

EPMI
ESP/EST-2012
P414s

São Paulo
2012

SEGURANÇA NO DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS EM LAVRA A CÉU ABERTO

Tiago Junqueira Pereira

Tiago Junqueira Pereira

**SEGURANÇA NO DESMONTA DE ROCHA COM EXPLOSIVOS EM
LAVRA A CÉU ABERTO**

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
título de Especialista em
Engenharia de Segurança do
Trabalho**

**São Paulo
2012**

RESUMO

Com o crescimento das cidades, atividades de mineração, notadamente as pedreiras, são vizinhas de comunidades. E, para o bom relacionamento entre as partes, é importante que a empresa se preocupe com a segurança no desmonte de rocha com explosivos internamente, para garantir a segurança dos seus funcionários, e externamente, para garantir segurança para a comunidade. Os pontos destacados nesse trabalho dizem respeito a segurança no transporte de explosivos, manuseio, ultra-lançamentos, vibração e ruído. Um estudo de caso foi feito em uma pedreira em São Paulo, mostrando a tecnologia envolvida e as medidas de segurança necessárias para um desmonte de rocha seguro.

Palavras chave: segurança, explosivos, mineração.

ABSTRACT

Due to the growth of cities, mining activities, notably the quarries, which were previously distant from residential and industrial areas, are now neighboring communities. And, for the good relationship between the parties, it is important that the company worry about security in rock blasting internally to ensure the safety of its employees, and externally, to ensure safety for the community. Points raised in this study relate to safety in the transport of explosives, handling, ultra-releases, vibration and noise. A case study was done in a quarry at São Paulo, showing the technology involved and the safety procedures necessary for a safe rock blasting.

Keywords: safety, explosives, mining.

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Tiago Junqueira
Segurança no desmonte de rocha com explosivos em lavra
a céu aberto / T.J. Pereira. -- São Paulo, 2012.
68 p.
Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança
do Trabalho) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Programa de Educação Continuada em Engenharia.
1. Desmonte de rochas (Segurança) I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada
em Engenharia II. t.

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO	8
1.2	JUSTIFICATIVA	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	DEFINIÇÃO DE EXPLOSIVO	10
2.2	BREVE HISTÓRICO	10
2.3	MECANISMOS	11
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS EXPLOSIVOS	12
2.4.1	EXPLOSIVOS INICIADORES – PRIMÁRIOS	12
2.4.2	ALTOS EXPLOSIVOS – SECUNDÁRIOS	12
2.4.3	COMPOSIÇÃO	12
2.4.4	CONSISTÊNCIA	13
2.5	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS	13
2.6	TIPOS DE EXPLOSIVOS	14
2.6.1	PÓLVORAS NEGRAS	14
2.6.2	DINAMITES E GELATINAS	15
2.7	ACESSÓRIOS DE DETONAÇÃO	16
2.8	FATORES PARA DIMENSIONAMENTO DE DESMONTES PRIMÁRIO A CÉU	17
2.8.1	DIÂMETRO DO FURO (D)	18
2.8.2	COMPRIMENTO DO FURO (H1)	19
2.8.3	SUBFURAÇÃO (SF)	19
2.8.4	INCLINAÇÃO DO FURO (A)	19
2.8.5	AFASTAMENTO (V)	20
2.8.6	ESPAÇAMENTO (E)	20
2.8.7	CARGA DO FURO (CF)	21
2.8.8	TAMPONAMENTO (A)	21
2.8.9	RAZÃO DE CARGA (R)	21
2.9	AMMONIUM NITRATE/FUEL OIL - ANFO	22
2.9.1	DESCOBERTA DO ANFO	22
2.9.2	FABRICAÇÃO DE NITRATO DE AMÔNIO	23
2.9.3	PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS A BASE DE PETRÓLEO	25
2.10	TEORIA DE DETONAÇÃO	26
2.10.1	DETONAÇÃO IDEAL	26
2.10.2	DETONAÇÃO NÃO IDEAL	27
2.10.3	MECANISMOS DE QUEBRA DE ROCHA	28
2.10.4	BALANÇO DE OXIGÊNIO	30
2.11	VIBRAÇÃO DE SOLOS	33
2.11.1	CRITÉRIOS DE PREVENÇÃO DE DANOS CAUSADOS POR VIBRAÇÕES DE SOLOS	33
2.11.2	INFLUÊNCIA DAS DIVERSAS VARIÁVEIS NAS VIBRAÇÕES DE SOLOS	36
2.11.3	MEDIDAS PRÁTICAS PARA REDUZIR VIBRAÇÕES DE SOLOS	38
2.12	SOBREPRESSÃO ATMOSFÉRICA	39
2.12.1	CRITÉRIOS DE PREVENÇÃO DE DANOS PROVOCADOS POR ONDA AÉREA	40
2.12.2	MEDIDAS PRÁTICAS PARA REDUZIR SOBREPRESSÃO ATMOSFÉRICA	41

60	6 BIBLIOGRAFIA.....
59	5 CONCLUSÕES
48	4.1.2 SISMOGRAFIA E RUÍDO
48	4.1.1 PLANO DE FOGO.....
48	4.1 ESTUDO DE CASO – PEDREIRA NA GRANDE SÃO PAULO
48	4 MATERIAIS E MÉTODOS
47	3.4 RECOMENDAÇÃO TÉCNICA FUNDACENTRO
46	3.3.3 FATORES AMBIENTAIS.....
45	3.3.2 FATORES OPERACIONAIS
45	3.3.1 FATORES PESSOAIS
44	3.3 AS LIÇÕES APRENDIDAS COM OS ACIDENTES FATAIS
44	3.2 RISCOS DE EXPLOSAO A CÉU ABERTO
42	EXPLOSIVOS EM MINAS CÉU ABERTO
42	3.1 PROCEDIMENTO GENÉRICO PARA O CARREGAMENTO E DETONAÇÃO DE
42	3 SEGURANÇA NO USO DE EXPLOSIVOS

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é mostrar os principais explosivos utilizados e os riscos associados ao seu uso.

