



Universidade Federal De Ouro Preto
Escola de Minas – EM
Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN
Campus Morro do Cruzeiro



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

**DIMENSIONAMENTO DE PLANOS DE FOGOS REDUZINDO A
FORMAÇÃO DE MATAÇÕES PROVENIENTES DE DESMONTES DE
ROCHAS**

João Pedro Veloso Bernardes

Ouro Preto
Julho de 2022

João Pedro Veloso Bernardes

**DIMENSIONAMENTO DE PLANOS DE FOGOS REDUZINDO A
FORMAÇÃO DE MATAÇÕES PROVENIENTES DE DESMONTES DE
ROCHAS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

**Ouro Preto
DEMIN/EM/UFOP
Julho de 2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B522d Bernardes, João Pedro Veloso.
Dimensionamento de planos de fogos reduzindo a formação de
matações provenientes de desmontes de rochas. [manuscrito] / João
Pedro Veloso Bernardes. - 2022.
52 f.: il.: color., gráf..

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração a céu aberto. 2. Rochas - Perfuração. 3. Desmonte de
rochas. 4. Detonação. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.24

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Pedro Veloso Bernardes

Dimensionamento de Planos de Fogos reduzindo a formação de matacões provenientes de Desmontes de Rochas

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

Aprovada em 28 de julho de 2022

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
MsC Alcides Eloy Nuñez Cano - Universidad Federla de Catalão
Eng Jhors Enrique Casimiro Huayhua - DNA Blast - Group

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/08/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 11:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0377457** e o código CRC **5FA9C657**.

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise de um plano de fogo em uma lavra a céu aberto, para tal caso são revisadas as operações de perfuração e desmonte usando a abordagem de programação estruturada. O objetivo deste trabalho é criar uma análise, através da qual sejam inseridos a densidade do explosivo, diâmetro e inclinação da perfuração, resistência à compressão da rocha e dimensões da bancada. Em seguida, obtém-se o valor das variáveis mais importantes que condicionam o dimensionamento da operação de perfuração e desmonte, tais como: altura da bancada, carga, espaçamento, carga do furo, número de furos, fator de carga, entre outros. Para o dimensionamento do plano de fogo é necessário realizar alguns cálculos matemáticos e levar em consideração diversas variáveis. Devido ao exposto, é necessário conceber um método que permita obter um projeto de detonação mais simples em menos tempo. Por este motivo, foi criado um algoritmo, que permite calcular todas as variáveis necessárias para o dimensionamento ideal do desmonte, inserindo os dados chave para o referido cálculo. Trata-se de uma pesquisa de revisão bibliográfica, que permite explicar e discutir o tema a partir de referências publicadas em trabalhos acadêmicos como artigos, livros, dissertações, teses, dentre outros. Os artigos e periódicos disponíveis em base de dados são fontes amplamente utilizadas e que permitem aprofundar ainda mais o estudo.

Palavras-chave: Perfuração. Detonação. Desmonte. Rocha.

ABSTRACT

This study is focused over drilling and blasting operations design and analysis in surface mining using the structured programming approach. The main of this job is to create an interface, through the density of the explosive, diameter and inclination of the perforation, compressive strength of the rock and dimensions of the bench are entered. Then, we obtain the value of the most important variables that are used in the dimensioning of the drilling and blasting operation, such as: bench height, load, spacing, heel, hole load, number of holes, load factor, among others. For the blasting dimensioning, it is necessary to perform some mathematical calculations and take into account several considerations, which make this operation complex. Due to the above, it is necessary to devise a method that allows to obtain a simpler blast project in less time. For this reason, an algorithm was created, which allows the calculation of all the variables necessary for the ideal dimensioning of the blast, inserting the key data for that calculation. This is a bibliographic review research, which allows to explain and discuss the topic starting from references published in academic works such as articles, books, dissertations, theses, among others. The articles and periodicals available in the database are widely used sources that allow further study of the study.

Keywords: Drilling. Detonation. Blast. Rock.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Parâmetros do plano de fogo	29
Figura 2 - Esquema de Bancada e Praça	29
Figura 3 - Diâmetro do furo	38
Figura 4 - Temporização e número de linhas	39
Figura 5 - Pressão Hidrostática	40
Figura 6 - Profundidade dos furos x densidade dos explosivos	40
Figura 7 – Modelo de furo utilizado	41
Figura 8 – Distribuição dos furos.....	41
Figura 9 – Amarração dos furos.....	42
Figura 10 – Temporização dos furos.....	42
Figura 11 – Deslocamento preferencial por furo em direção a face da bancada.....	43
Figura 12 – Furos detonados.	43
Figura 13 – Distribuição de energia.....	43
Figura 14 – Etapas da análise de fragmentação.....	44
Figura 15 – Temporização.....	46

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Formulação do problema	12
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos	13
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	13
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Plano de fogo	15
2.2	Escavação por perfuração e detonação de rochas	15
2.2.1	<i>Retilidade do furo</i>	19
2.2.2	<i>Tipos de perfuratrizes</i>	20
2.2.3	<i>Dimensionamento e seleção das perfuratrizes</i>	21
2.3	Perfuração de rocha	21
2.4	Desmonte	22
2.5	Variáveis de projeto de explosão	23
2.6	Algoritmo	25
2.7	Explosivos e acessórios de detonação	25
2.7.1	<i>Propriedades dos explosivos</i>	26
2.7.2	<i>Tipos de explosivos</i>	27
2.7.3	<i>Escolha do explosivo</i>	27
2.7.4	<i>Carregamento dos explosivos</i>	28
2.8	Principais parâmetros de um plano de fogo	28
3	TIPOS DE ROCHAS PRESENTES EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS	31
3.1	Rochas sedimentares	31
3.2	Tipos de metamorfismos	32
3.3	O problema da escavação de rochas	32
4	Influência do desmonte de rocha nas operações subsequentes	34
4.1	Análise da distribuição granulométrica em detonações	35
4.2	Aspectos ambientais nos desmontes com explosivo em pedreiras de área urbana	35
5	METODOLOGIA	37
6	ESTUDO DE CASO	38

6.1	Diâmetro da perfuração	38
6.2	Temporização e número de linhas	38
6.3	Densidade e pressão hidrostática	39
6.4	Simulação do estudo de caso realizado no software I-Blast.....	40
	<i>6.4.1 Configurações dos furos</i>	<i>41</i>
	<i>6.4.2 Distribuições dos furos.....</i>	<i>41</i>
	<i>6.4.3 Amarração e temporização dos furos</i>	<i>42</i>
	<i>6.4.4 Deslocamento preferencial por furo</i>	<i>42</i>
	<i>6.4.5 Furos detonados</i>	<i>43</i>
	<i>6.4.6 Distribuição de energia</i>	<i>43</i>
	<i>6.4.7 Análise de fragmentação</i>	<i>44</i>
7	RECOMENDAÇÕES	45
8	conclusão	47
9	referências.....	49

1 INTRODUÇÃO

Na última década, a mineração na Colômbia ganhou grande relevância na economia nacional. Tal contribuição econômica está vinculada ao acréscimo das exportações minerais, a qual reflete no Produto Interno Bruto (PIB) da Colômbia (Cárdenas e Reina, 2008). No cenário de mineração nacional há setores que possuem destaque, entre eles pode ser citado: ouro, indústria de ferroníquel e setor de carvão. Nos dois últimos anos são estes dois últimos são principalmente possíveis pela aplicação de métodos de mineração a céu aberto.

Nos processos (operações) de lavra a 'Céu Aberto', são considerados metodologias de produção ótima, visando explorar maiores massas minerais, atingindo um melhor aproveitamento da jazida. Nesse entender, as atividades de lavra procuram envolver critérios racionais de produção sob modelos produtivos que integrem as tarefas como atividades de interdependentes (e não apenas como se forem tarefas isoladas ou atividades sequenciadas). Por conseguinte, uma produção otimizada é definida como resultado que leva em consideração os critérios de 'melhor lucro possível', uma vez que, as variáveis que definem uma produção ótima visa harmonizar e satisfazer os requerimentos e particularidades e, restrições intrínsecas associadas a cada tarefa individual (Hustrulid e Kuchta, 2006).

A operação de perfuração e desmonte afeta diretamente o custo da operação e os custos operacionais totais (Busuyi, 2009). Na mineração, a otimização é realizada por meio da avaliação e análise de cada uma das operações unitárias necessárias para a extração do recurso mineral de interesse (Afeni e Osasan, 2009). Uma delas é a operação de perfuração e desmonte, que é um dos métodos de remoção de material mais utilizados, pois permite obter uma maior quantidade de material removido em menor tempo (Melieh et al., 2009). Pode ser utilizado em rochas com diferentes propriedades físicas e mecânicas, além de oferecer uma fragmentação adequada do material, aspecto essencial para a remoção e transporte do material detonado.

Este artigo apresenta a análise de um projeto de 'plano de fogo' e da operação de perfuração e desmonte em mineração de superfície. A metodologia utilizada foi a programação estruturada, que permite a análise de algoritmos que, por meio da entrada de dados (variáveis de entrada) e da execução de determinados cálculos

(processamento), é possível encontrar a solução para determinado problema de maneira sequencial.

Para o dimensionamento da detonação é necessário realizar alguns cálculos matemáticos e levar em consideração algumas variáveis, que tornam esta operação complexa. Devido ao exposto, é necessário conceber um método que permita obter um projeto de detonação mais simples em menos tempo.

1.1 Formulação do problema

No decorrer do trabalho houve algumas considerações em situações nas operações de carregamento, transporte e britagem primária que impactam os custos de produção empresarial, estes impactos são agrupados a devida posição da empresa perante o desmonte de rocha através de detonações formando matacões em comparação ao esperados pelos equipamentos de carregamento, transporte e britagem primária, tornando-se difícil a movimentação e ao processo de aquisição do produto final. Com isso, alguns problemas foram destacados tais como: enchimento incompleto das caçambas; elevados custos de manutenção dos equipamentos de cargas, transporte e britagem primária ineficaz causando uma elevação do ciclo dos equipamentos de cargas e transporte. Por esse motivo, a problemática alertada é: eficácia da meta de fogo quanto á otimizar as operações de carregamento, transporte e britagem de rocha.

