



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
CAMPUS II – MARABÁ- PA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

HENOC DE JESUS DA SILVA GOMES

DESMONTE DE ROCHA NA MINA DO SOSSEGO

MARABÁ- PA
2009

HENOC DE JESUS DA SILVA GOMES

DESMONTE DE ROCHA NA MINA DO SOSSEGO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como requisito parcial para obtenção de conceito no curso de graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Msc. Agenor Viriato dos Santos Junior,
Co-Orientador: Eng^o Adilson Santana Castro, Msc.

MARABÁ-PA
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II do CAMAR/UFPA, Marabá, PA

Gomes, Henoc de Jesus da Silva

Desmonte de rocha na Mina do Sossego / Henoc de Jesus da Silva Gomes ; orientador, Agenor Viriato dos Santos Júnior. — 2009.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2009.

1. Rochas - Minas e mineração - Canaã dos Carajás (PA). 2. Minas e recursos minerais. 3. Mineração a céu aberto. I. Santos Júnior, Agenor Viriato dos, orient. II. Título.

CDD: 21. ed.: 552. 098115

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

A Banca Examinadora, abaixo assinada,
Aprova o Trabalho de Conclusão de Curso

DESMONTE DE ROCHA NA MINA DO SOSSEGO

Elaborado por

Henoc de Jesus da Silva Gomes

Como requisito para obtenção de Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente, da Universidade Federal do Pará, no Campus Sul e Sudeste do Pará (Marabá-Pa).

BANCA EXAMINADORA

Prof.: MSc. Agenor Viriato dos Santos Júnior
Universidade Federal do Pará
(Presidente/Orientador)

Prof.: MSc. Clesianu Rodrigues de Lima
Universidade Federal do Pará
(Membro)

Prof.: Dr. Lucinewton Silva de Moura
Universidade Federal do Pará
(Membro)

MARABÁ-PA
2009

Ao ilustríssimo Senhor Deus, o Pai das misericórdias e Deus de toda a consolação, por ser meu companheiro inseparável e fiel cooperador em mais uma conquista.

A minha mãe, Maria José Gomes, pelas constantes orações ao meu favor.

Aos meus irmãos, Fábio de Jesus da Silva Gomes e Cristiane de Jesus da Silva Gomes, pelo incentivo.

A minha esposa, Cirléia de Souza Gomes, pela paciência e compreensão.

Ao meu filho, Nicollas Gabriel de Jesus da Silva Gomes, por lembrar- me de meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Todo Poderoso, em primeiro lugar, pelo beneplácito da sua vontade em minha vida.

A minha família, pelo apoio.

Aos professores pelo conhecimento transmitido.

Ao meu orientador, Prof. Agenor Viriato dos Santos Junior, pelas sugestões e críticas que contribuíram de forma substancial neste trabalho.

Ao meu co-orientador, Eng^o Adilson Castro Santana, pelas informações compartilhadas.

À Vale , por nos proporcionar a oportunidade de adquirir novos conhecimentos.

Procure ser um homem de valor, em vez
de ser um homem de sucesso.

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	09
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Definição de Explosivos.....	13
2.2. Propriedades dos Explosivos.....	14
2.2.1. Densidade de um explosivo.....	15
2.2.2. Velocidade de Detonação	15
2.2.3. Energia Relativa por Massa(RWS).....	16
2.2.4. Energia Relativa por Volume (RBS).....	16
2.2.5. Pressão de Detonação	16
2.3. Acessórios de Iniciação	17
2.3.1. Estopim de Segurança	18
2.3.2. Espoleta Simples	18
2.3.3. Espoleta Elétrica.....	19
2.3.4. Espoleta Eletrônica.....	19
2.3.5. Cordel Detonante.....	20
2.3.6. Retardo Bidirecional não Elétrico para Cordel Detonante	21
2.3.7. Sistema não Elétrico com Linha Silenciosa	21
2.4. Propriedades Geomecânicas do Maciço Rochoso.....	21
2.5. Principais Propriedades Geomecânicas que Influenciam no Plano de Fogo.....	22
2.5.1. Resistência.....	23
2.5.2. Propriedades Elásticas	24
2.5.3. Propriedades de Absorção	24
2.5.4. Propriedades Estruturais	25
2.6. Perfuração de Rocha.....	26
2.7. Características dos Furos.....	27

2.7.1. Diâmetro dos Furos	28
2.7.2. Profundidade dos Furos	29
2.7.3. Retilidade dos Furos	29
2.7.3. Estabilidade dos Furos.....	30
2.8. Malhas de Perfuração	30
2.9. Interação Explosivo/Rocha.....	30
2.10. Teorias de Fragmentação da Rocha.....	31
2.10.1. Mecanismos de Fragmentação por Energia de Choque	32
2.10.2. Mecanismos de Fragmentação pela Energia de Deslocamento ou do Gás	33
2.10.3. Mecanismos de Deslocamento das Pilhas de Fragmentos	34
2.11. Variáveis Geométricas de um Plano de Fogo.....	35
2.11.1. Afastamento.....	36
2.11.2. Espaçamento	37
2.11.3. Subperfuração.....	38
2.11.4. Profundidade do Furo	38
2.11.5. Tampão	38
2.11.6. Volume de Rocha por Furo	39
2.11.7. Razão de Linera de Carregamento.....	39
2.11.8. Altura da Carga de Fundo.....	40
2.11.9. Altura da Carga de Coluna	40
2.11.10. Carga Total	40
2.11.11. Razão de Carregamento.....	41
3. METODOLOGIA.....	42
3.1. Geração do Polígono para Perfuração e Desmonte.....	45
3.2. Marcação do Polígono em Campo para a Perfuração.....	46
3.3. Elaboração do Plano de Perfuração e Execução dos Furos.....	46
3.4. Medida das Profundidades e Identificação dos Furos.....	48
3.5. A Coleta do Pó de Perfuração.....	50
3.6. Elaboração do Plano de Fogo.....	50
3.7. Fabricação de Explosivos Dentro da Mina.....	51
3.8. Tamponamento dos Furos na Mina.....	52
3.9. Acessórios de Iniciação Utilizados na Mina.....	53

4. AVALIAÇÃO DO DESMONTE.....	56
5. CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

RESUMO

O presente trabalho descreve a execução das atividades de desmonte de rocha com explosivos nas dependências da mina do sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás, no estado do Pará. Primeiramente apresentamos uma revisão bibliográfica dos principais tópicos que interessam ao desmonte de rocha, dentre eles, as propriedades dos explosivos e também, as propriedades geomecânicas do maciço rochoso. Em seguida, passamos à descrição do desmonte realizado na mina, desde a determinação do polígono para perfuração e desmonte até a avaliação do mesmo. Para isso, dentre outras coisas fizemos o acompanhamento das etapas, atividades e parâmetros usados para a execução do desmonte. Apontando nesta descrição, as mudanças ocorridas em busca da otimização desta operação unitária, os possíveis erros cometidos e ou problemas enfrentados, como por exemplo, a existência de bancadas bastante fraturadas em decorrência das vibrações causadas pelas ondas de choque na mina. Com tal descrição, se abre precedentes para trabalhos futuros, que venham contribuir para melhorar a qualidade da fragmentação e com isso diminuir o custo total da mina.

Palavras-chave: Desmonte de rocha. Descrição. Mina do sossego.

ABSTRACT

The present work describes the execution of the activities of it rock blasting with explosives in the dependences of the mine of the peace, located in the municipal district of Canaan of Carajás, in the state of Pará. Firstly we presented a bibliographical revision of the main topics that you/they interest to the it blasting of rock, among them, the properties of the explosives and also, the properties mechanical of the solid rocky. Soon afterwards, we passed to the description of the it dismounts accomplished at the mine, from the determination of the polygon for perforation and dismount until the evaluation of the same. For that, among other things we made the attendance of the stages, activities and parameters used for the execution of the it dismounts. Appearing in this description, the changes happened in search of the optimization of this unitary operation, the possible committed mistakes and or faced problems, as for instance, the existence of benches quite fractured due to the vibrations caused by the shock waves in the mine. With such description, he/she opens up precedents for future works, that you/they come to contribute to improve the quality of the fragmentation and with that to reduce the total cost of the mine.

Keyword: Dismount of rock. Description. Heshe mines of the peace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais informações quantitativas das descontinuidades	26
Figura 2. A evolução dos métodos e da velocidade de perfuração das rochas	27
Figura 3. Relação: diâmetros de furos, número de furos, porte de equipamentos, altura da pilha e granulometria do material.....	28
Figura 4. Efeito de arqueamento que ocorre na porção desmontada do maciço.....	33
Figura 5. Variáveis geométricas de um plano de fogo.....	35
Figura 6. Fluxograma do processo de perfuração e desmonte.....	43
Figura 7. Definição de área para desmonte	45
Figura 8. Vista da Pit Vipper.....	47
Figura 9. Perfuratriz Elétrica 49 HR.....	48
Figura 10. Medição da profundidade do furo (Pr).....	49
Figura 11. Identificação do furo.....	49
Figura 12. Coleta do material dos furos para análise de teor	50
Figura 13. Carregamento dos furos com explosivo.....	52
Figura 14. Tamponamento dos furos	53
Figura 15. Amarrações entre os furos com cordel detonante	54
Figura 16. Retardo de 30 milissegundos	54
Figura 17. Realização da escorva.....	55
Figura 18. Material desmontado	57
Tabela 1. Variáveis geométricas de um plano de fogo.....	36

1. INTRODUÇÃO

Materiais explosivos vêm sendo utilizados para fragmentar e escavar rochas desde a introdução da pólvora negra por volta no ano 1600. Apesar do grande progresso no corte de rocha e fragmentação por meios mecânicos, desmonte de rochas com uso de explosivo é ainda o melhor método para escavar e mover esses materiais na maioria das situações (Munaretti, 2002).

A escavação de rochas em operações a céu aberto é normalmente um processo complexo que exige perfuração, detonação, carregamento e transporte. Já que os depósitos de minérios são únicos e estão se tornando cada vez mais raros e complicados para escavar, altos custos de produção requerem a otimização de cada componente da operação de mineração, de modo a se obter o maior lucro possível. Desmonte com explosivos é, particularmente, uma importante parte da maioria das operações minerais, representando pelo menos 20% do custo por tonelada de minério produzido. Somando-se a isso, a detonação influencia a operação de minerações como um todo, interferindo nos custos de carregamento, transporte, britagem, moagem e armazenagem dos produtos (Munaretti, 2002).

Podemos perceber que a execução do desmonte com explosivo é de vital importância dentro de uma mina, exigindo portanto, um conhecimento profundo das propriedades dos explosivos, das características do maciço rochoso, da interação explosivo/rocha, bem como de um rigoroso monitoramento dos demais parâmetros que vão influenciar decisivamente na qualidade do mesmo. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo descrever como é realizado o desmonte na mina do sossego, identificando possíveis erros e ou problemas enfrentados na otimização desta operação, e abrindo leque para futuros trabalhos que venham contribuir de forma significativa para o avanço na qualidade da fragmentação desejada na mina do sossego.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DEFINIÇÃO DE EXPLOSIVO

Na fragmentação de materiais da terra por explosivos químicos é importante para o engenheiro de minas entender a fonte de energia. A alta energia dos explosivos é desenvolvida por reações químicas que são iniciadas por uma onda de choque no explosivo (Morais, 2004).

Um entendimento da detonação dos explosivos requer um conhecimento das ondas de choque e da termoquímica envolvida. Os primeiros explosivos usados foram compostos primeiramente de átomos de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N) e alguns com pequenas adições de elementos metálicos (Morais, 2004).

Explosivos são substâncias ou misturas, em qualquer estado físico, que, quando submetidos a uma causa térmica ou mecânica suficientemente enérgica (calor, atrito, impacto etc.) se transformam, total ou parcialmente, em gases, liberando uma grande quantidade de energia num intervalo de tempo muito curto, gerando altas pressões e temperaturas (Morais, 2004).

A taxa de reação depende do tipo de explosivo. Quando a liberação é rápida (a velocidade de detonação é mais rápida que a velocidade do som na substância) a detonação ocorre. Quando a velocidade de reação é menor que a velocidade do som na substância, a reação é denominada deflagração. As detonações são caracterizadas por altas taxas de reação (1000 a 10000 m/s) e altas pressões, de 200 GPa ou 200000 atm (Morais, 2004).

