo especial de desmonte, diferindo de um desmonte convencional pois em geral não existe uma face livre paralela ao furo de mina, isso não permite a reflexão das ondas de choque, dificultando a fragmentação da rocha.

Como existe uma situação de confinamento da carga do furo de mina o cálculo da quantidade explosivo necessária deve ser calculado utilizando-se a teoria do crateramento.

Existem diversos equacionamentos possíveis para cálculo dos parâmetros do plano de fogo para desmonte subaquático, todos baseados na teoria do crateramento. Neste trabalho será utilizado o equacionamento proposto por Jimeno & Jimeno no livro *Drilling and Blasting of Rocks* (1987).

Esse método foi escolhido por ter maior embasamento teórico e por ser mais adaptável a diferentes situações.

Inicialmente deve-se calcular a altura equivalente da coluna de água e solo expressa em função da altura de rocha. Com esse comprimento pode-se avaliar a “pressão” que o explosivo terá que vencer para conseguir fragmentar a rocha.

$$H_e = \frac{\rho_a}{\rho_r} \times H_a + \frac{\rho_{mr}}{\rho_r} \times H_{mr} + H_r \quad [m]$$

Sendo, $\rho_a, \rho_{mr}, \rho_r$ as densidades respectivamente da água, do recobrimento eventualmente existente da rocha, e da rocha; e H_a, H_{mr}, H_r as alturas respectivamente de água, do recobrimento e da rocha.

Com a altura equivalente o próximo passo é calcular a razão de carregamento volumétrica (*powder factor*):

$$CE = 0,5[kg \times m^{-3}] + 0,1[kg \times m^{-3}] \times H_e \times 1[m^{-1}]$$

Um parâmetro que não é calculado, mas definido em projeto é a concentração de carga linear, que depende do tipo de explosivo utilizado.

$$q_l = \rho_e \times \pi \times r_e^2 \quad [kg/m]$$

Sendo ρ_e, r_e respectivamente a densidade e o raio do cartucho do explosivo.

Com o *power factor* e a razão de carga linear pode-se calcular a área efetiva de fraturamento:

$$A_a = \frac{q_l}{CE} \quad [m^2]$$

Como não existe uma face livre, não existe vantagem em se utilizar valores de espaçamento e afastamento diferentes, por isso normalmente utiliza-se afastamento e espaçamento iguais o que implica em $S = B = \sqrt{A_a}$.

Com um padrão quadrado de furação o fundo do furo gera um cone, isso implica na necessidade de uma subfuração de 0,7 vezes o afastamento, $J = 0,7B$.

Com os valores de afastamento, espaçamento e subfuração pode-se calcular o volume de rocha desmontada por cada furo.

$$VR = A_a \times H_r + \frac{A_a \times J}{3} \quad [m^3]$$

Cada furo deverá ter uma carga proporcional ao volume de rocha a ser fragmentada:

$$Q_b = CE \times VR \text{ [kg]}$$

O comprimento da carga será:

$$l = \frac{Q_b}{q_l} \text{ [m]}$$

Assim o tampão terá o seguinte comprimento:

$$T = H_r + H_{mr} + J - l \text{ [m]}$$

Esse método de cálculo permite o cálculo de todos os parâmetros necessários para um desmonte em uma situação de confinamento, a única consideração deve-se no caso de o desmonte ser feito em um local sem o lençol de água, ou com um lençol muito estreito.

Nesses casos o comprimento do tampão deve ser verificado para não haver a formação de “plumas” e uma consequente perda de poder de fragmentação, já que em situações de camada de água de mais que alguns metros a pressão exercida é capaz de segurar com força suficiente para não se necessitar de tampão.

6. CONSIDERAÇÕES

O método de cálculo para desmonte subaquático proposto por Jimeno & Jimeno (1997) gera uma fragmentação maior do que a necessária para a criação da linha de descontinuidade. Segundo o autor esse valor de carga gera blocos de no máximo 40x40x40 cm.