1.2 JUSTIFICATIVA

Explosivos são usados para fragmentar rochas desde a introdução da pólvora por volta do ano 1600 e ainda hoje é, na maioria dos casos, o método mais econômico e o mais apropriado para desmonte e movimentação de rochas e amplamente usado na mineração e construção civil.

Para a lavra a céu aberto o processo de desmonte de rocha envolve as seguintes etapas: perfuração, detonação, carregamento e transporte e representa um custo significativo do empreendimento.

Com a constante pressão das empresas por redução de custos, o entendimento dos riscos associados ao uso de explosivos e a aplicação de medidas de controle ou mitigação dos riscos não pode ser deixada em segundo plano.

Dado o custo de transporte de matérias primas de mineração, principalmente no caso de agregados usados na construção civil, como brita por exemplo, e o crescimento das cidades para as periferias, a maioria das pedreiras, que quando iniciaram a operação estavam longe das casas, prédios, condomínios e empresas, começam a ficar cercadas pela comunidade.

Essa proximidade faz com que o desenvolvimento dos trabalhos de lavra tenha que ser mais cuidadoso, e a segurança do desmonte com explosivos passa a ser cada vez mais significativo para uma boa relação da pedreira com a comunidade ao redor. Nesse cenário, ser faz importante entender que o trabalho com explosivos precisa ser criterioso na sua aplicação, aí incluído o manuseio, transporte e a detonação em si, e também no seu projeto. Cabe ao pessoal envolvido conhecer e dimensionar as variáveis do plano de fogo, como malha de furação, tamponamento,

sequenciamento dos furos, etc., para que cause o menor risco para a empresa, funcionários envolvidos e cause o menor impacto possível na comunidade ao redor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINIÇÃO DE EXPLOSIVO

Explosivo pode ser considerado como uma substância, ou mistura de substâncias químicas, que tem a propriedade de, ao ser iniciado convenientemente, sofrer transformações químicas violentas e rápidas, transformando-se em gases, que resultam em liberação de grandes quantidades de energia em reduzido espaço de tempo.

2.2 BREVE HISTÓRICO

A pólvora foi, sem dúvida, o primeiro passo para o desenvolvimento dos produtos conhecidos hoje como explosivos. Inicialmente utilizada pelos chineses como pirotécnico passou com algumas modificações a propelente de projéteis e armamentos em geral. (Pinheiro, 2011)

No fim da idade média (por volta de 1354 d.C.), na Europa, o monge Shwartz obteve mistura explosiva semelhante a dos chineses, que foi em seguida sendo adotada e aplicada, em suas diversas formas e variações, para fins bélicos.

O segundo passo foi dado em 1847 com a descoberta da Nitroglicerina pelo italiano Ascanio Sobreno. Foi uma verdadeira revolução, pois este preparado oferecia um poder de explosão muitas vezes maior que o da pólvora. Porém era muito perigoso quando submetido a movimentos bruscos ou atrito, este fato limitava as condições de segurança em seu manuseio. Em 1863 o Sueco Alfred Nobel superou este inconveniente adicionando diatomácea a Nitroglicerina. Produzindo desta forma a **Dinamite**: explosivo potente que oferecia ao mesmo tempo boas condições de segurança.

A casualidade por outro lado, em 1923, na cidade alemã de Oppau, deu existência industrial a outro membro da família dos explosivos, quando ao tentar-se

dinamitar uma partida de **Nitrato de Amônio** que havia empedrado pela ação da umidade provocou-se enorme explosão.

De outro acidente nasceu o **ANFO (Amonium Nitrate and Fuel Oil)** mistura de Nitrato de Amônio e Óleo Diesel, quando o choque entre dois navios, carregando os dois produtos, resultou em incêndio seguido de violenta explosão que arrasou o Porto de Texas.

Completando a família dos explosivos nasceram em 1958 as **Lamas Explosivas**: misturas em proporção adequada de Nitrato de Amônio, Óleo Diesel, Água e outros produtos tais como pó de Alumínio, Goma e Bórax, que pela enorme quantidade de energia útil desenvolvida, apresentam grande capacidade de trabalho na ruptura de rocha e materiais duros em geral. (Pinheiro, 2011)

2.3 MECANISMOS

O explosivo utiliza a energia para arrancar o maciço rochoso que está adiante dele, no sentido da face livre ou linha de menor resistência.

Em furo suficientemente adensado, um explosivo pode produzir pressões de até 100.000 atmosferas. É uma soma fabulosa de energia que deve ser bem aproveitada devido ao seu curto espaço de duração, pois ela provém do grande volume de gases liberados pela explosão. Durante a explosão a temperatura pode alcançar de 2500 a 4000°C. A nitroglicerina, principal substância explosiva, aumenta de 18000 a 19000 vezes o seu volume original.