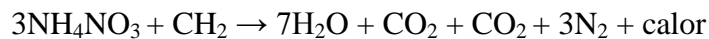
A história da indústria dos explosivos começou com o uso da pólvora em detonações no século XVI. A pólvora é um explosivo de baixa potência devido a reação não ser detonante, mas sim de deflagração (Morais, 2004).

Nitroglicerina (NG) e nitrocelulose (NC) foram primeiro descoberto por Sobrero na Itália em 1840, mas a NG não pode ser usada em desmonte devido a sua sensibilidade ao choque e calor. Alfred Nobel descobriu o princípio básico das composições das dinamites quando algumas nitroglicerinas derramaram acidentalmente dentro da diatomita (terra diatomácea), onde estavam estocadas. A diatomita absorveria em torno de três vezes sua massa de nitroglicerina e o resultado da mistura pode ser empacotado em cartuchos, que são seguros para a movimentação. Esta mistura foi a primeira dinamite, mas devido a diatomita ser inerte e não poder reagir com os ingredientes explosivos, ela limitava a energia por

unidade de massa do explosivo. A diatomita foi substituída por absorventes ativos, tais como, polpa de madeira e nitrato de sódio (Morais, 2004).

Nobel mais tarde descobriu que a NG podia ser combinada com nitrocelulose (NG), formando um gel rígido denominado gelatina, que é um dos mais fortes explosivos comerciais (Morais, 2004).

A reação química de um explosivo é do tipo redução/oxidação (“redox”), que acontece num intervalo de tempo muito curto. O explosivo é composto pela mistura de um agente oxidante e um combustível. O agente detonante mais comum usado hoje na mineração é a combinação de nitrato de amônio (“amônio nitrate”- AN) e óleo diesel (“fuel oil”- FO). Esta mistura é chamada de ANFO. A reação química para o processo é dada abaixo (Morais, 2004):



Neste caso, o NA é o oxidante (ele contém o oxigênio) e o óleo diesel é o combustível. O óleo diesel é oxidado e o nitrato de amônio é reduzido, em um curto intervalo de tempo (Morais, 2004).

Por causa da grande afinidade do NA com a água (hidroscópico), esforços foram feitos para desenvolver explosivos à base de NA que poderiam ser usados em furos com água. Este foi um dos fatores que conduziu ao desenvolvimento das lamas explosivas e mais tarde das emulsões, que é considerada a quarta geração dos explosivos comerciais (Morais, 2004).

2.2. PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

A eficiência de uma mina e de uma planta de beneficiamento de minérios depende, em grande parte, da preparação da massa rochosa pela detonação. A qualidade da fragmentação da rocha depende do nível de energia transmitido ao maciço rochoso, que pode ser acrescido, por exemplo, pelo uso de um novo tipo de explosivo com um adequado mecanismo de detonação, configurações das cargas capazes de reduzir o pico de pressão na coluna e otimizar os custos energéticos no processo da quebra (Castro, 2002).

A escolha de um tipo de explosivo, em particular, tem que ser justificada, entre outros parâmetros, pela qualidade da preparação da massa rochosa (qualidade da fragmentação),

custos específicos exigências tecnológicas do desmonte e operações de carregamento e transporte (Castro, 2002).

É evidente que a relação estrita entre as condições geomineiras, os parâmetros geométricos de deposição, a resistência e propriedades estruturais do maciço rochoso e os parâmetros de energia dos explosivos responsáveis pela separação e quebra da rocha, têm influência decisiva sobre o tipo de explosivo e configuração da carga (Castro, 2002).

2.2.1. Densidade de um Explosivo

Densidade é a relação entre a massa e o volume, medida em g/cm^3 . Por exemplo, a densidade dos explosivos comerciais variam entre 0,6 a $1,45 \text{ g/cm}^3$. A densidade de um explosivo é um fator importante para a sua escolha. Os explosivos com densidade inferior ou igual a 1 não devem ser utilizados em furos contendo água. Para detonações difíceis, onde se deseja uma fragmentação fina, recomenda-se um explosivo mais denso, por outro lado, onde se tem rochas fragmentadas “in situ”, ou onde não é necessária uma fragmentação demasiada, um explosivo menos denso será suficiente (Castro, 2002).

2.2.2. Velocidade de Detonação

A velocidade de detonação (VOD) de um explosivo é a velocidade com que a zona de reação propaga através do explosivo, ao longo da coluna de explosivo. Cada produto explosivo tem sua velocidade de detonação que depende das características químicas, densidade, confinamento e diâmetro da carga. As velocidades de detonação dos explosivos variam de 1500 m/s a 7100 m/s (Castro, 2002).

2.2.3. Energia Relativa por Massa (RWS)

A energia relativa por massa é a medida da energia disponível por unidade de massa de um explosivo comparado ao explosivo padrão. Em aplicações comerciais, o explosivo padrão é o ANFO, enquanto que para explosivos militares é, normalmente, TNT (Tri-nitrotolueno). Assim ao explosivo padrão sempre é dado o valor 100. A energia por massa refere-se à produção de energia útil por unidade de massa do explosivo (Castro, 2002).

2.2.4. Energia Relativa por Volume (RBS)

A energia relativa por volume é definida como sendo a energia por unidade de volume dos explosivos comparada a um de igual volume de um explosivo padrão (ANFO).

A energia relativa por volume é um parâmetro muito útil, pois ela descreve a quantidade de energia disponível dentro de um dado volume, e em particular, dentro de um dado comprimento do furo da detonação. Por isso, pode ser usado para comparar um explosivo com outro dentro de um plano de fogo para que a malha possa ser ajustada (Castro, 2002).

2.2.5. Pressão de Detonação

A pressão de detonação é a pressão na zona de reação atrás da frente de detonação. A pressão de detonação é um indicador significativo da capacidade de um explosivo para produzir uma fragmentação desejada (Castro, 2002).

A pressão de detonação de um explosivo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação. Uma maneira de avaliar o desempenho de um explosivo é pela comparação da pressão produzida no furo durante a detonação. Caso a pressão produzida no furo durante a detonação não supere a resistência dinâmica à compressão da rocha, a mesma não será fragmentada. Entretanto, a energia não utilizada no processo de fragmentação e deslocamento da rocha se propagará no terreno sob a forma de vibração (Castro, 2002).

2.3. ACESSÓRIOS DE INICIAÇÃO

Os acessórios surgiram a partir do momento em que o homem tendo conhecimento do poder do explosivo, pólvora negra, que até então era utilizada em armas de fogo e em fogos de artifícios, decidiu utilizá-la na atividade de mineração. No ano de 1613, Morton Weigold sugeriu a utilização de explosivos nas minas da região da Saxônia. Porém sua idéia não obteve sucesso. Em fevereiro de 1627, Kaspar Weindl, nascido na região do Tirol, nos Alpes austríacos, realizou uma detonação na mina real de Schemnitz, em Ober-Biberstollen, na Hungria, sendo esta, a primeira detonação em mineração que se tem notícia. Provavelmente, Kaspar Weindl utilizou um acessório, também de pólvora negra, para iniciar a carga explosiva. Possivelmente este primeiro acessório teria sido uma trilha, que descia acesa ao furo, preenchido por pólvora negra. O sistema era muito inseguro e impreciso (Silva, 1997).

Os explosivos industriais têm um certo grau de estabilidade química que os tornam perfeitamente manuseáveis, dentro de condições normais de segurança. Para desencadear a explosão, será necessário comunicar ao explosivo uma quantidade inicial de energia de ativação, suficientemente capaz de promover as reações internas para sua transformação em gases. Uma vez iniciada esta reação, ela se propaga através de toda a massa explosiva. Esta energia inicial provocadora é comunicada sob forma de choques moleculares, oriundos de calor, chispas, atrito, impacto etc (Silva, 1997).

Os acessórios de detonação são destinados a provocar estes fenômenos iniciais de uma forma segura. Alguns deles são destinados a retardar a explosão, quando isto for desejável. Podemos, pois, dizer que os acessórios de detonação são dispositivos, aparelhos ou instrumentos usados na operação de explosão, para se obter explosão segura e eficaz (Silva, 1997).

Se o acessório iniciador não comunicar uma energia de ativação satisfatória para ocasionar uma iniciação desejável, pode resultar, simplesmente, na queima dos explosivos, sem detoná-lo. A eficiência da explosão está intimamente ligada ao modo pelo qual foi iniciado, pois, sabemos que, a energia desenvolvida pelo corpo, pela sua decomposição, for inferior a energia inicial de ativação, a reação não se propagará (Silva, 1997).

A seguir apresentaremos os principais acessórios transmissores de energia:

2.3.1. Estopim de Segurança

Acessório desenvolvido para mineração, por William Bickford, na Inglaterra, no ano de 1831. O estopim de segurança, ou estopim, conduz chama com velocidade uniforme a um tempo de queima constante de 140 s (± 10 s) por metro, para ignição direta de uma carga de pólvora ou detonação de uma espoleta simples. Constituída de um núcleo de pólvora negra, envolvida por materiais têxteis que, por sua vez, são envolvidos por material plástico ou outro, visando sua proteção e impermeabilização. Para se iniciar o estopim, poder-se-á usar palitos de fósforos comuns e isqueiros (Silva, 1997).

2.3.2. Espoleta Simples

Alfred Nobel, conhecedor do poder da nitroglicerina, por vários anos tentou criar uma carga de iniciação que pudesse detonar este explosivo. Após várias tentativas fracassadas, utilizando-se de uma mistura de pólvora negra e nitroglicerina, observou que a nitroglicerina molhava a pólvora negra reduzindo assim a capacidade de queima. Então, no ano de 1863 ele desenvolveu o que seria chamado do primeiro protótipo da espoleta simples (Silva, 1997).

A espoleta simples consta de um tubo, de alumínio ou cobre, com uma extremidade aberta e outra fechada, contendo em seu interior uma carga detonante constituída por uma carga chamada primária, ou de ignição, cujo explosivo é a azida de chumbo $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$, e uma carga básica de PETN - Tetranitrato de pentaeritritol ($\text{C}_2\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_6$). A razão destas duas cargas, é devido ao fato de que a azida de chumbo é um explosivo fulminante que pode ser iniciado à custa de uma fagulha. A azida de chumbo, uma vez iniciada pela faísca do estopim, faz detonar a carga de PETN. Os tipos mais comuns das espoletas encontradas no mercado são do tipo número 6 (massa de 0,325 g de PETN e 0,3 g de misto iniciador) e a número 8 (massa de 0,5 g de PETN e 0,3 g de misto iniciador). A cápsula de cobre só é usada para casos particulares, porque na presença de umidade contendo gás carbônico, a azida de chumbo pode se transformar em azida de cobre, que é muito mais sensível e, portanto, mais perigosa (Silva, 1997).

2.3.3. Espoleta Elétrica

As exigências do mercado com relação à necessidade de um acessório que oferecesse um maior controle da detonação levaram H. Julius Smith a inventar a espoleta elétrica em 1876. A grande idéia que este cientista teve foi a de utilizar o conceito da lâmpada e da espoleta simples, para criar a espoleta elétrica. Esta novidade, que poderia ser chamada de cruzamento entre os dois acessórios, tinha como princípio de funcionamento uma fonte de energia elétrica que gerava um aquecimento pelo efeito joule, em uma ponte de fio altamente resistente, incandescente, capaz de desencadear a detonação da carga explosiva de ignição da cápsula, formada por uma pequena substância pirotécnica. A espoleta elétrica é um iniciador ativado por corrente elétrica (Silva, 1997).

2.3.4. Espoleta Eletrônica

O sistema eletrônico de iniciação, apesar de já estar na sua segunda geração, só em meados de 2002 vêm sendo aplicado no Brasil. Trata-se de um sistema que permite maior flexibilidade nos ajuste dos tempos (de 1 a 8000 ms.) e uma menor dispersão que outros iniciadores, permitindo, assim, um controle melhor da detonação (Bonates, 2004).