1.2 Justificativa

A temática utilizada quanto ao desenvolvimento da elaboração em solucionar os problemas observados durante o processo de desmonte de rocha concluiu-se que na determinada unidade de produção, se depara com dificuldades nas operações de carregamento, transporte e britagem, conforme a existência de fragmentos não esperados criado pelo desmonte com a utilização de explosivos. A perfuração de

desmontes de rochas com explosivos operações primárias ocorridas no cenário da mineração, a perfuração tem o objetivo de abrir furos com distribuição e geometria correta no interior dos maciços alojando as cargas nas rochas por intermédio de explosivos e acessórios marcadores.

O desmonte de rocha é uma atividade que faz parte no ciclo de produção mineral, cujo propósito é desmontar a rocha. Tradicionalmente, na escala de produção industrial é utilizado o explosivo para sua fragmentação. As operações de remoções, de carregamento e transporte de material na frente de lavra que são de suma relevância pois determina-se 60% de custos em lavras a céu aberto e estes quando adicionados com as operações de britagem podendo-se elevar os custos e afetar de maneira negativa a produção da empresa (COUTO,1990). A minimização desses custos promove economia consideráveis para empresas. Quanto á resolver esta problemática é essencial que o desmonte de rocha ocasione em uma fragmentação adequada gerando uma granulometria que esteja dentro dos padrões propostos. Para isso, o dimensionamento do plano de fogo necessita é de crucial importância nesse processo. Sendo que um ótimo dimensionamento não só reduzirá os custos nas operações, mas sim, diminuir diversos danos ambientais como por exemplo: as vibrações pelo terreno, ruídos, gases, lançamento de blocos e minando também danos na infraestrutura em volta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Melhoramento do plano de fogo sob a ótica de otimizar custos, as operações de carregamento, transporte e britagem primária.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Desempenhar um comparativo quanto o desmonte de rocha aplicado pela instituição empresarial com o proposto pelo autor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Plano de fogo

Silva (2009) conceitua plano de fogo como um plano que envolve recursos que possibilitam perfurar e detonar corretamente por meio de equipamentos previsto para este tipo de serviço e dos tempos necessários ao cumprimento do cronograma.

De acordo com Geraldi (2011), plano de fogo é o projeto executivo para o desmonte de rocha com utilização sistemática de explosivos, onde são estabelecidos e demonstrados preliminarmente: o plano de perfuração, a qualificação e quantificação de explosivos, os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados.

De acordo com o autor a parte inicial de um plano de fogo diz respeito à determinação do explosivo e sua maneira de detonação. Seguem-se a verificação do projeto e o estudo do tempo. O planejamento de uma detonação engloba a consideração de uma série de parâmetros que influenciam de maneira direta no resultado do desmonte (GERALDI, 2011).

Na visão de Silva (2009) e de Geraldi (2011) compreende-se que o plano de fogo é o projeto fundamental que contém os dados e as descrições quanto a perfuração e o desmonte de rochas com explosivo.

2.2 Escavação por perfuração e detonação de rochas

A perfuração de rocha é a primeira tarefa a ser realizada nas operações relacionadas à produção de minério/estéril; tal atividade tem o propósito de realizar furos ou aberturas de formato cilíndrico no maciço rochoso, com o intuito de alojar a massa explosiva e, os acessórios a serem usados na quebra do material (Silva, 2009). Por tanto, verifica-se a relevância da perfuração nos resultados de uma fragmentação desejada. Por outro lado, se a perfuração não for adequada, isto é, as dimensões

geométricas do arranjo dos furos não forem idôneas ou, o diâmetro do furo não é condizente com a malha de perfuração, então, ter-se-á uma fragmentação deficiente; além disso, excesso de vibração, pressão aérea, ultra lançamento, presença de matacões, re-pé.

Assim, é possível verificar que a perfuração da rocha é de suma importância para o sucesso do desmonte de rocha com a utilização de explosivos, afinal uma perfuração errônea no maciço pode acarretar diversos problemas como, por exemplo, a fragmentação deficiente, o excesso de vibrações, o excesso de ruídos e o ultra lançamento. Para garantir que a operação de perfuração seja eficiente é fundamental adotar um agrupamento de uma força de avanço, de rotação e de limpeza específicas ao tipo de rocha (ASSAKKAF, 2003; SILVA, 2009).

O método de escavação de uma “rampa” diz respeito à qualidade do maciço rochoso em que é realizada dita escavação. Pelo exposto, há diferentes procedimentos de escavação segundo o tipo de material (maciços fracos x competentes). Por outro lado, o grau de perturbação no maciço rochoso condiciona a metodologia e os equipamentos usados na escavação da rampa. Assim sendo, na escavação convencional são requeridos equipamentos de perfuração e explosivo para desmonte de rochas, caso a rocha seja competente, caso contrário, são utilizados sistemas de perfuração contínua (TBM). É importante destacar que, a seleção de um método de escavação é definida segundo análise de ‘tipo ou finalidade do labor’, ‘auto suporte’ e ‘recuperação de investimento’.

O método de construção de uma rampa mais usado é através do uso de equipamentos de perfuração e desmonte com explosivos. Tal método consiste em realizar aberturas na rocha de formato cilíndrico; cujo diâmetro do furo é função direta da área a ser escavada, bem como, da energia usada na quebra do material rochoso. Assim também, o comprimento do furo, é associado à rigidez do material (‘seção de trabalho do explosivo e maciço rochoso’). As partes elementares ou obras das quais o ciclo de trabalho característico deste sistema consiste são as seguintes:

- Estacando na frente do esquema
- Carregamento dos furos com explosivos
- Remoção de detritos e higienização da frente.

O esquema de tiro é o arranjo na frente do túnel das brocas a serem perfuradas, a carga explosiva que será introduzida em cada um e a ordem em que cada buraco será detonado.

Os esquemas indicados referem-se à fase avançada ou construtiva do túnel. Para as seguintes fases de destruição, há a possibilidade de perfurar a frente, com perfuratrizes com braços horizontais, ou em um banco com perfuratrizes com braços verticais.

Para selecionar a melhor alternativa ou solução é necessário proceder sistematicamente; primeiramente é necessário um estudo anterior, que permite recomendar uma solução. Em seguida vem a fase preliminar do projeto da solução ou soluções recomendadas e, finalmente, o projeto do trabalho completo. Abaixo estão as fases que devem ser consideradas na construção de um túnel:

- O objetivo da obra subterrânea
- A geometria do Projeto: layout e seção de tipo
- A geologia e geotecnia do maciço
- O sistema construtivo
- A estrutura resistente: o Cálculo
- As instalações para a exploração

A perfuração com buracos horizontais, tem a vantagem de que o mesmo sistema de máquinas e trabalhos é utilizado para a fase de avanço e, além disso, a forma teórica do túnel pode ser aparada com a detonação.

Por outro lado, a detonação vertical é mais rápida de ser realizada, com menor consumo de explosivos, e não precisa da remoção de detritos em cada detonação, contudo, necessita de um corte subsequente para alcançar o perfil do túnel nas empenas. Os orifícios devem ter um comprimento 5-10% maior do que a distância que você deseja avançar com o comprimento de avanço, uma vez que sempre há perdas que impedem você de ter o máximo de aproveitamento.

Os comprimentos típicos de avanço são entre 1 e 4 metros e são definidos de acordo com a qualidade da rocha: quanto melhor a qualidade do terreno, maiores os

possíveis avanços. Com uma rocha de qualidade média boa é comum perfurar brocas de 3 a 3,50 metros para avançar entre 2,80 e 3,20 metros em cada detonação.

Dependendo desta ordem, quatro zonas são distinguidas dentro de uma malha, e cada uma tem um tratamento diferente. Para perfuração e detonação, a seção teórica do túnel é dividida em zonas, nas quais os requisitos, tanto a densidade de perfuração, quanto a sequência específica de carga explosiva e ignição são diferentes.

É obviamente de extrema importância que os furos sejam perfurados nos lugares certos com a inclinação certa. A marcação dos furos na face da rocha e a perfuração devem ser realizados exatamente. A principal diferença entre a explosão do túnel e a detonação do banco é que a detonação do túnel é feita em direção a uma superfície livre, enquanto a detonação do banco é feita com duas ou mais superfícies livres.

Portanto, a rocha é muito mais restrita no caso de túneis e uma segunda face livre deve ser criada para a qual pode quebrar a rocha. Esta segunda face é produzida por meio de um buraco paralelo, tensão em V, tensão do ventilador ou outros métodos de abertura. Depois que a tensão for realizada, a destruição em direção a ela pode ser iniciada.

O “wreck” pode ser comparado a uma explosão de banco, mas requer uma carga específica maior devido ao maior desvio da perfuração, à fragmentação desejada e ausência de inclinação do orifício. Uma das classificações mais recentes dos métodos de escavação de rochas sob poço ou subterrâneo, é a feita por Saez de Santa María, que estabelece como fator-chave os rendimentos que podem ser obtidos analisando a escavação da rocha contra os diferentes sistemas de avanço e o sistema que é utilizado para a extração dos detritos resultando no avanço estimado da frente.

Como indicação, as seguintes observações são coletadas abaixo, dependendo do tipo de terreno a ser escavado:

- Solos soltos para semicompactos; areias, cascalhos, lodo, lodo superior, argilas médias com umidade média, detritos rochosos. Máquinas de médio a baixo poder são usadas: verrugas dianteiras, escavadeira universal.
- Solos compactos à rocha macia; argilas duras, argilas mixtas, massa de rocha altamente fissurada ou estratificada, rocha macia e rocha fragmentada pelo uso

de explosivos. São terras que precisam de desintegração com um assustador ou arado. Máquinas de médio a alta potência (mais de 80 HP) são usadas.