A detonação de um explosivo ocorre uma série de fenômenos tanto de natureza dinâmica como de natureza estática, que são:

1. A onda de choque percorre a rocha a uma velocidade de 3000 a 5000 m/s causando fissuras na rocha

2. O diâmetro inicial do furo é alargado para o dobro por deformações plásticas

3. A onda de choque produz tensões radiais e tangenciais na rocha ao se deslocar do centro para a periferia.

4. Ao chegar à frente livre da bancada a onda de choque tende a projetar o material da superfície (lançamento do material a grandes distâncias). Este lançamento é tão mais acentuado quanto mais fraturada for a rocha. (Pinheiro, 2011)

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS EXPLOSIVOS

2.4.1 EXPLOSIVOS INICIADORES – PRIMÁRIOS

São extremamente sensíveis e, por isso, adequados à detonação da massa de explosivos da perfuração. Produzem um efeito de sopro intenso ou onda de choque capaz de iniciar a detonação da mesma. (MARTINS, 1997)

2.4.2 ALTOS EXPLOSIVOS – SECUNDÁRIOS

Detonam a velocidades entre 2500 e 7500m/s, acompanhados de quantidades enormes de gases e pressões muito altas (100.000 atmosferas). A detonação dá origem à formação de uma onda de choque que percorre o maciço rochoso, causando fissuras na rocha. A onda de choque, aliada à pressão dos gases formados pela explosão, quebra a rocha empurrando-a em direção à face livre. (MARTINS, 1997)

2.4.3 COMPOSIÇÃO

Do ponto de vista da **composição** os explosivos usados na escavação de rocha classificam-se:

- Explosivos simples: São aqueles formados por um único componente químico. Nitroglicerina, nitroglicol, nitrocelulose, trotil e ciclonite

- Explosivos mistos: Formados por substâncias que consomem e produzem oxigênio, mas que não são explosivos quando isolados. Pertencem a esta categoria os nitratos orgânicos, cloratos e percloratos. O mais importante é o nitrato de amônio que, misturado com óleo diesel, é um explosivo de larga utilização (ANFO).

- Explosivos compostos: São resultantes da mistura de explosivos simples com substâncias capazes de consumir e também produzir oxigênio. A maior parte dos explosivos comerciais pertence a esta categoria, porque apresentam a vantagem de variando-se as proporções ou tipo de componentes, serem obtidos determinadas qualidades desejáveis. Consegue-se, dessa maneira, melhoras as propriedades do explosivo simples adicionando-se a uma substância produtora de oxigênio.

2.4.4 CONSISTÊNCIA

- De acordo com a consistência os explosivos podem ser classificados:
- Explosivos plásticos e semi-plásticos: Adaptam-se a forma do furo, podendo assim preencher maior volume.
 - Explosivos sólidos: São utilizados sob a forma de cartuchos contendo o explosivo em pó.
 - Explosivos líquidos: Grande facilidade de carregamento.

2.5 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

Os diferentes tipos de explosivos apresentam características definidas que o recomendam para algumas aplicações e desaconselham para outras. Por isso, é necessário avaliar quais as propriedades desejadas para um determinado tipo de trabalho, procedendo-se uma escolha criteriosa.

- a. Força: traduz a quantidade de energia liberada na detonação e significa, portanto, a capacidade de o explosivo produzir trabalho de desmonte de rocha. Relacionada com o explosivo padrão – Nitroglicerina (100%).
- b. Velocidade: é uma grandeza importante que deve ser levada em conta em vista do tipo de rocha a explodir. É a velocidade da reação química da massa do explosivo – onda da detonação (intensa luz, calor e gases a pressão elevada). Explosivos à base de nitroglicerina – velocidade de 4000 a 7500ms.

c. Resistência à água: é outra propriedade importante, pois em muitos casos, haverá concentração de água nas perfurações. Se o explosivo utilizado tiver baixa resistência à água, ficará neutralizado e não detonará. Normalmente os produtos nitroglicerinados, quanto maior a quantidade de nitroglicarina maior a resistência à água. Já os explosivos amoniacais normalmente tem pouca resistência à água sendo reforçado a embalagem.

d. Segurança no manuseio: o explosivo, desde a sua produção até detonação final nas perfurações, é armazenado, transportado, sofrendo uma série de transbordos e choques. Por isso é imprescindível que apresente segurança no manuseio, isto é, que não detone com facilidade.

e. Densidade: um explosivo de alta densidade permite maior concentração, isto é, possibilita introduzir maior massa de explosivo por metro de perfuração. Quando se deseja uma alta fragmentação da rocha é conveniente utilizar explosivo de alta densidade.

f. Sensibilidade: sensibilidade de explosivos secundários à detonação provocada pelo acessório. Sensibilidade à iniciação e à propagação.

g. Volume de gases: ao longo do processo de explosão ocorre o desenvolvimento de maior ou menor quantidade de gases.

Baixa expansão gasosa - < 800 l/kg.

Alta expansão gasosa - > 800 l/kg.

h. Gases tóxicos: os gases formados durante a detonação de explosivos podem ser tóxicos. Categoria A – Classe 1 (pouco tóxicos). Categoria B – Classe 2 (quantidade elevada de gases tóxicos). Categoria C – Classe 3 (quantidade elevada de gases tóxicos).