O sistema de iniciação eletrônico consiste da interação entre dois componentes: espoleta eletrônica e os mecanismos computadorizados de acionamento. Trata-se de um sistema similar ao elétrico, entretanto os dispositivos eletrônicos proporcionam maior segurança, versatilidade e precisão nos ajustes de tempo. Apesar de toda sua eficiência tem como principal desvantagem o alto custo. Esse sistema é aplicado em situações especiais que exigem controle mais rigoroso nos ajustes dos tempos de retardo (Bonates, 2004).

O sistema eletrônico de iniciação representa uma revolução nas operações de desmonte, permitindo uma maior segurança e controle dos tempos de iniciação, adequando a operação às exigências das normas técnicas e ambientais (Bonates, 2004).

A aplicação desse sistema é recomendada em situações que exigem um controle rígido do ponto de vista técnico, segurança e ambiental, etc., dentre as quais podemos citar:

- Controle de vibrações, próximos a estruturas e a ambientes sensíveis;
- Desmontes complexos,

- Controle rígido do maciço remanescente, permitindo uma maior estabilidade e segurança;
- Minimização da diluição do minério;
- Otimização do lançamento da pilha (Bonates, 2004).

2.3.5. Cordel Detonante

O cordel detonante é um acessório de detonação consistindo, essencialmente, de um tubo de plástico com um núcleo de explosivo de alta velocidade - Nitropenta ($C_5H_8N_4O_{12}$) - e de materiais diversos que lhe dão confinamento e resistência mecânica (Silva, 1997).

O cordel detonante é usado para iniciar cargas explosivas simultaneamente, ou com retardos em lavra a céu aberto e/ou subsolo. A sua velocidade de detonação é de, aproximadamente, 7000 m/s. Muito embora a alta velocidade e violência de explosão, o cordel detonante é muito seguro no manuseio e impermeável. São vantagens do cordel detonante em relação às espoletas elétricas:

- As correntes elétricas não o afetam;
- Permite o carregamento das minas em regime descontínuo, com o uso de espaçadores;
- É muito seguro, pois, não detona por atrito, calor, choques naturais ou faíscas;
- Detona todos os cartuchos, ao longo dos quais está em contato (Silva, 1997).

A iniciação do cordel se faz com espoletas simples ou instantâneas, firmemente fixadas ao lado do cordel detonante com fita adesiva, e com sua parte ativa, isto é, o fundo, voltado para a direção de detonação. O cordel detonante é fabricado com as seguintes gramaturas: NP-10 (10 g/m de Nitropenta), NP-5 (5 g/m de Nitropenta), NP-3 (3 g/m de Nitropenta) (Silva, 1997).

2.3.6. Retardo Bidirecional não Elétrico para Cordel Detonante

O retardo de cordel é um tubo metálico, revestido de plástico, iniciado em um dos extremos pelo cordel, ao passar pelo dispositivo, sofre uma queda de velocidade, enquanto queima o misto de retardo. Terminada esta queima, ele detona o cordel na sua extremidade. Os retardos de cordel, denominados “osso de cachorro”, são fabricados com os seguintes tempos de retardos: 5 ms, 10 ms, 20 ms, 30 ms, 50 ms, 75 ms, 100 ms e 200, 300 ms (Silva, 1997).

2.3.7. Sistema não Elétrico com Linha Silenciosa

O sistema não elétrico de iniciação, com linha silenciosa, foi desenvolvido por P. A. Person, nos laboratórios da empresa Nitro Nobel, na Suécia, entre 1967 e 1968. Consiste basicamente de uma espoleta comum, não elétrica, conectada a um tubo de plástico transparente, altamente resistente, com diâmetro externo e interno de 3 mm e 1,5 mm, respectivamente. O tubo plástico contém, em média, uma película de PETN pulverizada de 20 mg/m de tubo, que, ao ser iniciada, gera uma onda de choque, causada pelo calor e expansão dos gases dentro do tubo, que se propaga com uma velocidade, aproximadamente, de 2000 m/s. Essa reduzida carga explosiva, geradora da onda de choque, que se desloca através do tubo, não chega a afetar o lado externo do mesmo, porém, inicia a espoleta instantânea ou de retardo. O sistema oferece inúmeras vantagens quando comparado a outros acessórios. Entre elas, baixo ruído, é insensível à corrente elétricas e parasitas, não destrói parte da coluna de explosivo dentro do furo. Diferentemente do cordel, seu tubo não detona nenhum tipo de explosivo comercial, permite a iniciação pontual (Silva, 1997).

2.4. PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DO MACIÇO ROCHOSO

As propriedades geomecânicas do maciço rochoso são de fundamental importância no projeto de desmonte por explosivos. O uso de planos de fogo com características invariáveis

sem considerar as mudanças destas propriedades podem conduzir a ultraquebra ou fragmentação deficiente, excessos de finos, danos às paredes das bancadas adjacentes, impactos ambientais e custos operacionais maiores que os custos previstos em projeto (Ayres, 2005).

O conhecimento das propriedades geomecânicas do maciço rochoso permite entender melhor o processo de desmonte de rochas, particularmente quando buscamos sua otimização. Assim, os parâmetros de dimensionamento de fogo serão determinados pela interação das características do maciço, do projeto de perfuração, do explosivo utilizado e do sistema de iniciação. O maciço é o único fator que não pode ser dimensionado, mas, em virtude de sua importância no processo, deve ser classificado e controlado (Ayres, 2005).

Deste modo, é necessário determinar quais propriedades do maciço rochoso têm influências no desempenho do desmonte e decidir as mudanças do plano de fogo, de modo a adequá-las às diferentes condições geo-estruturais existentes (Ayres, 2005).

2.5. PRINCIPAIS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS QUE INFLUENCIAM NO PLANO DE FOGO

Entre as propriedades dos maciços rochosos que influem de maneira mais evidente no projeto de desmonte por explosivos tem-se: resistência da rocha, descontinuidades estruturais, velocidade de propagação das ondas sísmicas, propriedades elásticas das rochas, anisotropia e a heterogeneidade dos maciços (Ayres, 2005).

A determinação destes parâmetros por métodos diretos, ou de laboratório, resulta muito difícil e onerosa, já que os corpos de prova testados não incluem as descontinuidades nem as mudanças litológicas do maciço rochoso do qual provém. Para obter uma amostra representativa é necessário que esta tenha dimensões compatíveis com a escala de estudo do maciço (Ayres, 2005).

De um modo geral as propriedades antes citadas podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

2.5.1. Resistência

As resistências estáticas à compressão e tração foram inicialmente utilizadas como parâmetros indicativos do comportamento da rocha nas detonações. Assim, definiu-se o índice de desmontabilidade por explosivos em função destes dois parâmetros. As resistências à compressão, tração e cisalhamento, geralmente são determinadas por testes de laboratório especializados em amostras cuidadosamente preparadas. O número de testes deve ser grande para ter uma representativa e significativa relevância estatística e evitar grandes dispersões (Ayres, 2005).

O tratamento racional dos problemas reais exige considerar as resistências dinâmicas, já que estas se incrementam com o índice de carga podendo atingir valores entre 5 a 13 vezes superiores às resistências estáticas. As rochas enfraquecidas mostram, de um modo geral, uma maior dependência do índice de deformação do que as rochas mais resistentes. Isto significa que os valores apropriados das resistências para as análises das detonações são diferentes daqueles considerados pelos métodos clássicos de determinação das resistências estáticas (Ayres, 2005).

A resistência dinâmica à compressão geralmente é consideravelmente superior à resistência dinâmica à tração, conseqüentemente o fraturamento por tração é um mecanismo de ruptura importante nas rochas massivas e duras. Sendo que os esforços compressivos associados com a onda de choque são significativamente superiores aos esforços tangenciais de tração, nas rochas de baixa resistência dinâmica à compressão, a ocorrência extensiva de fraturas é muito provável, produzindo-se a moagem da rocha ao redor do furo que não é considerado como desejável, pois uma alta taxa de energia de choque é atenuada quando entra na zona elástica, o que limita a propagação radial das fraturas de tração geradas pela detonação, evidenciando seus efeitos deletérios na subsequente fragmentação do maciço rochoso (Ayres, 2005).

A resistência dinâmica à tração da rocha é importante por duas razões: primeiramente, esta deverá ser excedida pelo esforço de tração tangencial para desenvolver o fraturamento radial, e também, para que o lascamento aconteça, este deverá ser excedido pelo esforço de tração radial resultante da reflexão da onda de choque na face livre (Ayres, 2005).

2.5.2. Propriedades Elásticas

As propriedades elásticas do módulo de Young e o coeficiente de Poisson, controlam o comportamento da rocha sob condições de carga. O módulo de Young relaciona a tensão aplicada e a correspondente deformação da rocha, sempre que a rocha se deforme elasticamente. O coeficiente de Poisson é o valor absoluto da relação entre a deformação transversal e a correspondente deformação axial da rocha quando submetido a um esforço uniaxial (Ayres, 2005).

Para a maioria das rochas o coeficiente de Poisson está na faixa de 0,2 e 0,3. Quando este decresce, a velocidade de detonação e a pressão máxima no furo devem ser incrementadas para se obter uma fragmentação aceitável. Estas mudanças nas propriedades dos explosivos tendem a incrementar a proporção da energia de deformação para promover uma fragmentação por meio de uma rápida propagação das fraturas. Geralmente, o valor dinâmico do coeficiente de Poisson é menor do que o valor em condições estáticas possibilitando este tipo de fragmentação (Ayres, 2005).

O coeficiente de Poisson tem um comportamento anisotrópico, mesmo quando a rocha é relativamente homogênea, devido à presença de micro e macro fissuras, a influência da alteração da rocha por processos intempéricos ou pelo estado de tensão existente no maciço rochoso. Se a deformação crítica é considerada como critério de fraturamento – falhamento, sempre que o valor do módulo de Young cresce, a tensão e deformação que é provocada pelo explosivo também se incrementará. O módulo de Young também é dependente, de um modo geral do estado de tensão na rocha, da quantidade de carga e da heterogeneidade estrutural tais como: estratificação, xistosidade e microestruturas (Ayres, 2005).

2.5.3. Propriedades de Absorção

A capacidade do maciço rochoso para transmitir ou absorver a energia de detonação influi na seleção do explosivo, sua distribuição espacial no furo assim como o espaçamento temporal no fogo “Timing”. A amplitude dos pulsos sísmicos diminui quando esta se propaga no maciço rochoso, isto é o resultado de dois mecanismos: a expansão geométrica da onda,

que resulta numa diminuição da energia contida por volume unitário de rocha, sem provocar nenhuma perda de energia; o mecanismo de dissipação da energia, que remove efetivamente a energia do pulso. Esta perda de energia é resultado do atrito interno no material rochoso. A energia pode estar sendo armazenada localmente no material ou ser dissipada na forma de calor (Ayres, 2005).

Nos maciços rochosos onde a dissipação da energia de detonação por meio do atrito interno é elevada, e conseqüentemente a dissipação da onda de choque, o processo de fraturamento é fraco ou inexistente (Ayres, 2005).

2.5.4. Propriedades Estruturais

As estruturas tipicamente presentes nos maciços rochosos são: juntas, falhas, planos de estratificação, diaclasamento e xistosidade.

Dentre as discontinuidades nos maciços rochosos, as juntas, são as mais importantes estruturas relacionadas ao desmonte, e representam superfícies nas quais as ondas de tensão provenientes da detonação do explosivo são parcialmente refletidas, sofrendo atenuação, dispersão e interrupção de sua propagação através do maciço rochoso. A atenuação da onda é fortemente determinada pela orientação, espaçamento, abertura e tipo de material de preenchimento. As discontinuidades, permitem também, um apreciável escape de gases, reduzindo a atenuação dos mesmos no processo de quebra da rocha por flexão.