- Rocha de dureza média; rocha calcária, ardósia, conglomerados e rochas moderadamente estratificadas, rochas altamente alteradas e minerais macios. Máquinas com mais de 140 HP de potência são usadas, a desintegração usando explosivos de baixa potência ou assustadores pesados sempre será necessária.
- Rocha dura; rochas calcárias duras ou sílices, rochas ígneas e metamórficas e massas de pequenas rochas alteradas, quartzito e minerais de baixa densidade. Eles só podem ser escavados por máquinas especiais para cada caso, explosivos de médio porte são usados.
- Rocha extremamente dura; rochas ígneas não localizadas como granito, diorito, rochas metamórficas duras, minerais densos. Máquinas especialmente projetadas e o uso de explosivos de alta potência são necessários.

A perfuração de túneis em solo macio faz com que a escavação em si e o tratamento da terra sejam misturados, com isso, surgem muitos sistemas de execução tais como: escudos, pré-corte mecânico, pré-fechamento a jato, congelamento, até mesmo suporte com shotcrete, esse que por sua vez seja de forma semelhante aos túneis de rocha. No caso dos túneis rochosos, dada a variabilidade dos diferentes fatores envolvidos na mecânica das rochas, é comum abordar seu estudo através das chamadas classificações geomecânicas, entre as quais destaca-se a classificação geomecânica da RMR.

A resistência à compressão é um parâmetro frequentemente usado para se ter uma ideia se um sistema de escavação é aplicável ou não.

2.2.1 Retilidade do furo

Segundo Silva (2009), durante o processo de perfuração do furo, a retilidade sofre variações conforme o tipo da rocha, assim como, do diâmetro e da profundidade

do furo, da metodologia das condições do equipamento aplicado e da experiência do profissional que opera a ação da perfuração. Nesse momento de perfuração, tanto horizontal quanto inclinada, o peso da coluna de perfuração pode concorrer para o desvio do furo.

De acordo com Quaglio (2003), para conseguir compensar o desvio dos furos é necessário furar com um menor espaçamento resultando em um custo mais elevado. Destaca-se que é fundamental obter a retilinidade dos furos, uma vez que uma das problemáticas específicas ocasionadas por furo com desvios é a possibilidade de se deparar com um outro furo perfurado anteriormente, além disso, há a possibilidade do equipamento se prender e isso pode fazer com que a detonação não ocorra de forma satisfatória.

2.2.2 Tipos de perfuratrizes

De acordo com Geraldi (2011), os maquinários de perfuração são classificados em quatro agrupamentos, conforme os princípios mecânicos utilizados para realizar a perfuração:

- Percussão: reproduz um giro na broca de maneira imediata após cada golpe. Esse giro é desempenhado sempre em um arco de círculo pequeno e descontínuo. Desse modo, ocorre a perfuração manual;
- Rotação: transmite à broca apenas o movimento de rotação, sendo capaz de demolir a rocha por meio de corte, de abrasão e de esmagamento;
- Roto-percussiva: transmite a percussão e a rotação contínua, em velocidade ajustável, o que possibilita suprir melhor cada aspecto geológico e físico exigido durante a perfuração da rocha;
- Furo-baixo: O mecanismo de percussão se encontra na extremidade da broca, juntamente à coroa, o esforço de percussão para a extremidade da broca é realizado por meio de segmentos de aço unidos.

2.2.3 Dimensionamento e seleção das perfuratrizes

Para conseguir selecionar e dimensionar as perfuratrizes é necessário seguir alguns parâmetros como, por exemplo, a velocidade de perfuração dos equipamentos, a litologia dos maciços rochosos, a tipologia da rocha que será perfurada e as condições estruturais dos maciços rochosos (SANDIN, 2015).

De acordo Geraldi (2011) para selecionar e dimensionar as perfuratrizes é necessário suprir critérios como, por exemplo, o mecanismo da perfuratriz, a tipologia da broca que vai ser utilizada, a altura máxima da perfuratriz, o diâmetro de perfuração, o tamanho da coluna principal, a profundidade de cada furo e o peso necessário para a perfuração.

Há diversos fatores que estabelecem a escolha de uma perfuratriz, entretanto a escolha deve ser realizada cautelosamente para que possa suprir as necessidades almejadas (SANDIN, 2015; GERALDI, 2011).

2.3 Perfuração de rocha

A perfuração é a primeira operação em preparação para uma detonação (Karlinski et al., 2009). Sua finalidade é abrir furos cilíndricos na rocha destinados a abrigar o explosivo e seus acessórios iniciadores. Esta operação é necessária para conseguir o confinamento do explosivo e aproveitar melhor as forças expansivas do explosivo (Yue et al., 2009).

Baseia-se em princípios mecânicos de percussão e rotação, cujos efeitos de impacto e atrito produzem o estilhaçamento e esmagamento da rocha em uma área equivalente ao diâmetro da rocha e até uma profundidade dada pelo comprimento do furo utilizado. A eficiência da perfuração consiste em alcançar a máxima penetração com o menor custo (Centro Tecnológico de Detonação EXSA S. A, 2009).

Os métodos de perfuração mais utilizados são os métodos rotativos e percussivos (Franca, 2012). Este último é o sistema de furação mais clássico. A

perfuração por rotopercussão é baseada na combinação das seguintes ações: percussão, rotação, empuxo e varredura (Wang et al., 2010).

A operação de perfuração depende diretamente da dureza e abrasividade da rocha (Corrêa, 2009). A fragmentação da rocha é considerada o parâmetro mais importante nas operações de mineração devido aos seus efeitos diretos na perfuração e detonação (Morin e Ficarazzo, 2006). A resistência da rocha determina o método ou meio de perfuração a ser utilizado: rotação simples ou percussão rotativa. Em geral, quanto mais macia a rocha, maior deve ser a velocidade de perfuração. Por outro lado, quanto mais resistente à compressão, maior força e torque será necessário para perfurá-lo Centro Tecnológico de Detonação EXSA SA (2009).

2.4 Desmonte

Theodora (2017), conceitua desmonte de rocha com explosivo como o processo de quebrar ou rasgar um corpo sólido como, por exemplo, a rocha, explodindo ou colocando-o em contato direto com alguma substância explosiva.

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), o desmonte de rocha é a explosão do material com o intuito de abrir fissuras radiais na rocha maciça empurrando a bancada para frente, resultando em blocos de rocha de tamanhos apropriados que facilitam o transporte e a entrada na boca do britador.

A detonação é um dos principais meios de extração mineral em operações de mineração a céu aberto. O principal objetivo da operação de detonação é a fragmentação da rocha e para isso é necessária uma grande quantidade de explosivos. Os explosivos liberam uma grande quantidade de energia durante a explosão, onde apenas 20-30% é usado para quebrar e deslocar rochas, enquanto o restante dessa energia é desperdiçado na forma de efeitos colaterais ambientais (Ghasemi et al., 2011).

A detonação pode ser definida como a ignição de uma carga maciça de explosivos. O processo de detonação compreende o carregamento dos furos feitos na perfuração. Com uma substância explosiva, que, quando ativada, provoca uma onda

de choque e, por meio de uma reação, libera gases em alta pressão e temperatura de forma substancialmente instantânea, para rasgar, fraturar ou remover uma quantidade de material de acordo com os parâmetros de projeto a própria detonação (Glossário Técnico de Mineração, 2003).

A fragmentação de rocha por detonação compreende a ação de um explosivo e a consequente resposta do maciço rochoso circundante, envolvendo fatores de tempo, energia termodinâmica, ondas de pressão, mecânica das rochas e outros, em um mecanismo de interação rápido e complexo. (EXSA SA Blasting Technology Center, 2019).

A fragmentação da massa rochosa é causada imediatamente após a detonação. O efeito de impacto da onda de choque e dos gases em rápida expansão na parede do furo é transferido para a rocha circundante, difundindo-se através dela na forma de ondas ou forças de compressão, causando apenas deformação elástica, pois as rochas são muito resistentes à compressão. Quando estas ondas atingem a face livre na frente de detonação, provocam tensões de tração no maciço rochoso, entre a face livre e a broca. Se a resistência à tração da rocha for excedida, ela quebra na área da linha de menor resistência (carga). Neste caso as ondas refletidas são ondas de tensão que retornam ao ponto de origem criando fissuras e fissuras de tensão a partir dos pontos naturais e planos de fraqueza existentes,

Quase simultaneamente, o volume de gases liberados e em expansão penetra nas fissuras iniciais, alargando-as por ação de cunha e criando novas, com as quais se produz a fragmentação efetiva da rocha. Se a distância entre o furo e a face livre for calculada corretamente, a rocha entre os dois pontos cederá. Em seguida, os gases restantes deslocam rapidamente a massa de material britado para frente, até perder sua resistência devido ao resfriamento e ao aumento do volume da cavidade formada na rocha. Neste momento, os fragmentos ou detritos caem e se acumulam para formar a pilha de detritos ou material detonado. Concluindo assim o processo de detonação (Centro Tecnológico de Detonação EXSA S. A, 2019).

2.5 Variáveis de projeto de explosão

- **Diâmetro do poço (D):** é o diâmetro com o qual o furo de perfuração é construído, depende principalmente do equipamento utilizado para sua construção (Centro Tecnológico de Detonação EXSA S. A, 2019).
- **Inclinação de perfuração:** o principal componente do movimento das rochas é perpendicular ao eixo dos furos, de modo que quando estão inclinados, o material é projetado para cima e para frente (Long, 2003).
- Em teoria, o deslocamento horizontal é máximo quando o ângulo dos furos é de 45°, mas na prática é comum usar inclinações não superiores a 30°. Isso se deve às características dos equipamentos de perfuração, que em alguns casos até recomendam a perfuração vertical, como é o caso de grandes equipamentos rotativos com rochas duras (Centro Tecnológico de Detonação EXSA S. A, 2019).
- **Densidade do Explosivo:** é o peso específico g/cm³ (quanto maior a densidade, maior a potência), varia entre 0,7 a 1,6 g/cm³. Todo explosivo tem uma densidade crítica acima da qual não detona mais (Karlinsku et al., 2008)
- **Resistência à compressão da rocha (s c):** é a propriedade mecânica da rocha de se opor às forças de compressão e tração (Yilmaz, 2009). Esta propriedade determina a energia que precisa ser aplicada para perfurar o maciço rochoso e condiciona em grande parte os parâmetros e características da operação de perfuração e desmonte (Zhantao e Itakura, 2012).
- **Dimensões da detonação:** inclui a área de superfície delimitada pelo comprimento da frente e a largura ou profundidade do avanço projetado (m²) pela altura da lateral ou corte (H), em m³ (Detonação Tecnológica Centro EXSA S.A, 2019).