2.6 TIPOS DE EXPLOSIVOS

2.6.1 PÓLVORAS NEGRAS

As pólvoras foram muito utilizadas até a descoberta da nitroglicarina. Apresentam baixa velocidade, enquadradas na categoria de baixos explosivos,

altamente higroscópicos, não podendo ser empregados em presença de água. (MARTINS, 1997)

Tipo A – contém nitrato de potássio, enxofre e carvão vegetal. Utilizada para cortar pedras, paralelepípedos, lajotas para revestimentos e pisos.

Tipo B – contém nitrato de sódio, enxofre e carvão vegetal. É mais lenta e também com menor força, utilizada para detonação de argilas e folhelhos.

2.6.2 DINAMITES E GELATINAS

São constituídas por explosivos de base trinitroglicerina, explosivos complementares, substâncias ativas absorventes (serragem de madeira, cortiça, aveia, centeio); substâncias geradoras de oxigênio (nitrato de amônio, sódio, potássio, clorato e percloratos); substâncias que aumentam a potência (pó de sílicio, alumínio e magnésio) e substâncias que abaixam o ponto de congelamento (cloreto de sódio, bicarbonato de sódio).

Dinamite comum: contém nitroglicerina, nitrato de sódio, celulose e enxofre.

Consistência semiplástica a sólida. Mais sensíveis e caras.

Velocidade de detonação maior. Cartuchos 1 1/8" a 1 1/4" de diâmetro e 8, 16 e 32" de largura – caixa de 25 kg.

Dinamite especial ou amoniaca: parte da nitroglicerina é substituída por nitrato de amônio. São mais seguras e econômicas. Velocidade de detonação menor.

Cartuchos 1 1/8" a 1 1/4" de diâmetro e 8, 16 e 32" de largura – caixa de 25 kg.

Gelatina: contém nitroglicerina, nitrato de sódio, enxofre e farinhas orgânicas.

Consistência plástica e semiplástica. Permite acomodação ao furo.

Gelatina especial ou amoniaca: parte de nitroglicerina é substituída por nitrato de amônia.

Nitrato de amônio: produto químico largamente utilizado como fertilizante agrícola. São seguros, detonam com escorva, necessitam de uma iniciação através de cartucho de alto explosivo para serem detonados. ANFO (ammonium nitrate + fuel oil): nenhuma resistência à água, baixa densidade, baixa velocidade de detonação, baixo custo e precisam de escorva.

Granulados: explosivos em forma de grãos, geralmente com carbonitratos como explosivo básico e que exigem alto explosivo para que ocorra a detonação. Sacos plásticos de 25 kg.

Lamas explosivas: consistência de uma pasta fluida, sensibilizados por nitroglicerina. Apresenta como característica principal água em sua fórmula. Alta densidade com elevada razão linear de carregamento. Alta resistência à água. Muito utilizado atualmente.

2.7 ACESSÓRIOS DE DETONAÇÃO

Introduzidas as cargas explosivas nos furos, procede-se à detonação inicial, através de acessórios especiais, que provocará a explosão das cargas.

a. Estopim: é um filamento de pólvora enrolado e protegido por fio ou fita (tecidos impermeabilizantes), encerrado ou com revestimento plástico. Queimam com velocidade constante e conhecida. Produzem na extremidade oposta um sopro ou chama capaz de provocar a detonação de pólvora ou espoleta.

b. Espoleta simples (comum): são cápsulas de alumínio, fechada em uma extremidade, preenchida por uma carga iniciadora (azida de chumbo), uma carga de base (tetra-nitrato de penta eritról). São sempre iniciadas por estopim introduzido na outra extremidade da cápsula por meio de um alicate especial. Usadas para detonações secundárias e não são usadas em detonações simultâneas.

c. Espoletas eletrônicas: são detonadas por uma corrente elétrica sendo necessária uma intensidade mínima para provocar a explosão, permitem detonar diversas cargas ao mesmo tempo. Podem ser instantâneas ou de tempo.

d. Cordel detonante: é a forma mais segura para detonação a céu aberto (sem escorva para cargas explosivas, detonado-as também. O núcleo é formado por eletricidade). O cordel é em si um explosivo e por isso quando detona, age como

um alto explosivo (tetranitratato de penta-eritritol – PETN) com uma velocidade de 7000m/s. O revestimento pode ser de cera e algodão; cera, algodão e revestimento plástico; cera, algodão e alma de arame no revestimento plástico (nylon). A iniciação do cordel pode ser feita com espoleta comum ou espoleta elétrica (ligada ao cordel no momento da detonação). Possibilita a detonação com retardos através de utilização de conectores. As conexões podem ser feitas por nós ou fitas.

2.8 FATORES PARA DIMENSIONAMENTO DE DESMONTE PRIMÁRIO A CÉU

ABERTO

Os fatores mais importantes para a realização de desmonte primário a céu aberto são os seguintes: (MARTINS, 1997)

- Diâmetro do furo (d)
- Comprimento do furo (H1)
- Subfuração (SF)
- Inclinação do furo (α)
- Afastamento (V)
- Espaçamento (E)
- Carga de um furo (H1)
- Tamponamento (A)
- Razão de Carga (R)