As principais informações quantitativas das discontinuidades, que podem ser registradas, estão ilustradas na Figura 1, a seguir:

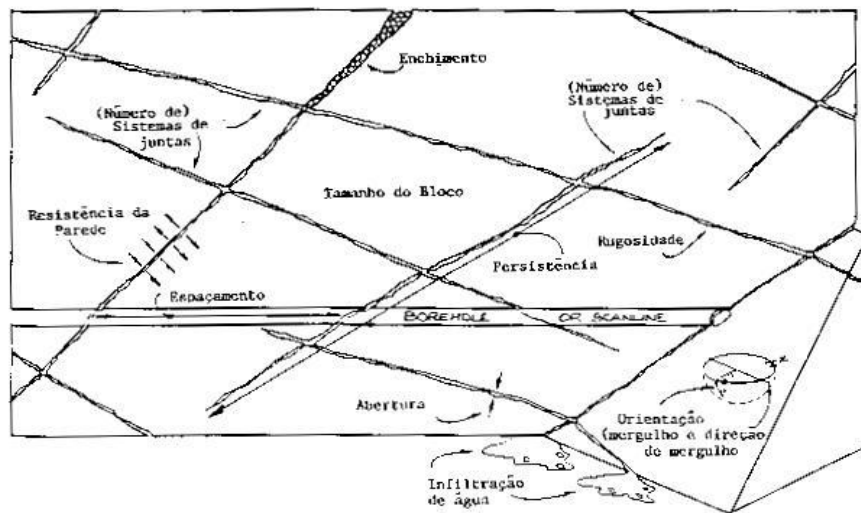


Figura 1. Principais informações quantitativas das descontinuidades (Ayres, 2005).

2.6. PERFURAÇÃO DE ROCHA

A perfuração das rochas, dentro do campo dos desmontes, é uma das primeiras operações que se realiza e tem como finalidade abrir uns furos com uma distribuição e geometria adequada dentro dos maciços para alojar as cargas de explosivos e acessórios iniciadores (Silva, 1997).

A Figura 2 mostra a evolução dos sistemas de perfuração ao longo dos anos.

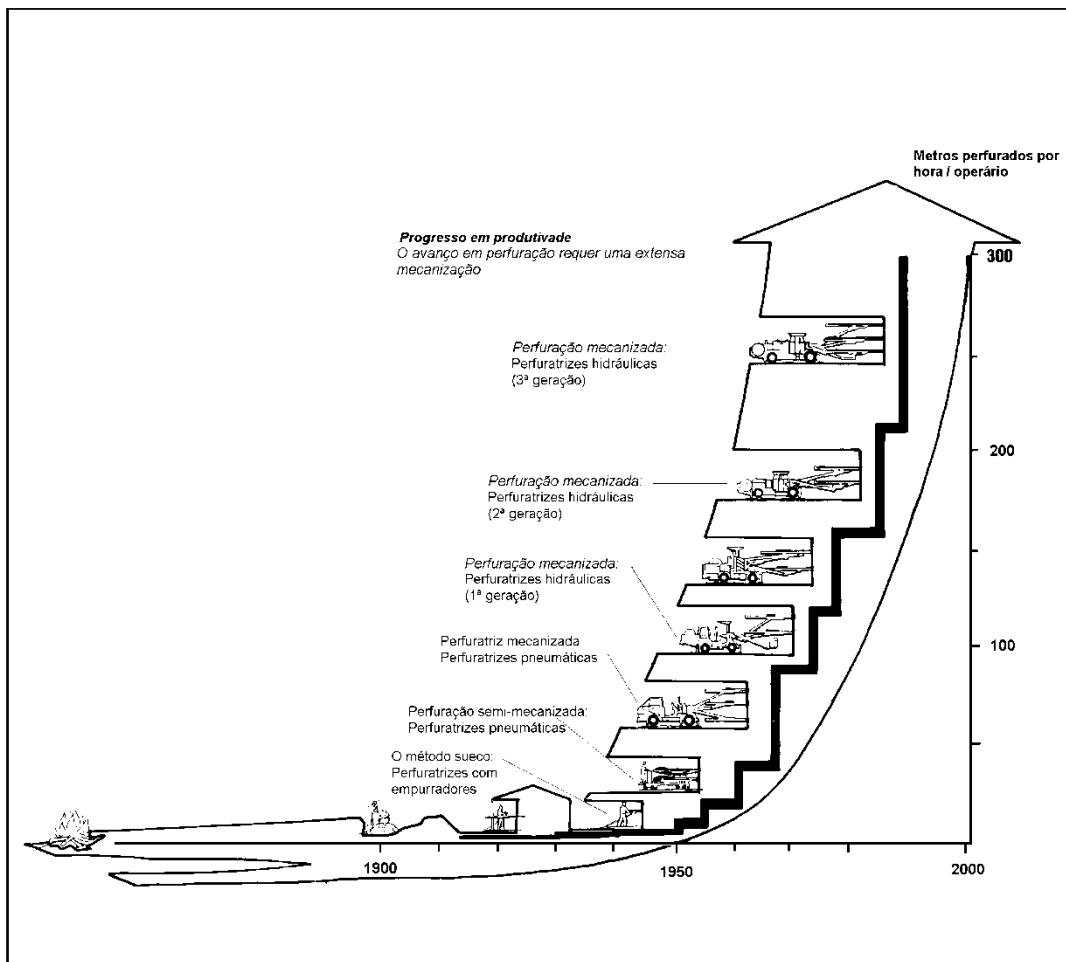


Figura 2. A evolução dos métodos e da velocidade de perfuração das rochas (Silva, 1997).

2.7. CARACTERÍSTICAS DOS FUROS

Os furos são geralmente caracterizados por quatro parâmetros: diâmetro, profundidade, retilinidade e estabilidade (Silva, 1997).

2.7.1. Diâmetro dos Furos

O diâmetro do furo depende da finalidade do mesmo. 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, a vibração admissível do terreno durante a detonação etc. Em grandes pedreiras e outras minerações a céu aberto, furos de grande diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por m³ ou tonelada de rocha escavada. Em trabalhos menores, o diâmetro do furo pode também ser determinado pelo tamanho do equipamento disponível para perfuração, carregamento e transporte (Silva, 1997).

A eleição do diâmetro dos furos depende, também, da produção horária, do ritmo da escavação e da resistência da rocha. A Figura 3 mostra a relação entre os diâmetros e o número de furos, porte dos equipamentos de escavação, altura da pilha e granulometria dos fragmentos rochosos após a detonação (Silva, 1997).

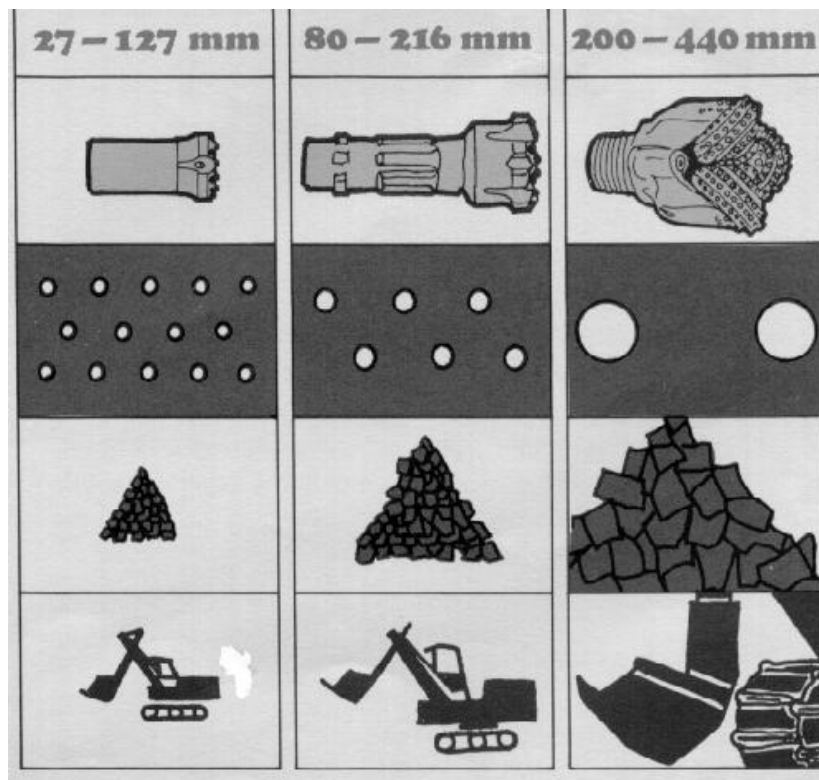


Figura 3. Relação: diâmetros de furos, número de furos, porte de equipamentos, altura da pilha e granulometria do material (Silva, 1997).

2.7.2. Profundidade dos Furos

A profundidade do furo determina a escolha do equipamento de perfuração. Em espaços confinados somente ferramentas de perfuração curtas poderão ser usadas. No caso de maiores profundidades (50 a 70 m ou mais) utiliza-se perfuração de fundo de furo, ao invés de martelo de superfície, já que o método de fundo de furo proporciona mais eficiência de transmissão energética e remoção dos cavacos de rocha a essa profundidade. Quando utilizamos martelos DTH a energia é em princípio transmitida da mesma forma com a vantagem de que o pistão da perfuratriz trabalha diretamente sobre a broca (Silva, 1997).

2.7.3. Retilidade dos Furos

A retilidade de uma perfuração varia, dependendo do tipo e natureza da rocha, do diâmetro e da profundidade do furo, do método e das condições do equipamento utilizado, da experiência do operador. Na perfuração horizontal ou inclinada, o peso da coluna de perfuração pode concorrer para o desvio do furo. Ao perfurar furos profundos para detonação, o furo deve ser tão reto quanto possível para que os explosivos sejam distribuídos corretamente, para se obter o resultado desejado (Silva, 1997).

Para compensar o desvio dos furos às vezes é necessário furar com menor espaçamento o que resulta em maior custo. Um problema particular causado por um furo com desvio é a possibilidade de encontrar-se com outro já perfurado, causando a detonação de cargas por “simpatia”. A probabilidade do equipamento se prender é grande e a detonação não pode ser executada adequadamente. Além do desvio do furo propriamente dito, o alinhamento pode ser afetado pelo desalinhamento da lança e pelo descuido durante o emboque do furo (Silva, 1997).

2.7.4. Estabilidade do Furo

Outra necessidade em perfuração é que o furo permaneça “aberto” enquanto estiver sendo utilizado para carregamento de explosivos. Em certas condições, por exemplo, quando a perfuração é em material “solto” ou rocha (que tendem a desmoronar e tapar o furo), torna-se essencial estabilizar-se o furo com tubos ou mangueiras de revestimentos (Silva, 1997).

2.8. MALHAS DE PERFURAÇÃO

A geometria das malhas de perfuração pode ser quadrada, retangular, estagiada, triângulo equilátero ou malha alongada.

A malha quadrada ou retangular, devido a sua geometria é de fácil perfuração (menor tempo de locomoção de furo a furo). A malha estagiada, devido a geometria dos furos alternados dificulta a perfuração (maior tempo de locomoção furo a furo), porém possui melhor distribuição do explosivo no maciço rochoso. A malha triângulo equilátero é uma malha estagiada com a relação Espaçamento/Afastamento = 1,15; são indicadas para rochas compactas e duras; possuem ótima distribuição da energia do explosivo na área de influência do furo, maximizando a fragmentação; o centro do triângulo equilátero, o ponto mais crítico para fragmentação, recebe igual influência dos três furos circundantes. As malhas alongadas possuem elevada relação E/A, geralmente acima de 1,75; são indicadas para rochas friáveis/macias aumentando o lançamento por possuírem menor afastamento (Silva, 1997).

2.9. INTERAÇÃO EXPLOSIVO/ROCHA

A interação entre o explosivo e o maciço rochoso circundante durante e imediatamente após a detonação é função das propriedades de detonação do explosivo e das propriedades físicas e dinâmicas do maciço rochoso adjacente. As teorias de fragmentação da rocha e os mecanismos de formação da pilha de fragmentos estão baseadas na interação do explosivo detonante com a rocha circundante. Um entendimento do mecanismo de fragmentação por

explosivos possibilita que o responsável pelo desmonte consiga uma fragmentação econômica do maciço rochoso, ao mesmo tempo em que minimiza os efeitos adversos da detonação fora do perímetro da escavação (Cameron, 1996).

Os mecanismos pelos quais a rocha é fraturada pelo explosivo são fundamentais para o projeto do plano de fogo. Eles também se relacionam com os danos que podem atingir a rocha e estruturas circundantes, e ainda com as reações das pessoas que vivem próximas à detonação (Cameron, 1996).