As variáveis de projeto de detonação descritas acima são as usadas como variáveis de entrada no algoritmo para o projeto da operação de perfuração e detonação. Estas variáveis permitem obter como resultado, parâmetros fundamentais como a carga (B), espaçamento (E), altura da bancada (H), plug (T), sobre perfuração (SP), volume de carga (VC), fator de carga (PF), entre outros, que influenciam diretamente na execução de desmonte em mineração de superfície.

2.6 Algoritmo

O objetivo desta fase é mostrar o algoritmo utilizado que permite o cálculo dos parâmetros fundamentais no projeto de perfuração e detonação.

Para tanto, foram definidas quatro funções em um módulo. Essas funções permitem calcular os valores dos parâmetros: Volume de carga (VC), carga do furo (CP), Volume de material removido por furo (BCM) e fator de carga (PF).

Após a definição das funções, é apresentado o algoritmo que permite a leitura das variáveis de entrada e o cálculo de cada um dos parâmetros necessários para o desmonte.

No desenho do algoritmo foi utilizada uma condicional simples que permite o cálculo dos diferentes parâmetros tendo em conta a resistência à compressão da rocha, ou seja, se é uma rocha dura ($\sigma_c > 120$ MPa) ou uma rocha mole ($\sigma_c < 120$ MPa).

2.7 Explosivos e acessórios de detonação

Geraldi (2011) define explosivo como uma substância que sofre modificações rápidas e violentas ao ser iniciada, passando para o estado gasoso em um espaço de tempo muito curto, ocasionando grande quantidade de energia na forma de calor e de elevadas pressões.

Segundo Ricardo e Catalani (2007), os explosivos podem ser definidos como substâncias ou misturas, em qualquer um dos estados físicos da matéria, que quando são submetidos a uma causa térmica ou mecânica, com energia suficiente, seja de calor, de atrito ou de impacto, se modificam total ou parcialmente, em gases, em um período de tempo extremamente curto, desprendendo quantidade de calor significativa. Acessórios de detonação são explosivos utilizados para iniciar cargas explosivas, fornecendo e transmitindo energia para inicia-las.

2.7.1 Propriedades dos explosivos

Ricardo e Catalani (2007) apontam que é essencial compreender as propriedades dos explosivos, afinal este possui tipos distintos e cada um é utilizado para determinado serviço. Sob a ótica da escavação ao ar livre, as propriedades são classificadas em:

- Força: que é a quantidade de energia liberada na detonação, expressa em percentagem;
- Velocidade: ocorre uma reação química com a produção de luz, calor e gases a uma pressão elevada, logo após a explosão da rocha. A velocidade com que a frente da reação química avança em um explosivo de formato cilíndrico e explosivo é definido como velocidade de detonação do explosivo;
- Sensibilidade: é a capacidade de propagação da onda criada pelo explosivo de um cartucho a outro, ou de toda a coluna explosiva existente no furo. Ela pode ser afetada diretamente pela ausência de contato entre os cartuchos ou por lacunas criadas em furos mal carregados;
- Resistência à água: no momento em que se detona determinada rocha é essencial saber se existe concentração de água nos furos, afinal alguns tipos de explosivos não são resistentes à água ficando neutralizados e sem detonar. A resistência à água é medida através da quantidade de horas em que o explosivo ficou submerso à água, e ainda é suficientemente capaz de ser iniciado com eficácia e detonar completamente por meio de uma espoleta;
- Densidade: explosivos que possuem maior densidade representam concentração mais elevada de carga explosiva por metro linear de furo, elevando, conseqüentemente, a razão de carregamento que é demonstrada pela carga de explosivos, em kg, por m³ de rocha a ser detonada;
- Segurança no manuseio: até que o explosivo chegue à área de detonação, ele sofre diversos impactos, choques e transbordos, sendo essencial garantir a segurança durante o manuseio para que não haja nenhuma detonação com facilidade;

- Volume de gases: Os gases se geram no decorrer da explosão e seu volume corresponde ao volume na temperatura e na pressão de explosão, sendo dividido em classe de baixa expansão, até 800 L/Kg, e classe de alta expansão, acima de 800 L/Kg.

2.7.2 Tipos de explosivos

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), os explosivos utilizados em operações de minerações são divididos em: Pólvoras negras, Dinamites, ANFO, Granulados, Lamas explosivas, Emulsão encartuchada, Emulsão Bombeável, entre outras.

2.7.3 Escolha do explosivo

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), para que seja possível optar pelo tipo de explosivo mais adequado é fundamental considerar alguns fatores como, por exemplo, I) a dureza da rocha, se ela é dura, média ou branda; II) o tipo de rocha, se ela é ígnea, metamórfica ou sedimentar; III) a natureza da rocha, se é homogênea ou fraturada; IV) se existe a presença de água; V) se a região a que se destina, se é carga de fundo ou carga de coluna; VI) Diâmetro dos furos; VII) Custo.

Segundo Silva (2009), os fatores que precisam ser considerados no momento de escolher o explosivo são: I) tipo de desmonte; II) propriedades dos explosivos como a densidade, a velocidade, a pressão de detonação, a resistência à água e a classe dos gases; III) a segurança no transporte, no manuseio e no diâmetro da rocha; IV) condições da geologia local, aspectos da rocha a ser desmontada, assim como, as condições de ventilação dos ambientes subterrâneos e impactos ambientais ocasionados devido os desmontes de rocha.

2.7.4 Carregamento dos explosivos

O carregamento é definido por Ricardo e Catalani (2007) como a introdução dos explosivos nos furos e deve ser realizado com muito cuidado, afinal os riscos gerados dependem diretamente do carregamento e da eficácia do fogo.

De acordo com Correia (2011) o carregamento dos furos é o processo de introdução dos explosivos nas perfurações, destaca-se que o processo de carregamento deve ser cuidadosamente executado, desempenhando inicialmente a limpeza dos furos, removendo os detritos de perfuração e a água.

2.8 Principais parâmetros de um plano de fogo

Os principais parâmetros que necessitam constar em um plano de fogo são demonstrados na Figura 1, sendo relacionados em seguida. Com essas informações se procede as perfurações do maciço rochoso, ao carregamento de “fogo” e à sua detonação 9. (IRAMINA, 2015)

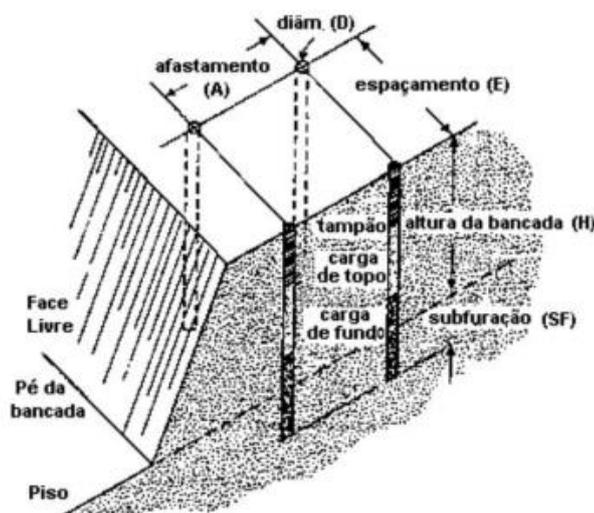


Figura 1 - Parâmetros do plano de fogo
 Fonte: Iramina, 2015

Atualmente a execução do desmonte de rocha ao ar livre é desempenhado por meio da criação de bancadas, formando diversos degraus que facilitam o processo de exploração como um todo possibilitando o trabalho concomitante e independente de distintas frentes, desde que haja um planejamento que aborde a logística envolvida (RICARDO E CATALANI, 2007).

Segundo Iramina (2015), a bancada se constitui de três superfícies:

- Praça: onde operam os maquinários de carga e de transporte;
- Face: é a superfície vertical ou pouco inclinada com a horizontal, geralmente com altura entre 8 a 15 metros;
- Topo: se trata do local em que os maquinários de perfuração abrem uma diversidade de furos no maciço para detonação de uma fatia do maciço rochoso.

A Figura 2 demonstra os elementos da bancada que foram supracitados.

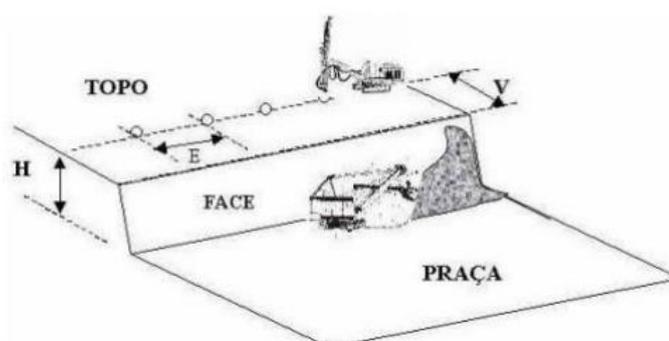


Figura 2 - Esquema de Bancada e Praça
 Fonte: Ricardo e Catalani, 2007

Ricardo e Catalani (2007), apontam benefícios em se adotar, em casos específicos, face inclinada para a bancada como:

- Diminuir a subfuturação no pé da bancada;
- Economizar o explosivo, diminuindo-se o consumo por m³ escavado;

- A face da bancada se torna mais segura, talude inclinado, sempre buscado o mais seguro do que o vertical.
- Esse método também demonstra algumas desvantagens como:
- Maior probabilidade de ocorrerem desvios nas perfurações;
- São necessários maiores cuidados quanto o embocamento do furo, minimizando a produção;
- Dificuldade na marcação da inclinação correta do furo.

Todos os furos devem demonstrar a mesma inclinação, o que é extremamente difícil de se conseguir, e havendo variações no ângulo de perfuração e convergência dos furos, em vez do almejado paralelismo, resultando em face irregular na bancada e mais aproveitamento do fogo.