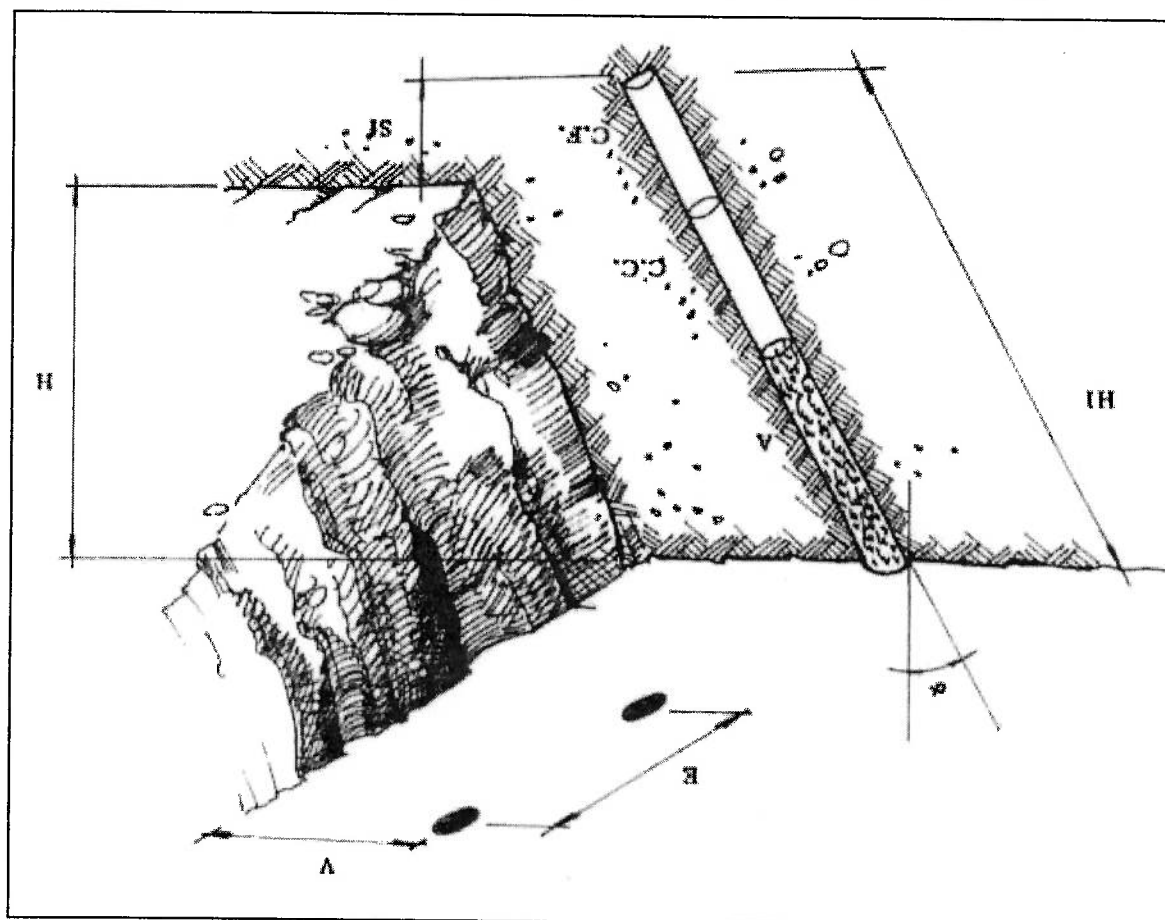
O diâmetro do furo está condicionado pelo tipo de equipamento disponível, caso exista. Se não existir escolhe-se o diâmetro pretendido e adquire-se o equipamento necessário.

Na prática, o diâmetro está relacionado com a altura da bancada e assim temos que, quanto maior o diâmetro do furo, mais alta poderá ser a bancada.

Geralmente os diâmetros mais usados são os que vão desde 2 polegadas até 4 polegadas.

2.8.1 DIÂMETRO DO FURO (D)

Figura 2.1 – Dimensionamento de Plano de fogo (MARTINS, 1997)



2.8.2 COMPRIMENTO DO FURO (H1)

Após se fixar o diâmetro do furo passa-se a dimensionar a altura mais adequada para o diâmetro escolhido e para as condições existentes. Como foi dito anteriormente não são aconselháveis bancadas muito altas. Assim sendo, e se o furo for vertical, a altura do furo é dado pela seguinte expressão:

$$H1 = H + 0,3 \times V$$

Sendo H1 a altura do furo final, H a altura da bancada e $0,3 \times V$ a subfuração, sendo V o afastamento do furo à frente da bancada.

2.8.3 SUBFURAÇÃO (SF)

A subfuração é feita para garantir a qualidade da bancada posteriormente, o que facilita a execução do carregamento do material desmontado e os trabalhos na bancada. No caso de não ser feita a subfuração, a base da bancada não será arrancada segundo um ângulo de 90 graus, originando por isso um repê. Este repê necessita de ser retirado por um fogo secundário, o que encarece os trabalhos.

$$St = 0,3 \times V$$

Se o valor da subfuração for superior a $0,3 \times V$, aumenta o consumo de explosivo, e não se obtém grandes vantagens.

2.8.4 INCLINAÇÃO DO FURO (A)

Atualmente o hábito de fazer furos verticais em bancadas tende a diminuir, exceto em casos particulares, tais como a obtenção de blocos de rochas, etc. A execução de furos inclinados apresenta algumas vantagens, sendo de salientar:

- bancadas mais seguras
- melhor fragmentação da rocha
- maior produção da rocha
- diminuição do consumo de explosivo
- maiores afastamentos e espaçamentos entre furos
- eliminação dos repês
- menores vibrações

As inclinações variam de local para local, podendo estar 10 e 30 graus, sendo os valores mais usuais compreendidos entre 15 e 20 graus.