Esse valor de tamanho de bloco é bastante conveniente para desmontes subaquáticos, pois blocos de menor diâmetro facilitam a remoção do material desmontado. Essa operação é mais complexa que a remoção de material de um desmonte a céu aberto, assim a não criação de grandes blocos, os matações, é essencial.

Como para o pré-fissuramento não existe a necessidade da criação de blocos, na verdade essa situação é extremamente indesejada, o carregamento volumétrico, a relação entre a quantidade de explosivo e o volume de rocha sobre o qual cada furo deverá atuar, deve ser bem menor que o calculado pelo método de Jimeno & Jimeno.

Segundo Langfors & Kihlstrom (1987) pra criar-se uma linha de corte recomenda-se utilizar apenas um décimo do valor de carga que seria utilizado para um desmonte convencional. Assim propõe-se que se utilize apenas um décimo do valor de carga calculado pelo método de Jimeno & Jimeno.

Como a literatura mostra que quando da utilização da técnica de pré-fissuramento o corte feito pelo desmonte ocorre em toda a extensão dos furos, inclusive no fundo do furo, isso remove a necessidade de subfuração, que é muito comum em desmontes convencionais, inclusive no desmonte subaquático.

Assim, para a utilização desse método deve-se, proceder da seguinte maneira:

- Inicialmente define-se a profundidade do corte, normalmente a altura que se deseja remover, mas caso seja necessário pode-se fazer o corte em degraus.
- Escolhe-se o diâmetro do furo de mina e do explosivo que será utilizado, essa decisão normalmente está associada aos equipamentos disponíveis, porém deve-se ressaltar a recomendação de utilizar-se furos, e consequentemente explosivos, de pequeno diâmetro.
- Efetuam-se os cálculos propostos por Jimeno & Jimeno para desmonte subaquático fazendo as devidas alterações (não se colocando camada de água ou *overburden*).
- Com o espaçamento definido divide-se o carregamento total obtido por 10, para que haja somente a criação de um corte.
- Durante a preparação do furo de mina deve-se fazer uma distribuição o mais homogênea possível da carga no furo e evitando-se ao máximo comprimir a carga para que exista uma folga entre a carga e a parede do furo. (Aqui a idéia deve ser produzir o desacoplamento entre furo e explosivo, utilizando-se carga encartuchada de diâmetro menor que o furo de mina)
- A detonação deve ser feita de modo instantâneo, ou com o menor atraso possível entre cada furo de mina.

7. CÁLCULO

Para exemplificar a utilização desse método de cálculo proposto será feito um cálculo de uma situação de desmonte hipotética, para sanar qualquer possível dúvida com relação à técnica.

Supondo a necessidade de criação de uma linha de corte com 8 m de profundidade.

Para garantir um face regular escolheu-se um diâmetro de furo de 51 mm e diâmetro de cartucho de explosivo de 32 mm e densidade de 1 g/cm^3 , esses valores foram escolhidos por serem diâmetros e broca e cartucho facilmente encontráveis, porém seria recomendável, se possível utilizar-se valores menores caso se deseje uma superfície mais uniforme.

Valores de diâmetro de carga maiores são possíveis, porém não recomendáveis, pois poderia começar a produzir gretas em diferentes direções que não a desejada.

Como não há camada de água ou solo superficial a altura equivalente é igual a altura de rocha, $H_e = 8 \text{ m}$.

$$CE = 0,5 + 0,1 \times 8 = 1,3 \text{ kg/m}^3$$

Na razão de carregamento linear deve-se ter cautela com as unidades dos parâmetros, e lembrar-se que essa não será a razão efetivamente utilizada durante o carregamento dos furos.