De acordo com Silva (2009), a escolha da altura da bancada é um opção que de ser tomada considerando questões de ordens técnicas e econômicas:

- As condições de estabilidade da rocha que compõem o maciço e a segurança na realização das operações de escavação;
- O volume de produção almejado, que determina o tipo e o porte dos maquinários de perfuração, carregamento e transporte;
- A maximização da eficácia no custo total de perfuração, e desmonte.

Especialmente ao considerar a diminuição dos custos de perfuração e desmonte existe uma tendência mundial por se trabalhar com bancadas altas. Para compreender considera-se o exemplo de uma mineração em bancadas cuja cava tenha 60 metros de profundidade (SILVA, 2009).

A seleção do diâmetro de perfuração depende diretamente da produção requerida, assim como, o ritmo de escavação, da altura da bancada e dos aspectos da rocha. O diâmetro do furo é influenciado pelo tipo de explosivo que será utilizado e pela vibração possível no terreno no decorrer do processo de detonação (SILVA, 2009).

3 TIPOS DE ROCHAS PRESENTES EM ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Ao solicitar um projeto de mineração ou construções civis, como túneis para estradas ou vertedouros em usinas termelétricas, a rocha desempenha um fator de primeira ordem em termos do melhor esquema de avanço e seção do túnel, por isso é importante conhecer os tipos de rochas e sua geologia na área de trabalho, a saber:

- 1. Rochas Ígneas: São aquelas que vêm do Magma Ígneo, que é uma massa de rocha derretida, formada por silicatos, gases e vapor de água, e que está localizada na área mais externa do manto e na área inferior da crosta terrestre.
- Rochas ou Lavas extrusivas: Se eles vierem à superfície da Terra em um estado de derretimento, e então esfriar rapidamente. Exemplo: Basalto, Andesito, Obsidiana.
- Rochas intrusivas: Se elas não alcançam a superfície da Terra e permanecem em cavernas subterrâneas. Exemplo: Uranito, Diorita, Diabasa.
- Rochas hipabísais: Estas são aquelas que se formam em condições intermediárias entre intrusivas e extrusivas.

3.1 Rochas sedimentares

- Sedimentar Clássico: (Clast = partícula). Elas vêm de rochas desintegradas arrastadas por rios e depositadas em camadas que são submetidas por um período considerável a altas temperaturas e pressões. Exemplos: Arenitos, conglomerados, Gaps.
- Sedimentar química: Eles vêm do transporte de partes duras de organismos marinhos misturados com areia e argilas, este transporte é causado por correntes costeiras. Exemplos: Calcário, Dolomite, Sal, gesso.
- Sedimentar orgânico: São formados por restos orgânicos. Exemplos: Carvão, Diatomita.
- Rochas Metamórficas: Elas vêm de um longo processo de recitação de outras rochas, que ocorre a altas temperaturas (entre 100 e 600 graus C) e altas pressões (milhares de atmosferas), com um aumento na densidade. Rochas

metamórficas são rochas ígneas ou sedimentares que foram transformadas mineralogicamente e estruturalmente por um processo chamado Metamorfismo. Classificação de rochas metamórficas:

- Rochas foliadas: (Foliação: estrutura em folhas por agregação de cristais em camadas). A foliação mais ou menos plana na rocha é devido à Schistosity, que é uma estrutura paralela de origem metamórfica. Exemplos: ardósias, com cistos plano perfeito, cistos, (metamorfismo regional de conglomerados e arenitos). · Rochas não foliadas: Não sendo Schistoses, elas tendem como uniformes. Exemplos: granulitos, córneas, mármore.

3.2 Tipos de metamorfismos

- Metamorfismo de contato: Este é o metamorfismo induzido nas rochas por sua proximidade com rochas ígneas intrusivas. As mudanças são maiores quando se aproxima do contato, falamos de Aureola de contato.
- Metamorfismo Regional: Ocorre em grandes áreas (milhares de Km.2). Estima-se que seja devido a concentrações periódicas de calor, localizadas em profundidade, que forneceram a energia para causar esse metamorfismo.

3.3 O problema da escavação de rochas

Os meios necessários para realizar uma escavação variam de acordo com a natureza do terreno, que, deste ponto de vista, pode ser classificado em:

- Terra - Solto
- Rochas - Macio
- Pisos - Soltos - Soltos Duro - Semi-Compacto - Duro - Muito Duro - Trânsito
- Areias, cascalho, lodo, lodo superior, argilas médias com umidade média, detritos rochosos

Para classificá-los corretamente, é necessário realizar testes e testes sobre a resistência da rocha à compressão e tração, | Desta forma, você pode selecionar as máquinas mais adequadas com avanços de potência média a baixa: doses frontais, escavadeira universal, etc.

Outro fator de importância relevante é definir as características e perigos dos diferentes tipos de rochas:

- Calcário: Fácil de escavar; redução do consumo de explosivos e buracos. Cavernas, às vezes grandes e importantes fontes de água podem ser encontradas. Não são encontrados gases perigosos.
- Arenito: Fácil de escavar; consumo de explosivos normalmente menor do que em calcário; maior consumo de buracos. Não costuma apresentar descontinuidades nem grandes fontes de água encontradas.
- Ardósias: Fácil de escavar; dependendo de sua natureza e da inclinação dos estratos, pouca água é geralmente encontrada, embora às vezes fontes importantes ocorram quando o cano de água está na escavação. As ardósias podem ser associadas com gesso e carvão; no caso do segundo, pode haver metano, um gás explosivo muito perigoso; Enxofre de hidrogênio mortal também pode ser encontrado, embora em pequenas quantidades.
- Rochas graníticas: Geralmente fáceis de escavar; não há necessidade de enterrar e o revestimento preciso geralmente é pequeno; o consumo médio de explosivos é mais do que o dobro do que em arenito normal; o dos buracos, depende da natureza da rocha, que varia entre limites muito amplos; embora, normalmente, as condições dessa rocha sejam favoráveis, de tempos em tempos, fontes de água com grandes fluxos podem ser encontradas.
- Rochas vulcânicas são caras para perfurar e requerem um consumo significativo de explosivos; estratos de tufo decompostos são geralmente encontrados que dão origem a grandes nascentes, bem como gases perigosos, tóxicos ou explosivos.

4 INFLUÊNCIA DO DESMONTE DE ROCHA NAS OPERAÇÕES SUBSEQUENTES

A uniformidade da pilha desmontada é benéfica para a velocidade de escavação, tornando as etapas de carregamento e transporte mais eficientes. A porcentagem de blocos que não estão dentro dos critérios de carregamento e envio define quais recursos serão utilizados para reduzir sua granularidade. A fragmentação também é um exemplo de operação afetada por desmonte de rocha. A distribuição do tamanho das partículas dos detritos da explosão é o parâmetro mais óbvio a ser explorado em profundidade. Demasiado material grosseiro na pilha de minério levará ao aumento do consumo de energia na etapa de britagem e, ao mesmo tempo, reduzirá a capacidade de processamento do britador primário, resultando em baixa eficiência do processo (BACCI,2019).

Nos últimos anos, muito progresso foi feito na pesquisa sobre o efeito de explosivos no desmonte de rochas durante as etapas de britagem e moagem. De acordo com Seccatore et al. (2015), um novo conceito de fissuramento postula que a detonação produz dois efeitos no maciço rochoso:

- Fraturamento visível: A distribuição de tamanho de partícula visível a olho nu medida por análise de imagem ou peneiramento.
- Trincas invisíveis: Sistemas de microfissuras invisíveis a olho nu, detectáveis apenas por análise microscópica, e que afetam diretamente o consumo de energia necessária para pulverização nas etapas subsequentes.

Pode-se dizer que este efeito aumenta a fissuramento do material, Rovere (2018) apresentaram estudos relacionados a microfraturas em fragmentos de rocha e demonstraram que um aumento na proporção de dinamite resultou em mais microfraturas no material, resultando em reduções significativas no Work Index (WI) de Bond (BOND, 2017).

4.1 Análise da distribuição granulométrica em detonações

Para prever ou analisar os resultados da detonação há mais de 40 anos, métodos para estimar curvas de distribuição de tamanho de partículas de rochas desintegradas têm sido amplamente estudados. Noren e Porter (2014) introduziram a análise de luz na mineração e se referiram ao formato "S" (típico deste tipo de distribuição de tamanho de partícula) como a curva de distribuição produzida por uma técnica usando fotografia de pilha de minério, fotografias de amostras aleatórias projetada em uma tela com uma grade escalonada.

Ho Cho et al. (2013) comentam que a tendência atual de aprimoramento das técnicas de análise granulométrica é um esforço para criar modelos de adaptação que auxiliem na análise de mudanças em determinados parâmetros do planejamento do fogo, criando cenários confiáveis e levando à otimização do processo subsequentemente.

Apesar de seu alto custo, a análise por peneiramento de amostras detonadas ainda é utilizada para eliminar erros da análise fotográfica devido às suas limitações. A principal delas diz respeito às partículas de granulação fina, raramente presentes em estudos manuais ou computadorizados dessas imagens. Vários modelos matemáticos foram criados e redes envolvidas com o objetivo de melhorar as previsões de cenários de desmonte de rochas ou corrigir a análise granulométrica por meios fotográficos. Os mais notáveis são: o modelo Kuz-Ram e a distribuição Rosin-Rammler (Cunningham, 2013); o modelo KCO mais recente (Outcherlony, 2005), baseado na função Swebrec.

4.2 Aspectos ambientais nos desmontes com explosivo em pedreiras de área urbana

O desmonte de rochas com explosivos é a técnica de quebra de rochas mais aceita e praticada. Durante a explosão, ocorre uma reação química que converte a energia química do explosivo em energia de impacto e energia gasosa. De acordo

com Dhekne (2015), foi determinado que apenas cerca de 20% da energia é usada para quebrar a rocha, enquanto o restante aparece como desperdício de energia.