Com inclinação, a determinação da altura do furo passaria a ser feita através da seguinte expressão:

$$H1 = (H/\cos \alpha) + 0,3 \times V$$

sendo α o ângulo que o furo faz com a vertical.

2.8.5 AFASTAMENTO (V)

Entende-se por afastamento a distância que vai do furo à frente da bancada, ou entre linhas de furos. Este afastamento é calculado através da seguinte expressão:

$$V_{\max} = 45 \times d, \text{ sendo } d \text{ o diâmetro do furo, expresso em mm}$$

Na prática este valor de $V_{\max}$ deve ser ajustado uma vez que a precisão na furagem pode apresentar alterações (desvios). Estes desvios devem ser avaliados, passando o afastamento a Ter o valor correspondente a:

$$V1 = 85\% V_{\max} \text{ ou } V1 = 0,85 \times V_{\max}$$

Por vezes também se utiliza a fórmula:

$$V = d, \text{ em que } V \text{ está em metros e } d \text{ em polegadas.}$$

2.8.6 ESPAÇAMENTO (E)

Espaçamento é a distância que existe entre dois furos consecutivos na mesma fila de furos. O espaçamento que permite bons resultados de fragmentação e movimentação de rocha é dado pela expressão:

$$E = 1,3 \times V$$

Através da variação do espaçamento (E) e do afastamento (V) pode-se variar o tipo de fragmentação, assim:

- Se aumentar E e diminuir V, a rocha ficará mais fragmentada logo com blocos de menor dimensão.

- Se diminuir E e aumentar V, a rocha ficará menos fragmentada, logo com blocos de maior dimensão

2.8.7 CARGA DO FURO (CF)

A carga de um furo é composta na maior parte dos casos por carga de fundo (CF) e carga de coluna (CC). A sua distribuição ao longo do furo não deve ser uniforme. Assim a parte correspondente à carga de fundo é dada por:

$$CF = 1,3 \times V$$

A carga de coluna é dada por :

$$CC = H1 - (A + CF)$$

O restante do furo é para tampão.

2.8.8 TAMPONAMENTO (A)

O taponamento pode ser considerado como fechar do furo. Este tem um comprimento semelhante ao valor do afastamento e deve ser feito com material de granulometria fina ou com peças destinadas a executar essa função (argila, areia, pó da furação, etc.).

O taponamento não deve ultrapassar o valor do afastamento, pois pode originar blocos de grandes dimensões, vindos da parte superior da bancada. Não se deve Ter um valor muito inferior porque há possibilidade dos gases da explosão escaparem por aí e provocarem projeção de rocha.

2.8.9 RAZÃO DE CARGA (R)

O consumo específico pode definir-se como massa total de explosivos utilizados, pelo volume, ou massa, total de rocha desmontada. Usualmente este cálculo é simplificado e efetuado unicamente utilizando como referência o peso do explosivo utilizado num furo e volume de rocha que esse furo desmonta.

Assim temos:

$$R = (C.C + C.F) / (E \times V \times H)$$

É habitualmente expressar o valor da Razão de Carga em g/T ou g/m³.

2.9 AMMONIUM NITRATE/FUEL OIL - ANFO

Como mostrado anteriormente, vários tipo de explosivos comercialmente utilizados no mercado de mineração. Comercialmente, no mercado de mineração o explosivo usado em maior volume é o Nitrato de Amônia/Óleo Combustível, ANFO da sigla em inglês.

2.9.1 DESCOBERTA DO ANFO

O crescimento no uso de ANFO como agente explosivo foi primeiramente estimulado pelos baixos valores da operação de desmonte com esse material. ANFO fornece baixo custo por unidade energética e alto desempenho se comparado a explosivos em termos de quantidade de energia. Exemplificando, quando um cartucho de 64 mm é usado em um furo de 76 mm, o explosivo preenche apenas 69 % em média do volume disponível total do furo. Já o ANFO carregado a granel preenche 100 % do furo com custo normalmente inferior, ou seja, maior quantidade de energia por volume de furo (Gordon, 1993).

Misturas à base de nitrato de amônio e óleo combustível apresentam vantagens: custo reduzido, fácil carregamento quando a granel e pouca sensibilidade antes e depois de misturado óleo. Contrariamente, existem duas grandes desvantagens: a total falta de resistência ao ataque da água, que torna completamente insensível qualquer mistura e a densidade de carregamento inferior a 1 g/cm³, tornando muito difícil o carregamento de cartuchos de ANFO em um furo preenchido com água.

ANFO é uma abreviatura criada para representar a mistura entre nitrato de amônio ("ammonium nitrate") e óleo combustível ("fuel oil"). Para se preparar ANFO, é necessário 5,7% em peso de óleo combustível e 94,3% de nitrato de amônio no formato de grão ou (*prill*) do tipo agrícola ou industrial. De acordo com o United States Code of Federal Regulations (USCFR 2001), um agente explosivo é definido como qualquer material ou mistura consistindo de combustível e oxidante para uso em desmonte cujos ingredientes não são classificados como explosivos e que pode ser misturado e empacotado para uso ou transporte sem ser detonado por uma espoleta do tipo 8 em ambiente não confinado. Pela legislação Brasileira (R105, 2000), o ANFO é classificado como "*substância perigosa, subclasse 1.5*" o que significa que é uma substância capaz de produzir gases por reação química gerando danos. A subclasse 1.5, por sua vez,

significa que a substância é muito pouco sensível com baixa probabilidade de perigo de detonação quando manuseada e transportada sob condições normais.