2.10. TEORIAS DE FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA

Existem muitas teorias e modelos que procuram descrever o processo que ocorre durante e depois da detonação de uma carga explosiva em um maciço rochoso. Em termos gerais, este processo envolve a rápida liberação de energia pelo explosivo, a aplicação desta energia na rocha e a resposta subsequente da rocha pela aplicação da energia. Isto é complicado por fatores tais como tipo, quantidade e velocidade de liberação de energia pelo explosivo, plano de fogo e propriedades do maciço rochoso (Cameron, 1996).

Os mecanismos de fragmentação da rocha que foram identificados são:

- Pulverização e quebra;
- Movimento radial;
- Liberação e pressão;
- Lasqueamento;
- Extensão das fissuras geradas pela onda de choque e/ou das fissuras pré-existentes;
- Ruptura por flexão;
- Fraturamento por cisalhamento ao longo das fissuras geradas pela onda de choque e das fissuras naturais;
- Colisões em movimento rápido (Cameron, 1996).

Estes mecanismos causam quantidades variáveis de fraturas dependendo das características do explosivo, propriedades da rocha e geometria do maciço rochoso e da carga explosiva. Eles podem ser separados em duas categorias: aqueles causados pela componente de choque da energia do explosivo e aqueles resultantes da energia do gás (Cameron, 1996).

2.11.1. Mecanismos de Fragmentação por Energia de Choque

Quando um explosivo é detonado, ele é convertido dentro de poucos milissegundos em um gás de alta temperatura. Quando confinado em um furo de mina, esta reação muito rápida provoca pressões muito elevadas sobre suas paredes, normalmente ultrapassando 18000 atm. Esta energia é transmitida para o maciço rochoso vizinho na forma de uma onda de compressão, ou onda de choque, que se propaga a uma velocidade de 2000 a 6000 m/s (Cameron, 1996).

Os mecanismos de fragmentação da rocha que podem ser atribuídos ao componente de choque da energia liberada por explosivo são: pulverização e quebra, movimento radial relativo, liberação de pressão e lasqueamento. A pulverização e a quebra ocorrem ao redor da parede do furo quando a pressão exercida pela frente da onda de detonação excede a resistência à compressão dinâmica da rocha. O pulso de deformação de partida, gerado pela frente de detonação à alta pressão se dispersa e perde energia rapidamente. A pulverização cessa quando o nível de tensão no pulso cai abaixo do limite elástico da rocha. Isto ocorre normalmente muito próximo à parede do furo (Cameron, 1996).

A rocha que forma a parede do furo além da zona de pulverização e de quebra está sujeita a uma compressão muito repentina devido ao pulso de tensão dispersante. Esta compressão (no caso, o movimento radial relativo) resulta em tensões tangenciais que podem causar fissuras que se desenvolvem radialmente a partir do furo. As fissuras radiais se desenvolvem inicialmente em todas as direções a partir da parede do furo de mina e não são influenciados pela face livre local (Cameron, 1996).

O mecanismo de fraturamento causado pela liberação de pressão ocorre imediatamente após a passagem do pulso de tração ou de compressão, resultando em decréscimo local na densidade com esforços de tração subsequentes. Estes esforços de tração produzem fraturas perpendiculares à direção do trajeto da onda de tensão (Cameron, 1996).

O lasqueamento ocorre quando uma frente de onda de compressão ou de tração é refletido pela superfície livre. Neste ponto duas ondas são geradas: uma onda de tração e uma onda de cisalhamento. A onda de tração pode causar fissuramento e fazer a rocha se lascas na região da superfície livre. Ambas as ondas de tração e de cisalhamento podem estender as fissuras pré-existentes ou as novas fissuras (isto é, formado pelo pulso inicial de tensão) (Cameron, 1996).

2.10.2. Mecanismo de Fragmentação pela Energia de Deslocamento ou do Gás

Os mecanismos de fraturamento descritos acima são causados pelo pulso inicial de tração ou de compressão decorrente da carga explosiva detonante. Uma zona de gases a uma pressão e temperatura muito alta ocupa o furo de mina atrás da frente de detonação. Estes gases penetram a zona fraturada ao redor do furo e fluem para as fissuras radiais pré-existentes. A pressão do gás atua como uma cunha para abrir as fissuras, causando o seu “alargamento” (Cameron, 1996).

A pressão na parede do furo causada pelos gases gerados pelo explosivo e o campo de tensão devido às fissuras pressurizadas desloca o maciço rochoso entre o furo de mina e a face livre. Por causa da geometria da carga explosiva e do maciço rochoso a rocha se dobra na face causando fraturamento por ruptura flexural. Isto tem sido observado em filmes de alta velocidade e ainda em fotografias de desmonte experimentais e de produção (Cameron, 1996).

A Figura 4 a seguir, ilustra bem, este fraturamento por ruptura flexural:

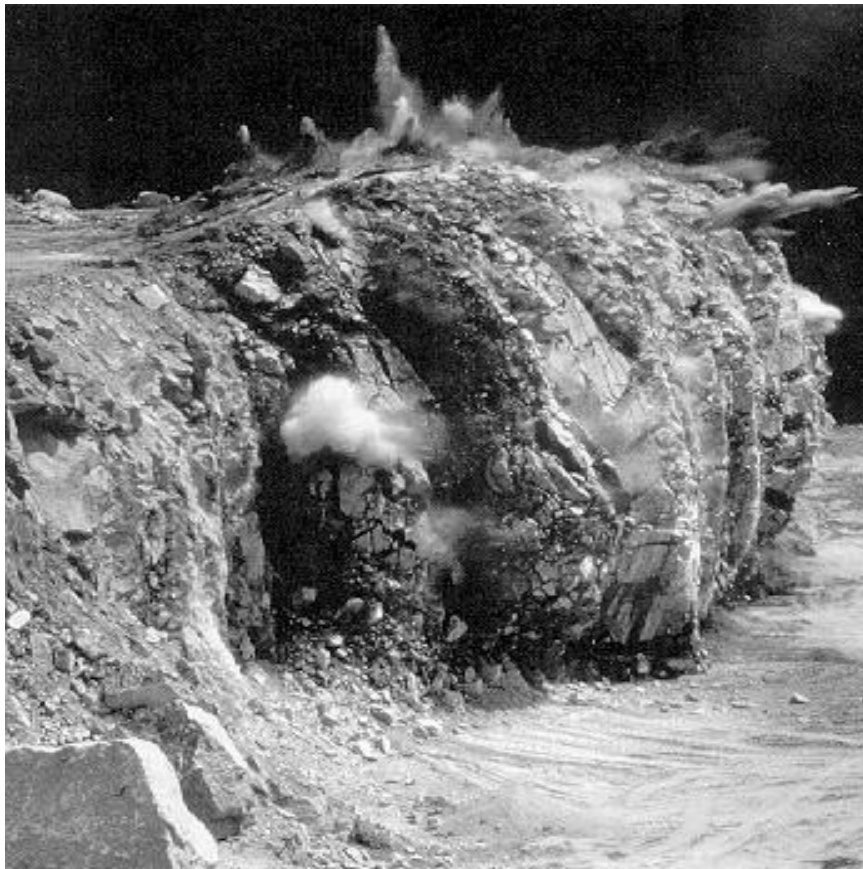


Figura 4. Efeito de arqueamento que ocorre na porção desmontada do maciço (Ayres, 2005).

O fraturamento por cisalhamento ocorre quando uma rocha adjacente é deslocada em tempos diferentes ou a velocidades diferentes. O deslocamento é causado pelos gases a alta pressão. Alguns fraturamentos ocorrem quando partículas de rocha que estão em movimento se colidem. A quantidade de fraturamento resultante deste mecanismo, depende da geometria das cargas explosivas, ordem e o tempo relativo de iniciação somados às propriedades físicas da rocha. Os quatro mecanismos prévios de fragmentação da rocha são resultado de gases a altas temperaturas e pressões que agem sobre o maciço rochoso. Esta energia do gás também desempenha um papel importante no deslocamento da pilha de fragmentos (Cameron, 1996).

2.10.3. Mecanismos de Deslocamento das Pilhas de Fragmentos

O movimento do material em um desmonte é primeiramente o resultado de gases a alta pressão, produzidos pela detonação de cargas explosivas. Estes gases a alta pressão fluem para as fissuras que circundam o furo de mina formando uma região hidrosticamente tensionada. A forma desta região depende da geometria da carga explosiva e do furo de mina, visto que em muitas das aplicações em minerações a carga explosiva apresenta a forma de um longo cilindro criando uma região tensionada hidrosticamente cilíndrica. Nesta região estes gases a alta pressão exercem uma força em todas as direções com o movimento do material ocorrendo na direção da menor resistência (Cameron, 1996).

A quantidade de deslocamento do material em um desmonte é função das propriedades físicas do material, da orientação do furo de mina, da distância de afastamento, do espaçamento entre furos, da sequência e tempo relativo de iniciação das cargas, da quantidade e distribuição do explosivo e das propriedades do gás gerado pela detonação do explosivo. Todos estes fatores influenciam o intervalo de tempo em que os gases a alta pressão permanecem dentro do maciço rochoso, o que por sua vez determina a quantidade de trabalho realizado por eles. Quando estes gases saem para a atmosfera eles terminam o seu trabalho (Cameron, 1996).

2.11. VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DE UM PLANO DE FOGO

A elaboração de um plano de fogo envolve a determinação de várias variáveis, que devem ser levadas em consideração, para a execução do mesmo. A Figura 5 a seguir, mostra as variáveis geométricas de um plano de fogo (Silva, 1997).

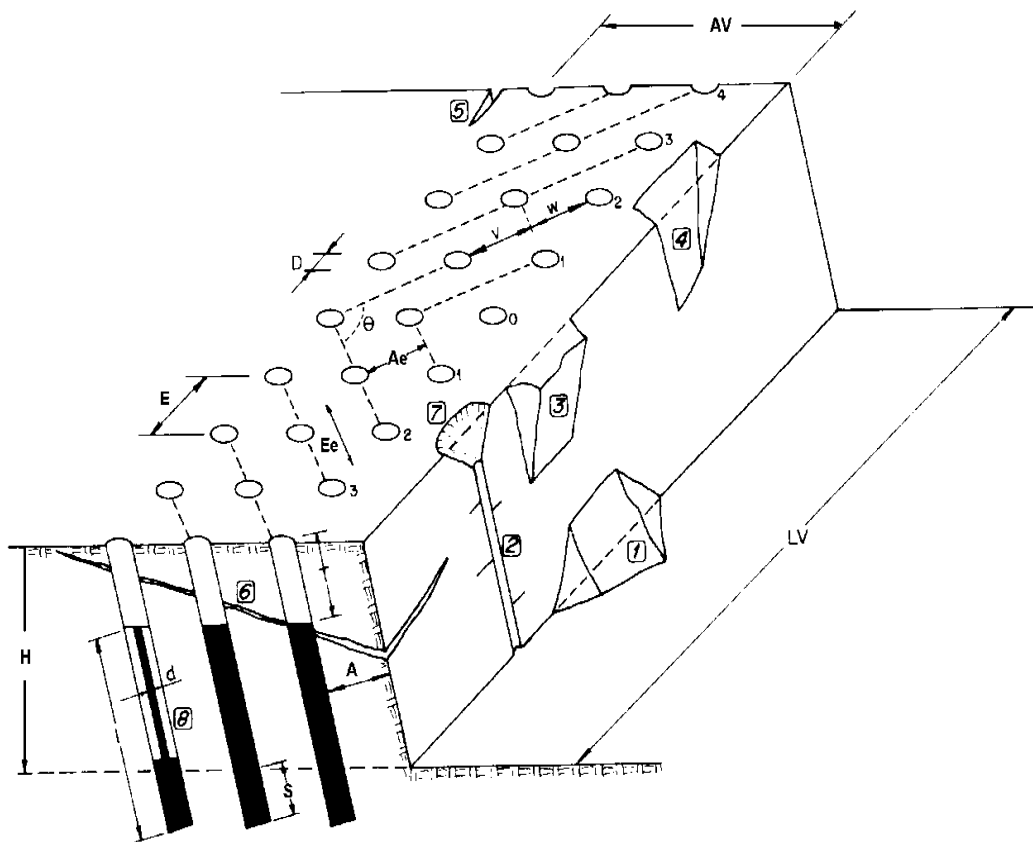


Figura 5. Variáveis geométricas de um plano de fogo (Silva, 1997).