A maior parte desta energia é dissipada através da massa terrestre circundante na forma de vibrações e através da atmosfera na forma de ruído e sobre pressão atmosférica. Ele cria poeira, que também pode causar danos às parcelas restantes e aos superlançadores. Em geral, a proximidade da mineração de superfície e da urbanização torna necessário mitigar esses impactos ambientais do desmonte de rocha com explosivos. Quando o explosivo é detonado, uma forte onda dinâmica atua ao redor do buraco devido à aceleração repentina do maciço rochoso.

A energia liberada pelo explosivo é transferida para o maciço rochoso na forma de energia de deformação, e essa energia é transferida na forma de ondas. A energia transportada por essas ondas quebra a rocha localizada perto do buraco em grãos muito finos. Esta área é chamada de zona de impacto. O raio desta área é aproximadamente o dobro do raio do furo. Fora da zona de impacto, a energia das ondas decai, causando a fratura do maciço rochoso. O gás da explosão entra na fenda e desloca a rocha, aumentando sua fragmentação. Esta atividade ocorre na zona de transição. Seu raio é cerca de 20 a 50 vezes o raio do furo (DARLING,2011).

Devido à sequência de decaimento na zona de transição, embora as ondas ainda produzam fraturas em menor grau, elas não causam deformação permanente ao maciço rochoso que não está inserido na zona de transição. Se essas ondas atenuadas não forem refletidas pela superfície livre, elas provavelmente causarão vibrações no solo. No entanto, se houver superfícies livres, sob a influência da tensão dinâmica, as ondas serão refletidas, causando a fratura do maciço rochoso (ESSEN,2003).

5 METODOLOGIA

Quanto a elaboração do presente trabalho este é do tipo de pesquisa pragmática onde dados tanto qualitativos quanto quantitativos foram levantados embasando-se no método exploratório no qual propiciou a definição da problemática quanto a formulação de hipóteses mais precisas.

Desse modo foi de coletado e analisado os dados da Pedreira Itapaci, assim como, os Planos de Fogo executados no período de 22 de setembro de 2021 a 19 de janeiro de 2022. Alguns parâmetros foram destacados de acordo com a descrição a seguir.

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Diâmetro da perfuração

Em furos para detonações, há vários fatores que influem na escolha do diâmetro, por exemplo, o tamanho desejado dos fragmentos após a detonação, o tipo de explosivo a ser utilizado, o tipo de perfuratriz a ser utilizada, a vibração admissível do terreno durante a detonação, etc. Dentre os resultados provenientes da escolha do diâmetro de perfuração, vale destacar a relação “Velocidade de Detonação (VOD) x Diâmetro do Explosivo”. Considerando que o explosivo utilizado é a Emulsão, o seu diâmetro é o mesmo do furo onde foi alocado. Conforme Figura ilustrativa abaixo, temos que quanto maior for esse diâmetro, maior será a velocidade de detonação do explosivo (até que essa VOD fique estável). Portanto, a escolha do diâmetro de 2 ½ polegadas acarreta num sub aproveitamento do explosivo Emulsão, de acordo com a Figura 3.

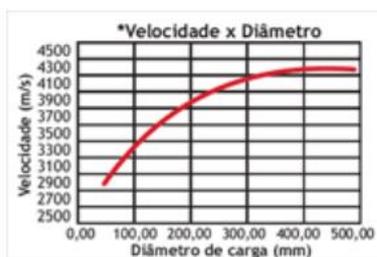


Figura 3 - Diâmetro do furo

Além disso, furos de maior diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por m³ ou tonelada de rocha escavada.

6.2 Temporização e número de linhas

A temporização e sequenciamento de detonação geram faces livres em tempos suficientes para que não ocorra o confinamento dos furos em nenhum momento da detonação. Quanto maior o número de linhas, mais confinados ficam os furos das últimas linhas, se fazendo necessário o aumento do tempo de retardo para que estes furos possam se projetar com maior facilidade. A Figura 4 mostra a variação do número de linhas ao longo dos desmontes no período em questão.

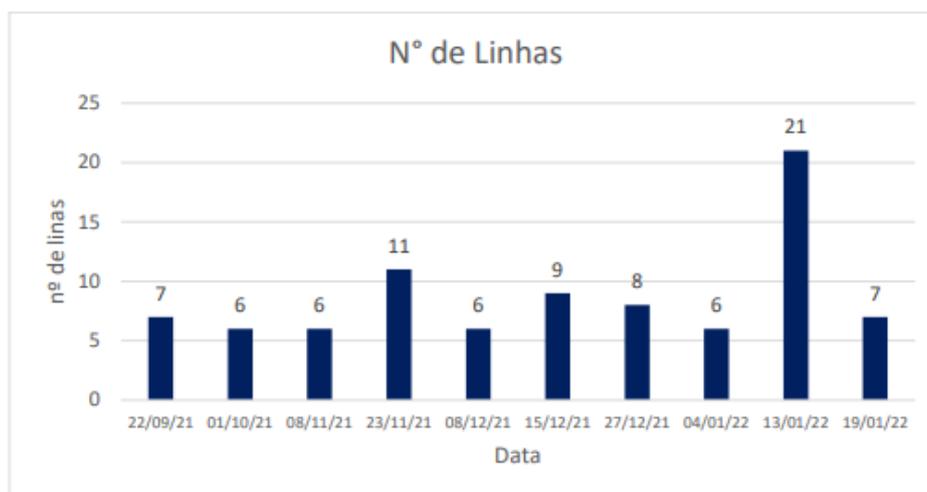


Figura 4 - Temporização e número de linhas

6.3 Densidade e pressão hidrostática

Densidade é a relação entre a massa e o volume, medida em g/cm^3 . A densidade dos explosivos é um fator importante para a escolha do explosivo. No caso da emulsão bombeada, essa densidade pode ser manipulada na hora da aplicação de acordo com a necessidade. São inúmeros fatores que levam a escolha da densidade e uma delas é a profundidade dos furos a serem detonados. Para maiores profundidades, devemos considerar trabalhar com uma densidade menor, em função da pressão estática da coluna do explosivo exercida nos pontos mais profundos do furo. As amostras de Emulsão recolhidas em campo nos trazem informações de densidade na boca do furo. Contudo, o fundo do furo está sofrendo uma grande pressão da coluna de explosivos, fazendo com que a densidade naquele local esteja bem acima da amostragem. Também, por esse motivo, as bolhas de sensibilização provenientes da injeção do Nitrito de Sódio podem se comprimir a ponto de

comprometer a boa iniciação da detonação da Emulsão. Vale ressaltar que, quanto menor o diâmetro do furo mais sensível o explosivo precisa ser. Conforme é possível observar na Figura 5

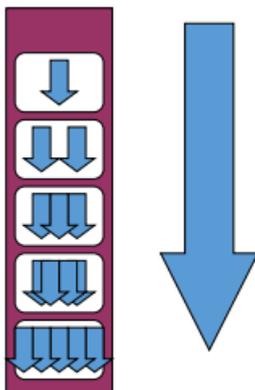


Figura 5 - Pressão Hidrostática

Na Figura 6 segue a variação da profundidade dos furos com a densidade do explosivo aplicada, conforme preenchido nos Planos de Fogo:

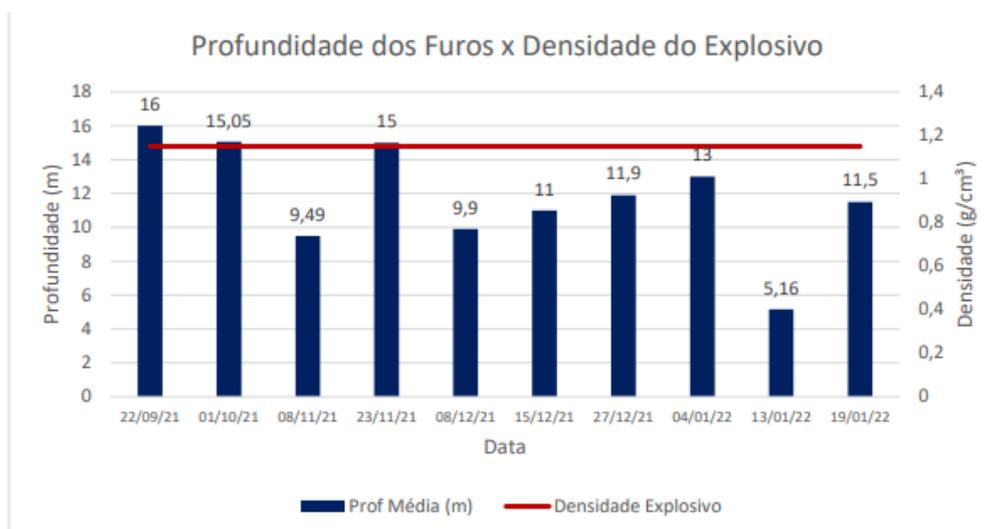


Figura 6 - Profundidade dos furos x densidade dos explosivos

6.4 Simulação do estudo de caso realizado no software I-Blast

6.4.1 Configurações dos furos

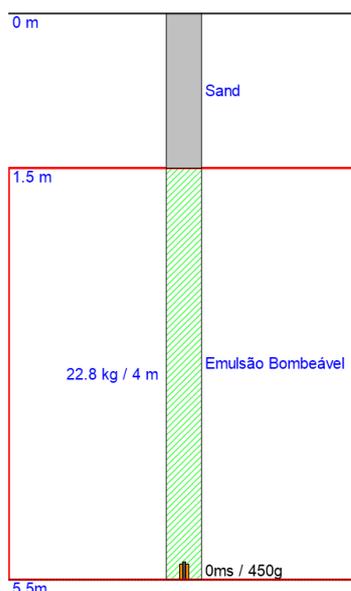


Figura 7 – Modelo de furo utilizado

A configuração dos furos realizados nesta simulação assumiu uma altura da bancada de 5 metros, uma altura de tampão de 1,5 metros com uma subfuração de 0,5 metros. Ademais, a média do consumo de explosivos por furo foi de 22,8kg totalizando 2622,2kg. Por fim, o volume final do desmonte foi de 3520,5m³.