Um agente explosivo não pode ser detonado por espoleta tipo 8, aparato projetado para iniciar uma detonação e que contém explosivo primário. A espoleta tipo 8 contém duas gramas de uma mistura de 80% de fulminato de mercúrio e 20% de clorato de potássio ou PETN (Pentaerythritol Tetranitrate) equivalente a 0,40 to 0,45 g como carga base comprimido em um invólucro de espessura inferior a 0,762 mm e densidade de carregamento 1,4 g/cm³ (USCFR, 2001).

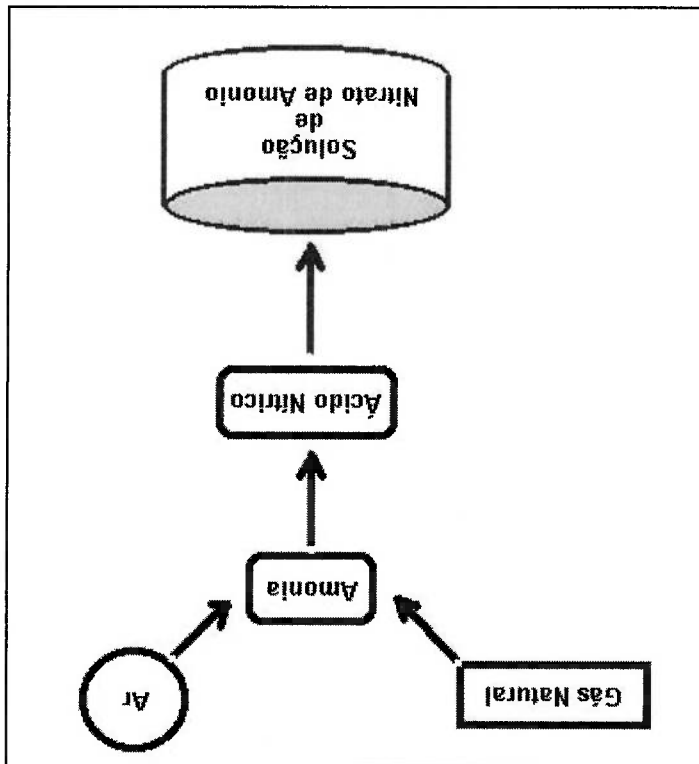
2.9.2 FABRICAÇÃO DE NITRATO DE AMÔNIO

A preparação de nitrato de amônio requer gás natural, encontrado junto a jazidas de petróleo, carvão e decomposição de lixo orgânico, para fornecer hidrogênio na forma de metano. O nitrogênio necessário é extraído do ar ou de outros gases tidos como subprodutos de refino ou metalurgia. Usando o processo Haber, esses dois elementos reagem em alta temperatura e pressão na presença de um catalisador (ferro) para formar amônia anidra, (NH₃). A amônia anidra é então oxidada a alta temperatura na presença de catalisador a base de platina, e então, se forma ácido nítrico (HNO₃). Esse ácido nítrico é neutralizado com mais amônia anidra de maneira a formar solução de nitrato de amônio (NH₄NO₃).

Uma reação exotérmica ocorre no neutralizador para vaporizar água e concentrar a solução de nitrato de amônio (líquor) com 83% a 86% de pureza (Smith, 1982).

A Figura 2.2 representa esquematicamente a síntetização do nitrato de amônio a partir do gás natural para formar o liquor de NA, antes do processo final de transformação em grão (*prill*) sólido, tanto tipo fertilizante quanto industrial. O liquor concentrado de nitrato de amônio é transferido a um evaporador que alimentará o circuito tanto de tipo agrícola quanto industrial. O liquor é então pulverizado (*sprayed*) em pequenas gotas no topo de uma torre (*Prilling Tower*). Nesse ponto o nitrato de amônio deve iniciar a sua queda até ser atingido por uma corrente de ar frio, que serve para evaporar a água de modo a concentrar e solidificar o líquido e assim formar um grão (*prill*). Normalmente torres de *prilling* de maior altura são necessárias para se produzir nitrato de amônio do tipo industrial, já que o liquor deve conter mais água (4%) e assim fornecer um grão (*prill*) com maior quantidade de poros e evapora-la durante a queda. Além disso, a torre de maior altura, fornece uma taxa de resfriamento menor e ar não tão frio como a torre de *prilling* tradicional para grão (*prill*) de alta densidade.

Figura 2.2 – Processo de síntetização do nitrato de amônio para obtenção do liquor. (MUNARETTI, 2002)



Algumas variações dessas técnicas são encontradas dependendo do fabricante. Se o grão (*prill*) reter muita umidade ou não for resfriado a uma velocidade adequada e temperatura correta esse pode se fragmentar ao atingir o final da torre. Contrariamente, pouca água pode resultar em um grão (*prill*) tão denso e pouco poroso que não será capaz de absorver óleo. No primeiro nível da torre, os grãos (*prills*) são desumidificados, resfriados e peneirados para se obter as faixas granulométricas requeridas. Após essa etapa, a superfície dos grãos (*prills*) pode ser coberta com material inerte a fim de ter sua resistência à água e empedramento (*caking*) elevada (Smith, 1982; Drury, 1980).