Tabela1. Variáveis geométricas de um plano de fogo.

Variáveis Geométricas de um Plano de Fogo		
H = altura do banco;	D = diâmetro do furo;	L = longitude do furo;
d = diâmetro da carga;	A = afastamento nominal;	E = Espaçamento nominal;
LV = longitude do desmonte;	AV = comprimento da bancada;	A _e = Afastamento efetivo;
E _e = espaçamento efetivo;	T = tampão;	S = Subperfuração;
I = longitude da carga;	θ = angulo de saída;	t _r = tempo de retardo.
1 = repé;	2 = meia cana do furo;	3 = rocha saliente;
4 = sobreescavação;	5 = fenda de tração;	6 = trincamento do maciço;
7 = cratera;	8 = carga desaclopada.	

2.11.1. Afastamento (A)

O afastamento é a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra. De todas as dimensões do plano de fogo essa é a mais crítica. Quando o afastamento é muito pequeno a rocha é lançada a uma considerável distância da face; os níveis de pulsos de ar são altos e a fragmentação poderá ser excessivamente fina. Quando o afastamento é muito grande a sobreescavação (*backbreak*) na parede é muito severa. Quando o afastamento é excessivo há grande emissão de gases dos furos contribuindo para um ultralaçamento dos fragmentos rochosos a distâncias consideráveis, crateras verticais, alto nível de onda aérea e vibração do terreno; a fragmentação da rocha pode ser extremamente grosseira e problemas no pé da bancada podem ocorrer (Silva, 1997).

Outras variáveis do plano de fogo são mais flexíveis e não produzirão efeitos drásticos nos resultados tal como os produzidos pelo erro na estimativa da dimensão do afastamento. O valor do afastamento é função do diâmetro dos furos, das características das rochas e dos tipos de explosivos utilizados. Os valores do afastamento oscilam entre 33 e 39 vezes o diâmetro do furo, dependendo da resistência da rocha e da altura da carga de fundo (Silva, 1997).

Uma fórmula empírica e bastante útil para o cálculo do afastamento é expressa pela equação 1:

$$A = 0,0123[2(\rho_e / \rho_r) + 1,5] \times D_e \quad \text{Equação (1)}$$

sendo:

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

ρ_r = densidade da rocha (g/cm^3);

D_e = diâmetro do explosivo (mm) (Silva, 1997).

2.11.2. Espaçamento (E)

Espaçamento é a distância entre dois furos de uma mesma linha.

No caso de bancada baixa ($H_b / A < 4$), dois casos devem ser observados:

1º Caso : Os furos de uma linha são iniciados instantaneamente, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E = 0,33(H_b + 2A) \quad \text{Equação (2)}$$

2º Caso : Os furos são detonados com retardos, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E = (H_b + 7A) / 8 \quad \text{Equação (3)}$$

No caso de bancada alta ($H_b / A > 4$), dois casos devem ser observados:

1º Caso: Os furos são iniciados instantaneamente, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E = 2 \times A \quad \text{Equação (4)}$$

2º Caso: Os furos são detonados com retardos, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E = 1,4 \times A \quad \text{Equação (5)}$$

O espaçamento nunca deve ser menor que o afastamento, caso contrário, o número de matações será excessivo (Silva, 1997).

2.11.3. Subperfuração (S)

A subfuração é o comprimento perfurado abaixo da praça da bancada ou do greide a ser atingido. A necessidade da subperfuração, decorre do engasgamento da rocha no pé da bancada. Caso não seja observada esta subperfuração, a base não será arrancada segundo um ângulo de 90° e o pé da bancada não permanecerá horizontal, mas formará o que é conhecido como “repé”. O repé exigirá perfurações secundárias de acabamento, grandemente onerosa e de alto riscos para os operários e os equipamentos (Silva, 1997).

$$S = 0,3 A \quad \text{Equação (6)}$$

2.11.4. Profundidade do Furo (H_f)

A profundidade do furo é o comprimento total perfurado que, devido à inclinação e a subperfuração (S), será maior que a altura da bancada. O comprimento do furo aumenta com a inclinação, entretanto, a subperfuração (S) diminui com esta. Para calcular (H_f) utiliza-se a seguinte expressão:

$$H_f = H_b / \cos\alpha + (1 - \alpha/100) \times S \quad \text{Equação (7)}$$

2.11.5. Tampão (T)

O tampão é a parte superior do furo que não é carregada com explosivos, mas sim com terra, areia ou outro material inerte bem socado a fim de confinar os gases do explosivo. O ótimo tamanho do material do tampão (OT) apresenta um diâmetro médio (D) de 0,05 vezes o diâmetro do furo, isto é:

$$OT = D / 20 \quad \text{Equação (8)}$$

O material do tampão deve ser angular para funcionar apropriadamente. Detritos de perfuração devem ser evitados.

O adequado confinamento é necessário para que a carga do explosivo funcione adequadamente e emita a máxima de energia, bem como para o controle da sobrepressão atmosférica e o ultralancamento dos fragmentos rochosos. A altura do tampão pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$T = 0,7 A \quad \text{Equação (9)}$$

Quando o tampão é menor que o afastamento há risco de ultralancamento da superfície mais alta aumenta. Quando o tampão é maior que o afastamento produzirá mais matações, entretanto o lançamento será menor ou eliminado (Silva, 1997).

2.11.6. Volume de Rocha por Furo (V)

O volume de rocha por furo é obtido multiplicando-se a altura da bancada (H_b) pelo afastamento (A) e pelo espaçamento (E):

$$V = H_b \times A \times E \quad \text{Equação (10)}$$

2.11.7. Razão Linear de Carregamento (RL)

A razão linear de carregamento é dado pela equação:

$$RL = [(\pi d_e^2) / 4000] \times \rho_e \quad \text{Equação (11)}$$

onde:

d_e = diâmetro do explosivo (mm);

ρ_e = densidade do explosivo (g/cm^3).

2.11.8. Altura da Carga de Fundo (H_{cf})

A carga de fundo é uma carga reforçada, necessária no fundo do furo onde a rocha é mais presa. Alguns autores sugerem que H_{cf} deve ser um valor entre 30 a 40% da altura da carga de explosivos (H_c). A tendência, a depender dos resultados dos desmontes, é de reduzi-la cada vez mais para diminuir os custos com explosivos (Silva, 1997).

$$H_{cf} = 0,3 \times H_c = 0,3 \times (H_f - T) \quad \text{Equação (12)}$$

2.11.9. Altura da Carga de Coluna (H_{cc})

Carga de coluna é a carga acima da de fundo; não precisa ser tão concentrada quanto a de fundo, já que a rocha desta região não é tão presa. A altura da carga de coluna é igual a altura total da carga (H_c) menos a altura da carga de fundo (H_{cf}):

$$H_{cc} = H_c - H_{cf} \quad \text{Equação (13)}$$

2.11.10. Carga Total (CT)

A carga total será a soma da carga de fundo mais a de coluna:

$$CT = CF + CC \quad \text{Equação (14)}$$

2.11.11. Razão de Carregamento (RC)

Razão de carregamento é o peso do explosivo (em Kg) usado para quebrar cada metro cúbico de rocha sólida.

$$RC = CT/ V$$

Equação (15)