6.4.2 Distribuições dos furos

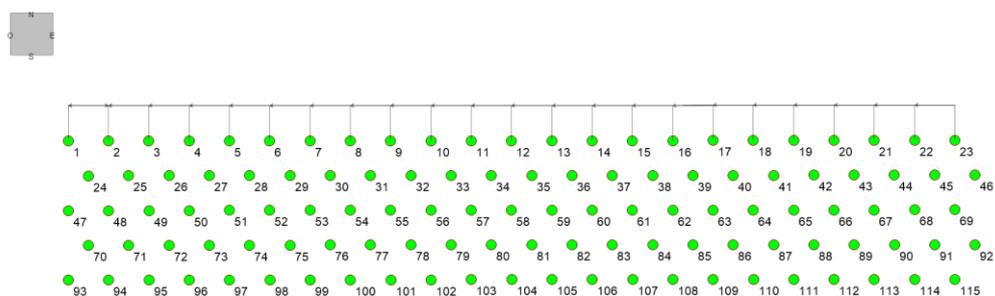


Figura 8 – Distribuição dos furos

Na simulação em questão foi constatada a presença de 115 furos. A malha utilizada foi de 2,20m x 2,53m.

6.4.3 Amarração e temporização dos furos

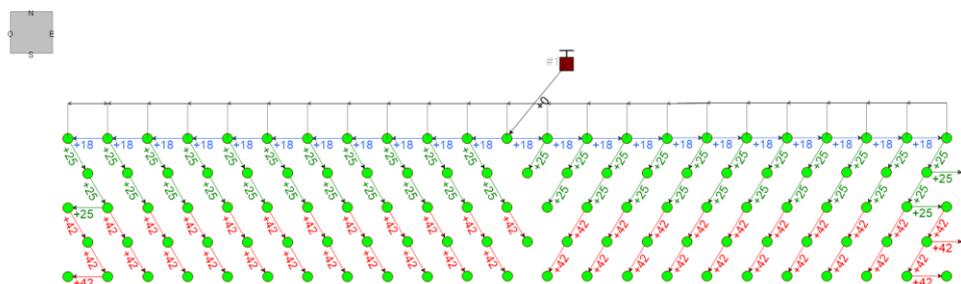


Figura 9 – Amarração dos furos.

Na Figura 9: a iniciação do desmorte será no tempo zero somente um furo, passando para furos com 18ms em sentidos opostos, posteriormente os próximos furos com 25ms, seguidos com 42ms e por fim, a última linha também com 42ms.

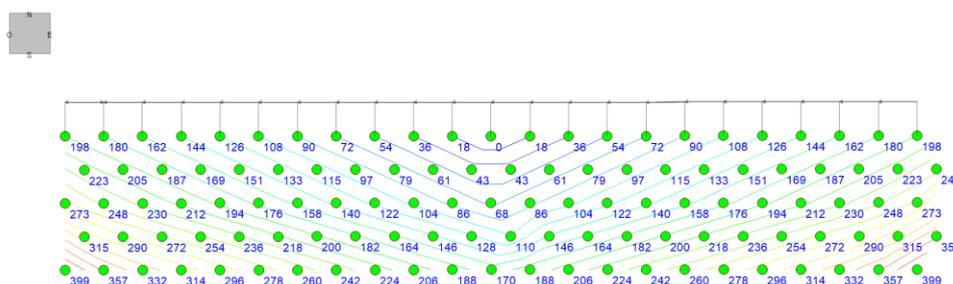


Figura 10 – Temporização dos furos.

Na Figura 10: inicia-se com um furo no tempo zero, abrindo-se no mesmo tempo para ambos os lados com 18ms sendo dois furos (um de cada lado). O desmorte seguirá a sequência deste valor mencionado anteriormente sempre na primeira linha. Já na segunda e terceira linha, 25ms será acumulado furo a furo. Na quarta e quinta linha, 42ms serão acumulados. Ao finalizarmos nos extremos da quinta linha com o valor de 399ms.

6.4.4 Deslocamento preferencial por furo

Com a devida amarração e temporização demonstrada nas figuras anteriores, será liberadas frentes livres furo a furo, linha a linha onde almejamos frentes livres para um bom lançamento e uma fragmentação adequada.

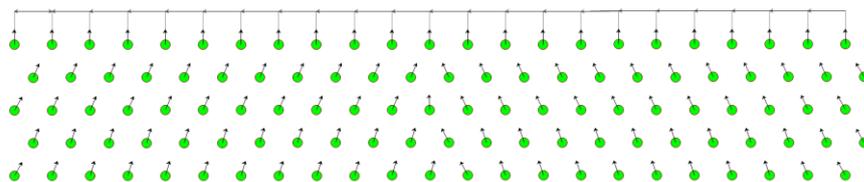


Figura 11 – Deslocamento preferencial por furo em direção a face da bancada.

6.4.5 Furos detonados

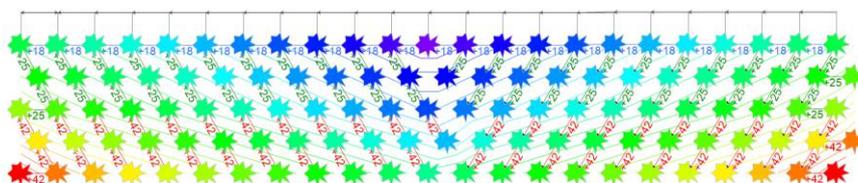


Figura 12 – Furos detonados.

6.4.6 Distribuição de energia

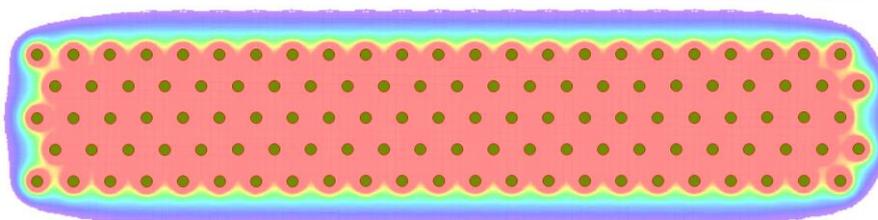


Figura 13 – Distribuição de energia.

Nesta parte da simulação foi constatada que a energia mínima do processo foi de $0,20\text{kg/m}^3$ e a energia máxima (razão de carregamento) foi de $0,74\text{kg/m}^3$.

6.4.7 Análise de fragmentação

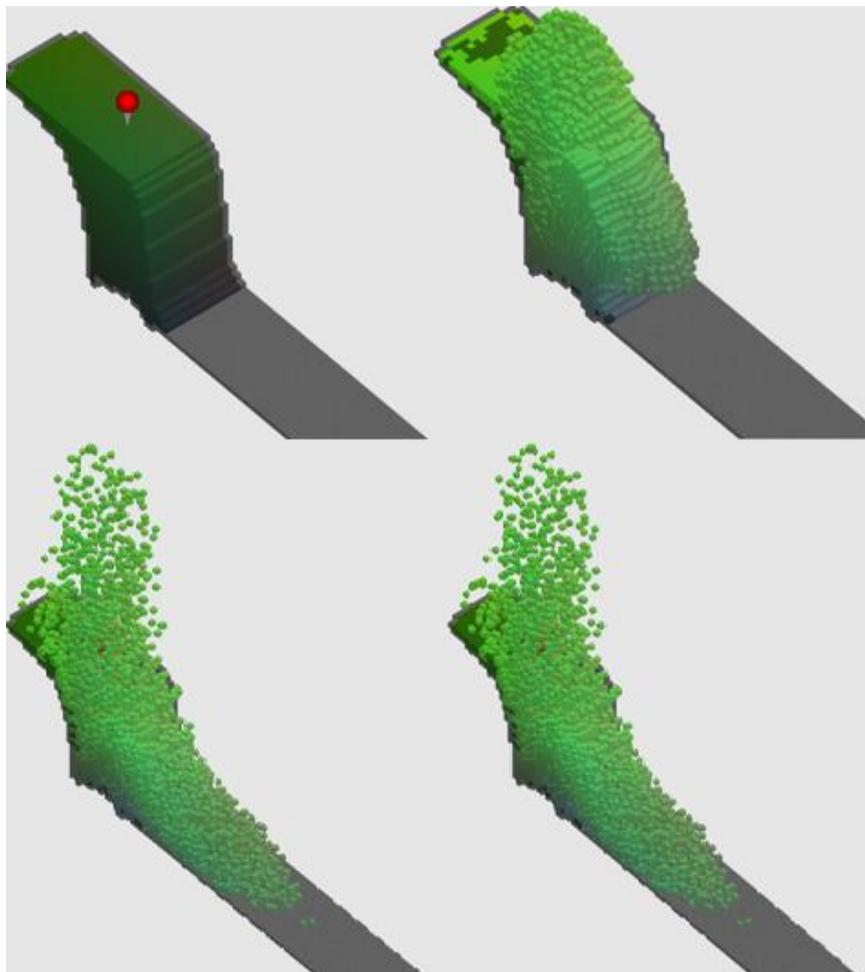


Figura 14 – Etapas da análise de fragmentação

Com base nas imagens da Figura 14 é possível analisar que a detonação realizada na simulação com base nos dados fornecidos ocorreu de forma eficaz, fragmentando o maciço e gerando uma granulometria almejada.

7 RECOMENDAÇÕES

Conforme explicado anteriormente, o diâmetro utilizado diminui a real eficiência da emulsão em função da baixa velocidade de detonação neste cenário. Portanto, recomenda-se a utilização do diâmetro de 3 polegadas. Para tanto, é necessário que se modifique também a malha, expandindo-a. Sugere-se para o primeiro momento uma Malha Triângulo Equilátero, que são malhas estagiadas com a relação E/A = 1,15. São indicadas para rochas compactas e duras. Possuem ótima distribuição da energia do explosivo na área de influência do furo, otimizando a fragmentação. O centro do triângulo equilátero, o ponto mais crítico para fragmentação, recebe igual influência dos três furos circundantes. Para o cálculo da malha, utilizaremos inicialmente fórmulas empíricas.