Outro ponto importante é que utiliza-se o raio da carga de explosivo para calcular a razão de carregamento, já que a carga será desacoplada.

$$q_l = 1000 \times \pi \times 0,016^2 = 0,8 \text{ kg/m}$$

$$A_a = \frac{0,8}{1,3} = 0,62 \text{ m}^2$$

Mesmo sendo somente uma linha e não uma malha como em um desmonte comum, assumir a área afetada como sendo quadrada, e não circular, não afeta significativamente o resultado final.

$$S = B = \sqrt{0,62} = 0,78 \text{ m}$$

O volume afetado nesse caso não deve incluir nenhum tipo de subfuração, gerando nesse caso um paralelogramo.

$$VR = 0,62 \times 8 = 4,96 \text{ m}^3$$

A carga total aqui ainda não está sendo divida por 10, isso será feito apenas no final do cálculo.

$$Q_b = 1,3 \times 4,96 = 6,45 \text{ kg}$$

O comprimento encontrado que a carga ocupará será o mesmo, a diferença principal ser dará na razão de carregamento.

$$l = \frac{6,45}{0,80} = 8 \text{ m}$$

O comprimento calculado para o tampão deve ser averiguado com cautela, pois, como no exemplo dado a carga ocuparia todo o comprimento do furo, não havendo espaço para o tampão, porém como a carga será reduzida haverá espaço suficiente para a utilização do tampão. A literatura recomenda a utilização de um tampão de 15 a 20 vezes o diâmetro do furo de mina.

$$T = 8 - 8 = 0 \text{ m}$$

Depois de procedido como conforme a metodologia proposta por Jimeno & Jimeno deve-se então alterar os valores necessários.

$$q'_l = \frac{q_l}{10} = \frac{0,8}{10} = 0,08 \text{ kg/m}$$

$$Q'_b = \frac{Q_b}{10} = \frac{6,45}{10} = 0,65 \text{ kg}$$

Como seria muito completo utilizar uma carga com densidade tão baixa o recomendado é utilizar-se espaçadores entre os cartuchos de explosivos. Recomenda-se utilizar espaçadores para que os cartuchos não fiquem compactados no fundo do furo, pois isso poderia atrapalhar o corte.

8. CONCLUSÕES

As técnicas de desmonte de contorno são ferramentas de vital importância para trabalhos em mineração, porém ainda hoje não existem métodos com forte embasamento teórico para a utilização dessas técnicas.

Esse trabalho propôs um avanço na parametrização do método de pré-fissuramento, de forma a utilizar-se de uma teoria bem consolidada, mesmo em face das considerações feitas.

Porém os resultados encontrados, utilizando-se o modelo criado e tendo como base o método proposto por Jimeno & Jimeno, são bastante próximos dos valores disponíveis na literatura.

Para trabalhos futuros pode-se testar a validade dos parâmetros utilizados no modelo, pois apesar de serem fundamentados em uma teoria universalmente aceita no equacionamento foram utilizados parâmetros calculados com base na experiência dos autores.

Outros autores propuseram equacionamentos para desmontes subaquáticos, eventuais substitutos ao equacionamento utilizado como base para o modelo criado, que talvez possam resultar em um modelo mais preciso, porém, para comprovar qual equacionamento possui a melhor aderência seriam necessários testes de campo, que estão além do escopo desse trabalho.

9. REFERÊNCIAS

Langefors, U.. Kihlström, Björn. **The modern technique of rock blasting.** 3d ed. Stockholm, AWE/GEBERS New York, Halsted Press, c1978. 438 p.

Lopez Jimeno, Carlos. Lopez Jimeno, Emilio. Ayala Carcedo, Francisco Javier. **Drilling and blasting of rocks.** London, Taylor & Francis, c1995. xiii, 391 p. Tradução de: Manual de perforacion y voladura de rocas, c1987.

Hustrulid, W. A.. **Blasting principles for open pit mining.** Rotterdam, Balkema, 1999. 2 v. (xvi, vii, 1013 p.).

International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting Lulea University of Technology, Holmberg, Roger.1996

E.I. du Pont de Nemours & Company. **Blasters' handbook; a manual describing explosives and practical methods of use.** Wilmington, Del.1988

Persson, Per-Anders; Holberg, Roger. **Rock blasting and explosives engineering.** Boca Raton.1987.