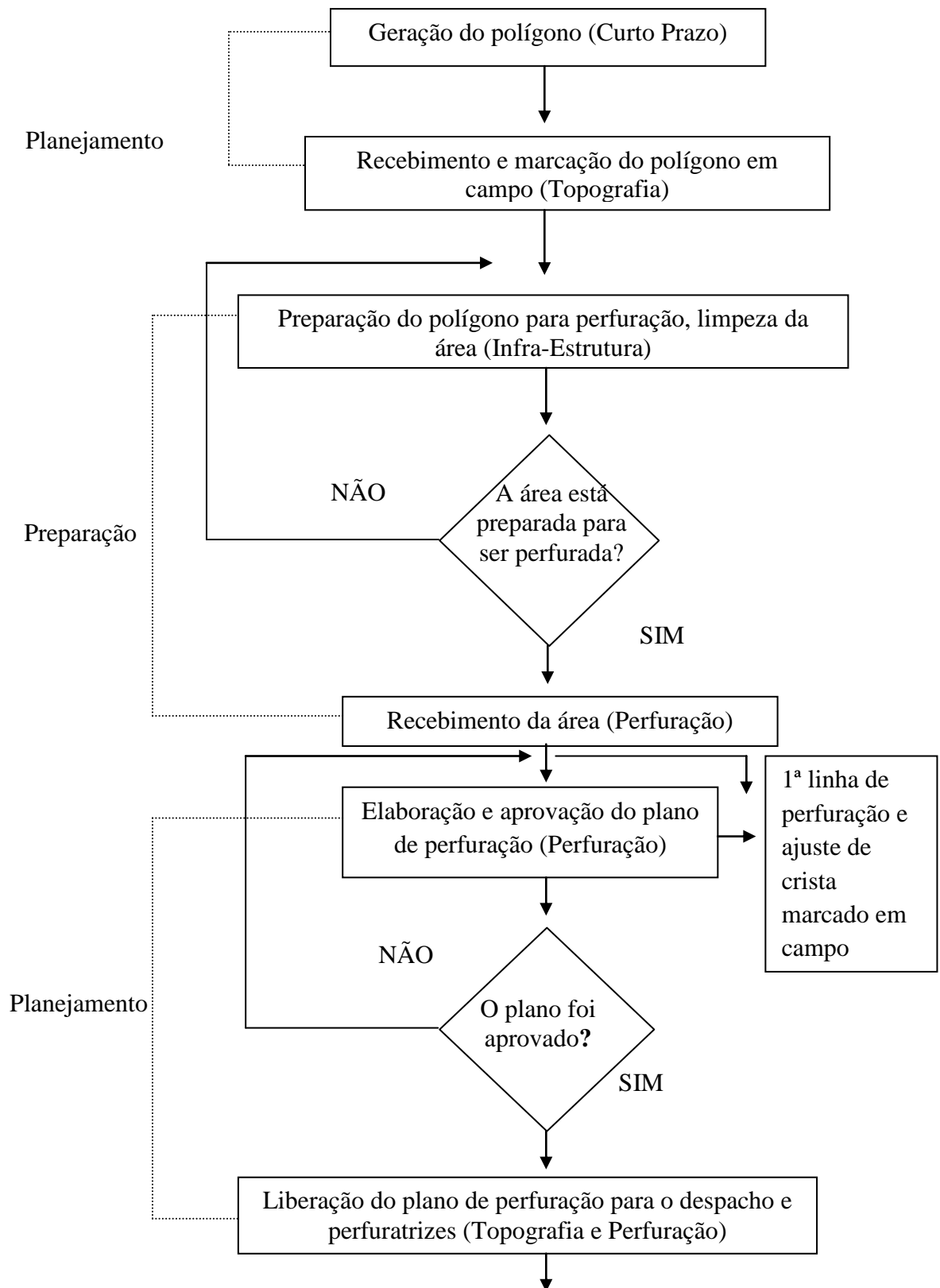
3. METODOLOGIA

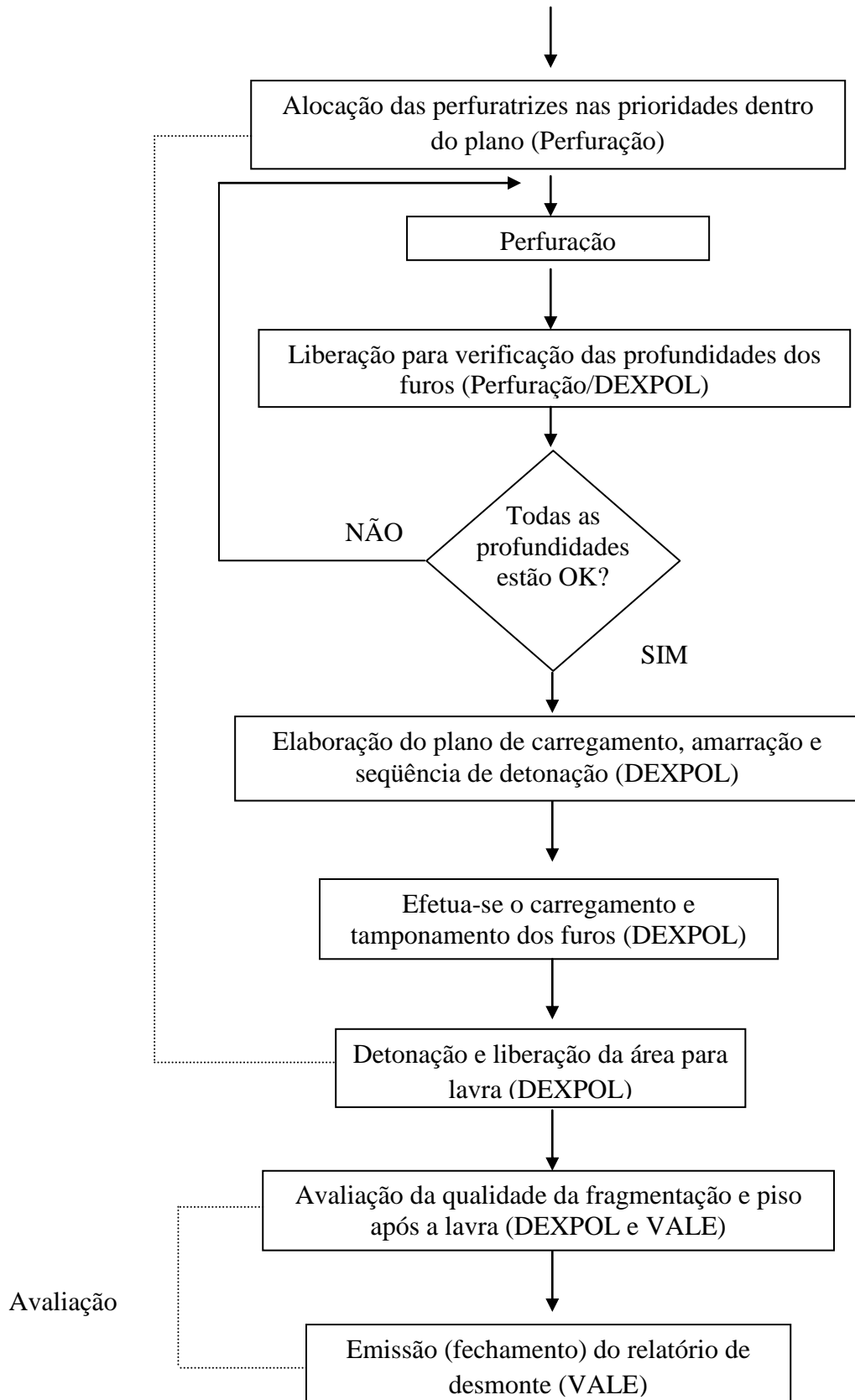
Neste trabalho, de natureza exclusivamente descritiva, fazemos o levantamento dos parâmetros usados para a execução das atividades de desmonte de rocha nas dependências da mina do sossego, localizada no município de Canaã dos Carajás, no estado do Pará.

A presente descrição abrange tanto a cava do sossego como a cava do sequeirinho. Para a construção da mesma fizemos visita em cada etapa dentro do processo; entrevista com profissionais da área; registro fotográfico e filmagens nos locais permitidos; bem como, acompanhamento da execução da marcação dos furos, perfuração, escorva, carregamento com explosivo, tamponamento, amarração dos furos, do fogo e também, da pré-avaliação da qualidade do mesmo.

Para a realização do trabalho foi utilizado o fluxograma, representado pela Figura 6 abaixo. O mesmo tem como objetivo: a visualização e apresentação das etapas do processo de perfuração e desmonte, composto de: planejamento, preparação da área, execução e avaliação. Com base neste fluxograma, fomos direcionados para cada uma das etapas do processo de perfuração e desmonte na mina.

Figura 6. Fluxograma do processo de perfuração e desmonte.





3.1. GERAÇÃO DO POLÍGONO PARA PERFURAÇÃO E DESMONTE

O primeiro passo para a execução do desmonte de rocha na mina do sossego é dado com a determinação do polígono sobre a área alvo para perfuração e desmonte. Tal polígono é gerado com base no modelo de blocos da mina, levando-se em consideração as prioridades da mesma. A geração deste polígono é de responsabilidade do planejamento de curto prazo.

A Figura 7 mostra a geração do polígono com base no modelo de blocos:

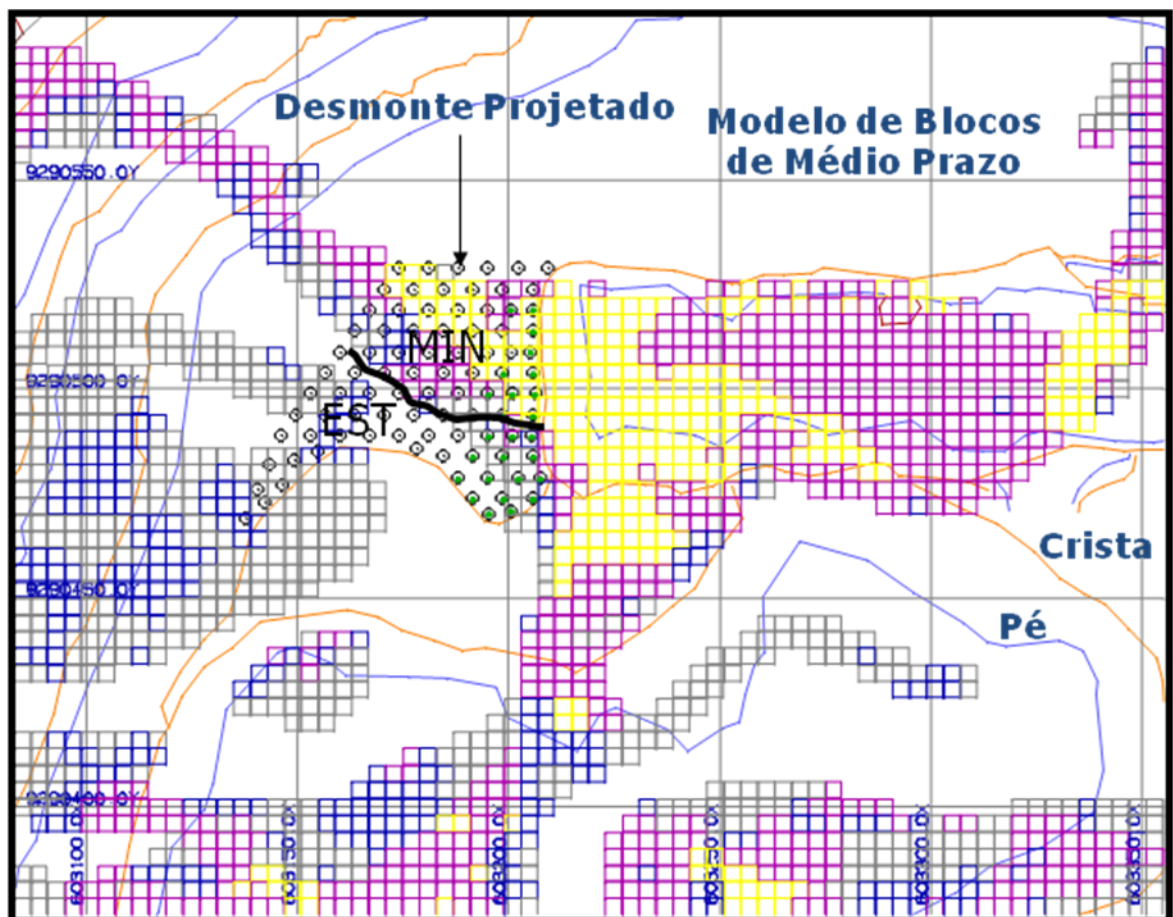


Figura 7. Definição de área para desmonte (CVRD, 2005)

3.2. MARCAÇÃO DO POLÍGONO EM CAMPO PARA A PERFURAÇÃO

Após a geração do polígono a topografia fica responsável pela marcação do mesmo no campo, realizando a marcação física.

A malha utilizada na mina no início de sua operação era padronizada, passando a variar em virtude de sua razão de carga.

Hoje a malha utilizada para o minério é 6,0m x 6,90m e para o estéril as seguintes malhas: 6,0m x 7,0m; 6,80m x 7,20m já foram utilizadas; mas atualmente utiliza-se a malha 7,6m x 8,8m.

As malhas tanto para o minério como para o estéril apresentam-se na geometria triângulo equilátero.

3.3. ELABORAÇÃO DO PLANO DE PERFURAÇÃO E EXECUÇÃO DOS FUROS

A área estando preparada para ser perfurada, inicia-se a execução do plano para a perfuração, onde é priorizada a 1ª linha de perfuração e ajuste de crista.

O plano sendo aprovado é liberado para o despacho (sistema destinado a locar e monitorar os equipamentos da mina) e para os operadores das perfuratrizes. Estes deslocam as perfuratrizes para as prioridades dentro do plano de perfuração, para isso guiando-se pelo GPS (Global Positioning System) de bordo, quase que exclusivamente, e também pelas marcações físicas feitas pela topografia.

Atualmente, na mina do Sossego, são utilizadas 12 perfuratrizes, conforme descrito abaixo:

- 04 perfuratrizes a diesel PIT VIPPER de 12 ¼” com broca e sistema rotativo;
- 04 perfuratrizes elétricas 49 HR de 12 ¼” com broca e sistema rotativo;
- 01 perfuratriz ECM 660 (perfura de 3” a 5 ½”), utilizada para perfurar irregularidades nas praças de carregamento;
- 01 perfuratriz Titon 600 da Sandvik (6 ½”) rotativa de martelo de fundo para perfurar pré corte.

Sendo que as primeiras perfuratrizes a serem utilizadas foram as SKS da Rendrill, que eram rotativas e perfuravam com um diâmetro de 9 7/8". Mas o aumento da produção da mina fez com que as mesmas fossem substituídas.



Figura 8. Vista da Pit Vipper



Figura 9. Perfuratriz Elétrica 49 HR

3.4. MEDIDA DAS PROFUNDIDADES E IDENTIFICAÇÃO DOS FUROS

Feitos os furos, são realizadas duas medidas de profundidade, uma pelos operadores das perfuratrizes para garantir que a profundidade perfurada seja a mesma da objetivada, e a outra é feita pela equipe da DEXPOL para garantir que a quantidade de explosivos que será aplicada seja igual à que foi planejada para cada furo. Caso alguma profundidade esteja fora dos padrões exigidos em projeto, o mesmo deve ser identificado, para que sejam tomadas as medidas de correção.

Realizada a medida do furo é feita a confecção de cartão de identificação, onde deve conter as seguintes informações: número do furo, profundidade real (Pr), profundidade objetiva (Po) e quantidade de água.

Depois de feito a parte de levantamento de profundidade é necessário que se faça a verificação de integridade da malha de furação projetada.

Todos os dados levantados nesta etapa devem ser relatados em planilhas e croquis (desenho detalhado da área de furação com as distâncias entre os furos de uma mesma linha em áreas de perfuração) padrão para observações futuras.



Figura 10. Medição da profundidade do furo (Pr).



Figura 11. Identificação do furo.

3.5. A COLETA DO PÓ DE PERFURAÇÃO

Por ocasião da perfuração é realizada a coleta do pó retirado dos furos pela geologia para que seja feita a análise química e determine com precisão a qualidade do material, se é minério ou estéril, e em caso de minério o seu teor.

A partir desta análise é que serão feitas ou não as blendagens para alimentar a britagem/usina.



Figura 12. Coleta do material dos furos para análise de teor.

3.6. ELABORAÇÃO DO PLANO DE FOGO

O plano de fogo é elaborado, levando-se em conta as características da rocha (que no caso da mina do sossego apresenta uma densidade bem considerável em algumas áreas e em outras se encontram bastante fraturadas), disposição e profundidade dos furos, quantidade de explosivos e acessórios a serem utilizados, razão de carga prevista e amarração dos furos, dentre outros parâmetros.