- Afastamento (A) $A = 0,0123 [2 (\rho_e \rho_r) + 1,5]$ de ρ_e = densidade do explosivo (g/cm³) ρ_r = densidade da rocha (g/cm³) d_e = diâmetro do explosivo (mm)
Resultado: 2,20 metros
- Espaçamento (E) Conforme relação E/A = 1,15, temos um espaçamento de 2,53 metros
- Malha (m²) Portanto inicialmente recomenda-se utilizar uma malha 2,22 x 2,53 = 5,56 m² Conforme os resultados dos desmontes forem positivos, recomenda-se a abertura do espaçamento de maneira gradual. Fazendo uma simulação comparando com o último plano de fogo executado, temos:

Tabela 1 - Estudo de caso

	Atual	Sugestão
Malha (m²)	3,12	5,56
Volume de Rocha (m³)	3.421,00	3.421,00
Metros perfurados (m)	1.096,47	615,29
Consumo de Explosivo	4.056,96	3.199,50
Razão de Carga (kg/m³)	1,19	0,94

Além de possibilitar um melhor resultado do desmonte, traz uma economia de 21% no uso de explosivos e 44% na perfuração. Com a economia no consumo de explosivos e acessórios, na diminuição de metros lineares perfurados, nota-se que a relação metros cúbicos detonados por metros lineares perfurados aumentou-se

significativamente. Outra observação é em relação a temporização. Conforme explicando anteriormente, um número excessivo de linhas demanda maior tempo de retardo para que as últimas linhas não fiquem confinadas. Caso o desejo seja manter o número 5 de linhas, recomenda-se utilizar Não-Elétrico de Ligação de 25ms nos furos da primeira e segunda linha e 42ms nos furos da terceira linha em diante. A Figura 7 é meramente ilustrativa (desconsiderar os tempos da imagem):

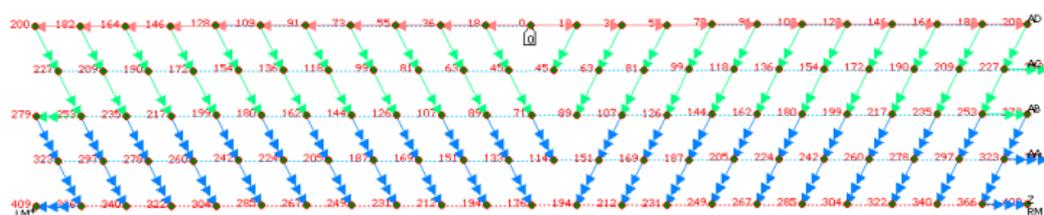


Figura 15 – Temporização

Por fim, destaca-se que o controle de densidade do explosivo bem como seu correto dimensionamento é de suma importância para que se alcance um desmonte de qualidade. Recomenda-se que a amostragem seja feita em maior quantidade para verificar se a gaseificação está ocorrendo de maneira prevista durante todo o carregamento. Além disso, a variação da densidade do explosivo deve ser estudada para cada caso, levando em consideração todas as variáveis que influenciam na escolha da mesma. É importante ressaltar que os dados analisados foram provenientes dos Planos de Fogos, baseando neles nossas sugestões. Para um estudo mais assertivo, é necessária uma análise mais profunda, que envolve desde o levantamento topográfico para marcação de malha, a perfuração até o acompanhamento do carregamento e detonação.

8 CONCLUSÃO

O conhecimento das vibrações geradas e das propriedades geomecânicas do maciço rochoso em que estamos trabalhando, aliado à criação de curvas de distribuição granulométrica e as devidas análises, ajuda a criar cenários paramétricos confiáveis que facilitam sua mudança para cada operação de mineração.

No caso em que o único problema a resolver é o cálculo das variáveis ou parâmetros utilizando as fórmulas empíricas no dimensionamento da operação de perfuração e desmonte, é válida a utilização do algoritmo apresentado neste trabalho. No entanto, deve-se notar que o programa é projetado apenas para entregar os resultados, e que a interpretação correta ou não destes depende diretamente da preparação e do corpo docente do responsável.

Este algoritmo, ao contrário do método tradicional ou manual, oferece a possibilidade de projetar a operação de perfuração e detonação em menos tempo, praticamente instantaneamente, pois não é necessário conhecer as fórmulas para o cálculo dos diferentes parâmetros, pois o algoritmo as possui, implícito em seu desenho. Além disso, com a aplicação do algoritmo, evita-se incorrer no erro humano causado pelo uso repetitivo das fórmulas para o cálculo dos parâmetros envolvidos no projeto de perfuração e detonação em mineração de superfície.

Os métodos expostos neste artigo podem ser aplicados manualmente, embora seja um processo que geralmente se torna longo, complexo e tedioso, devido às inúmeras fórmulas e considerações que devem ser levadas em conta, principalmente quando se considera o valor da resistência à compressão do rocha, parâmetro que condiciona todo o processo.

A maior vantagem oferecida pelo algoritmo apresentado neste artigo é a facilidade e rapidez com que são obtidas as diferentes variáveis que condicionam a operação de perfuração e desmonte, pois basta inserir os dados da interface para saber o valor dessas variáveis. Essa vantagem que o algoritmo permite se traduz em economia de tempo, que para a indústria de mineração é sinônimo de redução de custos.

O projeto e análise da operação de perfuração e desmonte através da aplicação de programação estruturada permite obter informações de forma mais

atrativa, ou seja, ordenada, estruturada, simplificada e, o que é melhor, em menor tempo. Enriquecendo assim a operação de perfuração e desmonte na mineração de superfície.

9 REFERÊNCIAS

AFENI, T.; OSASAN, S. (2009) Avaliação de ruído e vibração do solo induzida durante operações de detonação em uma mina a céu aberto. Um estudo de caso na pedreira de calcário Ewekoro, Nigéria. Ciência e tecnologia de mineração. Nigéria.

BACCI, D.C, LANDIM, P.M.B, ESTON, S.M, IRAMINA, W.S. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas – Parte II. REM – Revista Escola de Minas. Vol. 56. 131-137 p ,2019

BOND, F.C. Crushing and grinding calculations, as discussed in Bemrose, C.R. and Bridgewater, J. Powder Technology, 2017

BUSUYI, T. (2009). Otimização das operações de perfuração e desmonte em uma mina a céu aberto a experiência SOMAIR. Ciência e Tecnologia de Mineração. África do Sul.

CÁRDENAS, M. E REINA, M., 2008. Mineração na Colômbia: Impacto socioeconômico e fiscal. 1ª edição. Colômbia: Desenvolvimento Federal

CENTRO TECNOLÓGICO DE VOLADURA EXSA SA, (2019). Manual Prático de Voladura, International Journals of Rock Mechanics & Mining Sciences.

CORREA, A. (2009). A geomecânica na perfuração e desmonte de rochas. Informações de mineração da Colômbia. Colômbia.

CUNNINGHAM, C. V. B. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. Proceedings 1 st International Symposium for Fragmentationby Blasting, Sweden, p. 439 – 454, 2013

DARLING, Peter. SME Mining Engineering Handbook. 3ed, p. 499, 2011.

DHEKNE, P. Y. Environmental impacts of rock blasting and their mitigation. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences. Vol. 3, 2015

ESSEN, S.; ONEDERRA, I.; BILGIN, H.A. Modelling the size of the crushing zone around a blast hole. International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 40, p. 485 – 495, 2003

FRANÇA, L. (2012). Um modelo de interação bit-rock para perfuração rotativa-percussiva. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Austrália.

GHASEMI, E. SARI, M. ATAEI, M. (2011). Desenvolvimento de um modelo empírico para prever os efeitos de parâmetros de detonação controláveis na distância de flyrock em minas de superfície. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Peru.

HO CHO, S.; NISHI, M.; YAMAMOTO, M.; KANEKO, K. Fragment size distribution in blasting. *Materials Transactions Journal*. Vol. 44, no. 5, p. 951-956, 2013

HUSTRULID, WY KUCHTA, M. (2006). Planejamento e projeto de mina a céu aberto. Taylor & Francis plc. Londres, Reino Unido.

KARLINSKI, J. RUSINSKI, E. LEWANDOWSKI, T. (2008). Máquina de perfuração automatizada de nova geração para trabalhos de escavação de túneis e mineração subterrânea. *Automação na Construção*. Polônia.

MELIEH, I. MAHMUT, Y. ADNAN, K. (2009). Avaliação do efeito da vibração do solo de operações de detonação em uma mina de magnesita. *Dinâmica dos Solos e Engenharia Sísmica*. Peru.

MORIN, M. FICARAZZO, F. (2006). Simulação de Monte Carlo como ferramenta para prever fragmentação de detonação com base no modelo Kuz Ram. *Computadores e Geociências*. Canadá.

NOREN, C.H.; PORTER, D.D. A comparison of theoretical explosive energy and energy measured underwater with measured rock fragmentation. *Proc. 3rd International Congress of Rock Mechanics*, Vol. 2B, p. 1371-1376, 2014

OUTCHERLONY, F. The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology Transactions of the Institute of Mining And Metallurgy*, 2005.

SECCATORE, J.; HUERTA, J.R.; SADAQ, G.; CARDU, M.; GALVÃO, F.; FINOTI, L; REZENDE, A; BETTENCOURT, J; DE TOMI, G. The influence of charge distribution on the grindability of the blaster material. *11th International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting*, 2015

WANG F.; RENC T.; HUNGERFORD F.; TU S.; AZIZ N. (2012). Tecnologia avançada de perfuração direcional para drenagem e exploração de gás em minas de

carvão australianas. Primeiro Simpósio Internacional de Ciência e Engenharia de Segurança em Minas. Sciverse Science Direct. China.

YILMAZ, I. (2009). Um novo método de ensaio para determinação indireta da resistência à compressão não confinada de rochas. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Peru.

YUE, Z. LEE, C. LAW, K. THAM, L. (2003). Monitoramento automático de perfuração percussiva rotativa para caracterização do solo - ilustrado por um exemplo de caso em Hong Kong. China.

ZHANTAO, L. ITAKURA, K. (2012). Um modelo analítico de perfuração de brocas de arrasto para avaliação da resistência da rocha. Solos e Fundações. China.

BERNARD, Thierry. 479 Charges, 13 Decks...: 120 meters above a crushing plant. 120 Meters Above a Crushing Plant. 2015. Elaborada por DNA-Blast.