Nesta etapa, há uma atenção especial para a subperfuração, que é o elemento responsável pela não geração de repés. Quando os furos estão sem este elemento, adquadamente dimensionado, significa que naquela região de influência provavelmente surgirá o indesejável repé.

A subfuração utilizada na mina do sossego para o minério é de 1,5 m e para o estéril é de 2,0m.

3.7. FABRICAÇÃO DE EXPLOSIVOS DENTRO DA MINA

A fabricação, aplicação de explosivos nos furos, tamponamento, amarração, retardamento e detonação, na mina do Sossego, é de responsabilidade da DEXPOL, empresa contratada da Vale.

A citada empresa possui uma fábrica dentro da mina do Sossego, onde fabrica o explosivo em estado inerte chamado Ibenite (nome comercial do explosivo), com 70% de emulsão e 30% de nitrato de amônia, cuja densidade é de $1,15 \text{ g/cm}^3$, que ao ser transportado para o banco a ser desmontado, tem acrescentado à sua composição um agente sensibilizador, só então inicia-se o carregamento dos furos.

Optou-se pela instalação de uma fábrica dentro da mina, e isso significa que não haverá o transporte de cargas explosivas em rodovias e dentro de áreas habitadas do País, o que anula qualquer possibilidade de acidentes com explosões. É por ser seguro também dentro da mineradora, já que haverá transportes nessa área somente de produtos inertes, pois o produto só se tornará um explosivo, momentos antes de carregar os furos.

No início das operações de desmonte na mina, usava-se o ANFO, mas em virtude deste ser utilizado somente em furos secos, por ser hidrocópico, e a sua eficiência para fragmentar a rocha local (densidade $3,10 \text{ g/cm}^3$) não ser muito boa, optou-se pelo blendado. Pois este pode ser utilizado em furos que podem conter água, em virtude de sua densidade ser maior que a da água; e também possui uma resposta mais satisfatória na fragmentação da rocha, segundo os técnicos, a sua velocidade de detonação é maior que a do ANFO.



Figura 13. Carregamento dos furos com explosivo.

De posse da planilha com dados de levantamento de campo se faz o cálculo, da carga a ser aplicada no furo, levando-se em consideração a profundidade informada na planilha e a razão de carga pré-estabilizada para cada tipo de rocha.

3.8. TAMPONAMENTO DOS FUROS NA MINA

O tamponamento é feito com brita 1, cuja faixa granulométrica, varia de 11mm a 25mm. Com base em entrevista com os técnicos da área vantagem da utilização deste produto é que a brita confina melhor os gases dentro da massa de rocha que está sendo desmontada, assim tem-se um melhor aproveitamento da energia, diminui a ejeção do tampão e melhora a fragmentação. A desvantagem da brita é que aumenta o custo, pois paga-se por ela. No entanto, segundo os técnicos, é o melhor material para confinar os furos, especialmente na granulometria já citada.

O tampão utilizado para o minério geralmente varia entre 5 a 6 m e para o estéril de 6 a 7m. Dentre os motivos desta variação, foi justificado, pela a presença de maquinário e

equipamentos nas proximidades da bancada a ser desmontada, preservação de taludes; sendo nestes casos necessário aumentar o uso habitual da dimensão do tampão.



Figura 14. Tamponamento dos furos.

3.9. ACESSÓRIOS DE INICIAÇÃO UTILIZADOS NA MINA

Os acessórios de iniciação utilizados na mina são brinéis (acessório não elétrico para iniciação de cargas explosivas) para os furos e retardos de superfície (de 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 e 200 milissegundos de fabricação da DEXPOL; e também os retardos de 17, 42, e 75 milissegundos de fabricação da ORICA), bem como cordéis detonantes para as amarrações dos furos e reforçadores (boosters) de 1000g de pentolite.

Após a verificação das profundidades dos furos, é realizado a escorva dos furos seguindo o plano de fogo.

Em julho do ano passado se fez teste com um sistema de iniciação eletrônica, mas até o presente momento não se teve resultados conclusivos com respeito à aplicação deste sistema na mina, ao ponto de substituir o sistema em uso.



Figura 15. Amarrações entre os furos com cordel detonante.



Figura 16. Retardo de 30 milissegundos.



Figura 17. Realização da escorva.

4. AVALIAÇÃO DO DESMONTE

É elaborado um relatório antes e depois de cada desmonte realizado para se obter um diagnóstico do fogo.

No relatório que é feito antes do desmonte consta se a área a ser desmontada é de minério ou de estéril; a condição da face, se está livre ou obstruída; se os furos foram feitos conforme o plano; se os furos foram adequadamente carregados; se as amarrações se deu conforme o desenho.

No relatório que é feito após o desmonte, consta como foi a movimentação horizontal do material desmontado; a altura da movimentação vertical; se houve ou não ejeção; a qualidade da fragmentação; o perfil da pilha; se houve furos falhados; se houve a ocorrência de repé; o formato da pilha para a escavação.

A avaliação do desmonte é realizada primeiramente visualmente pelos técnicos responsáveis, logo no momento em que a área é liberada. Observando-se dentre outras coisas a granulometria do material desmontado, a altura da pilha, se houve ultralanchamento. E depois, mais precisamente, por meio do sistema da fotoanálise. São colhidos os relatórios e os vídeos/fotos referentes ao desmonte pelos técnicos da DEXPOL, que enviam para especialistas na UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto), que por sua vez fazem a análise das fotos identificando os possíveis erros e sugerindo correções e ajustes para os próximos desmontes, deste modo, primando-se cada vez mais pela otimização desta operação na mina do sossego; pois o ideal no desmonte é utilizar menos explosivo obtendo-se uma satisfatória fragmentação.



Figura 18. Material desmontado.

5. CONCLUSÃO

Percebemos que em se tratando de desmonte de rochas o alvo a ser alcançado é a fragmentação satisfatória, ou seja o seu ponto ótimo, pois tal coisa influenciará decisivamente no decréscimo do custo total de uma mina; portanto deve-se evitar os dois extremos em fragmentação: uma fragmentação grosseira ou uma fragmentação com a presença de uma grande quantidade de partículas finas e ou ultra finas.

A etapa de beneficiamento que recebe o minério proveniente da mina, deve recebê-lo em uma granulometria satisfatória para que seja processado adequadamente. E assim, podendo ser concentrado com sucesso. Este era um problema que estava ocorrendo na etapa do beneficiamento na mina do sossego, mas especialmente na flotação. Partículas excessivamente finas, estavam chegando nas células de flotação, e por conseguinte não flotavam, havendo perda de minério para barragem de rejeito. A solução proposta para amenizar o problema foi a de diminuir o tamanho das bolhas dentro das células de flotação ou então, aumentar o tamanho das partículas de mineral que chegam dentro das mesmas. E, no que diz respeito à segunda alternativa proposta como solução, para atingi-la, logicamente, acompanhadas por outros parâmetros devia-se diminuir o diâmetro dos furos, ou seja, diminuir a área de contato da coluna de explosivo com a rocha circundante, minimizando assim, a produção excessiva de partículas finas e ultra finas, com a detonação do explosivo.

Foi observado que na mina do sossego há constantemente desmontes secundários. Isso em decorrência de um plano de perfuração, que não foi seguido à risca e ou por falha em algum parâmetro do plano de fogo; e ainda por não ter sido considerado alguma característica do maciço rochoso.

Pode acontecer que durante a operação de perfuração, o operador, por descuido, execute a furação com excesso ou falta de profundidade. Quando o furo é executado com profundidade menor do que aquela planejada, ocorrerá a formação de repés e uma fragmentação grosseira na parte inferior do banco. Quando o furo é executado com uma profundidade muito maior do que a planejada, resultará no aumento dos níveis de vibração no maciço. E pode ocorrer erro também, na alocação da perfuratriz, sob o ponto exato a ser perfurado, alterando a geometria da malha. Observa-se que erros cometidos durante a perfuração são possíveis de serem minimizados se a empresa adotar como rotina de campo um programa de monitoramento ainda mais rígido dessa operação; pois a mesma é de grande importância e afeta diretamente o custo final da lavra.

A caracterização de maciços rochosos para o desmonte por explosivos é uma importante ferramenta que ajuda a otimizar esta operação, por permitir instaurar planos de fogo adequados a determinadas condições. Racionaliza-se assim o uso de explosivos, acessórios e equipamento de perfuração, minimizando efeitos e resultados indesejáveis, e reduzindo os custos de lavra.

Observa-se com os trabalhos de campo que medidas simples como uma melhor atenção para as características do maciço, aliado a um planejamento correto tanto do plano de perfuração como o de fogo, podem proporcionar melhores resultados em curto prazo, reduções de impactos, desmontes secundários, além da redução dos custos operacionais e situações de risco.

Falando em situação de risco, outra questão observada na mina do sossego está relacionada com as faces das bancadas que se encontram bastante fraturadas, ocasionando desmoronamentos. Por conta disso, acumula-se muito material no pé dos bancos de forma que os trabalhos geotécnicos ficam um tanto comprometidos quando se quer traçar um perfil real de como se encontram os bancos. Como medida proposta para amenizar o problema de forma imediata, sugere-se, a limpeza constante nestas áreas antes da execução dos trabalhos geotécnicos. E também é recomendável a sinalização dessas áreas para evitar possíveis acidentes.

Com base nas observações feitas na mina, sugere-se o investimento no estudo do aproveitamento do óleo queimado dos equipamentos da mina na fabricação de explosivos. Esse estudo, certamente irá trazer redução do custo de insumos de fabricação do explosivo e também melhoria para o meio ambiente pela redução da quantidade de óleo a ser descartada.

Outra sugestão a ser deixada neste trabalho e a implementação de testes com o tamponamento com brita com outras granulometrias, como por exemplo a brita 2, cuja faixa granulométrica vai de 25mm à 32mm, será que não confinaria melhor os gases?

Deste modo ao longo neste trabalho, mas especificamente, nas observações feitas em campo podemos perceber a busca constante pela otimização do desmonte de rocha na mina do sossego, com a experimentação de novas tecnologias, na tentativa de se obter um maior controle da qualidade desta operação unitária.

A mina do sossego é um campo vasto de desafios a serem superados, uma fonte de relevantes conhecimentos. E estes, se multiplicam acompanhando as mais altas tecnologias ali utilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BONATES, EDUARDO JORGE LIRA. A Aplicação de Espoleta Eletrônica em Desmonte de Rochas com Explosivos. UFCG - Campina Grande, 2004.

CAMERON, A. e HAGAN, T. Curso Internacional: Tecnologia de Desmonte de Rochas com Explosivos para Minas a Céu Aberto e Subterrâneas. Belo Horizonte: IBRAM, 1996.

CASTRO, ADILSON SANTANA. Dissertação de Mestrado: Avaliação da Fragmentação dos Desmontes de Rocha Através de Fotoanálise, UFOP - Ouro Preto, 2000.

CVRD. Plano de Desenvolvimento Econômico, Março, 2000.

MORAIS, JUAREZ LOPES. Tese de Doutorado: Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rocha por Explosivo, UFMG – Belo Horizonte, 2004.

MUNARETTI, ENRIQUE. Tese de Doutorado: Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de Misturas Explosivas a Base de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível, UFRS - Porto Alegre, 2002.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. Fabricação na Mina gera Economia de Custos. Edição 299, Novembro, 2007.

REVISTA MINÉRIOS & MINERALES. Tecnologias e Novos Serviços são Diferenciais nos Desmontes de Rochas e Dimensionamento de Planos de Fogo. Edição 297, Outubro, 2007.

SILVA, LINEU AZUAGA AYRES. A Influência dos Desmontes por Explosivos na Estabilidade dos Taludes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Curso - Proyecto CYTED XIII - 3 - Junio 2005 - Córdoba – Argentina

SILVA, VALDIR COSTA . Departamento de engenharia de minas. Escola de Minas. Apostila de Operações Mineiras, UFOP- Ouro Preto, 2007.

Procedimento Operacional 07 de Operação de Mina, VALE, Setembro, 2007.