O método de *prilling* foi originariamente desenvolvido como uma maneira simples e de baixo custo para se preparar nitrato de amônio de uso agrícola, tendo sido uma adaptação de antigos processos militares para fabricação de munição a base de chumbo. A indústria de explosivos logo percebeu que o formato dos grãos (estérico) combinado com a sua porosidade resultaria em um produto derramável de baixo ângulo de repouso e com potencial de absorver diversos óleos de modo a atingir o correto balanço de oxigênio para uma reação de detonação (Hopler, 1999).

2.9.3 PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS A BASE DE PETRÓLEO

As propriedades dos combustíveis a base de petróleo podem variar de acordo com as características do depósito (Singer, 1991). Nos USA existem dois tipos básicos de combustíveis (diesel) comercializados, No 1 e No 2. Basicamente o diesel No 1 é obtido removendo a parafina do diesel No. 2, sendo esse mais denso, viscoso e consegue entemente possuindo quantidade maior de energia disponível. As misturas de ANFO no USA são preferencialmente feitas a partir do diesel No.2 devido a essas propriedades (WFC 2000). No Brasil o óleo mais utilizado para ANFO é o diesel B. A Tabela 4 mostra densidade, viscosidade, ponto de fulgor, teor de enxofre, água e sedimentos para os combustíveis tipo diesel nos USA e Brasil, comparados com a especificação de Biodiesel nos USA.

2.10 TEORIA DE DETONAÇÃO

Explosivos são poderosas ferramentas usadas em construção civil e mineração para fragmentar e mover material. O ser humano vem aprendendo a utilizar energia de diferentes maneiras, buscando sempre melhor qualidade de vida. Energia não pode ser criada ou destruída, entretanto o homem aprendeu logo no início da história da civilização, a transformar energia de uma forma a outra, de acordo com suas necessidades. O mesmo ocorre com explosivos, onde energia de um material explosivo pode ser controlada, e se liberada na quantidade correta, lugar e momento certos, viabiliza a obtenção dos resultados planejados para uma obra ou escavação. Um material explosivo converte energia química em propagação de ondas de choque, expansão de gás e “subprodutos” tais como calor, luz, vibração na superfície, vibração do ar (som) entre outros. Não existe uma só teoria que possa explicar todos os fenômenos relacionados com detonação para qualquer meio e situação, entretanto a maioria dos autores reconhece que o processo utiliza basicamente ondas de choque (compressão) e rápida expansão de gases.

A explosão pode ser explicada como uma rápida aceleração da reação de combustão, causada por um aumento na temperatura ou pelo progresso de uma reação em cadeia. Quando a reação de combustão acelera progressivamente e a chama avança a uma velocidade supersônica, a compressão da onda de choque causa um aumento na temperatura que resulta em auto ignição. Esse fenômeno, chamado de detonação, não ocorre se a energia desprendida da área de reação exceder um certo limite (Persson *et al.*, 1994).

2.10.1 DETONAÇÃO IDEAL

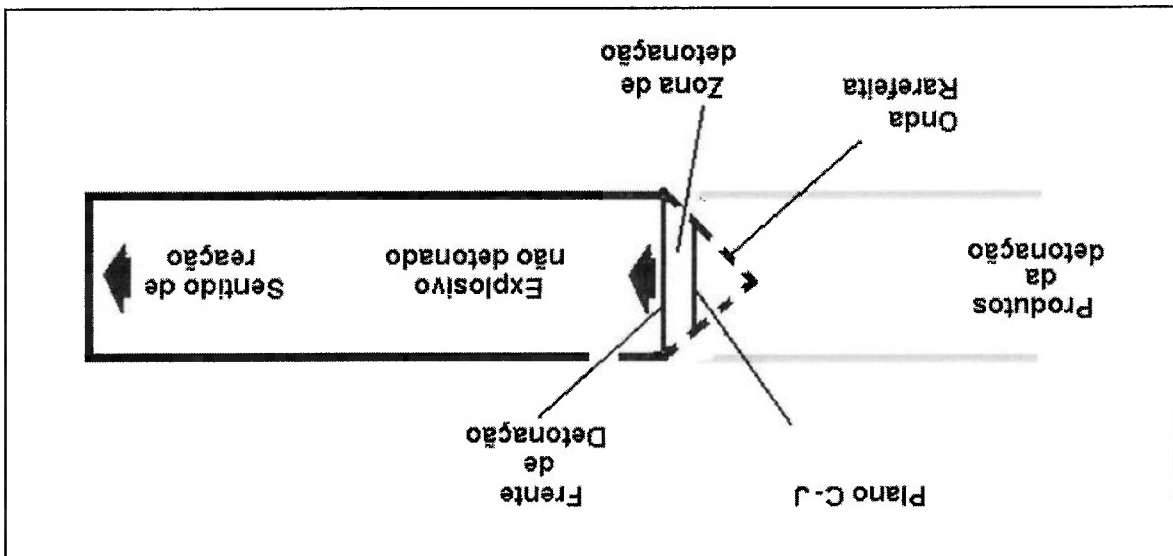
De acordo com Persson *et al.* (1994) e Drury e Westmaas (1978), numa detonação ideal, um plano de onda de choque se propaga através de um explosivo (carga cilíndrica) causando a reação química que mantém o processo. A velocidade de propagação da onda de choque é chamada de VOD ou velocidade de detonação.

Normalmente agentes explosivos e muitos dos explosivos comerciais apresentam reação de detonação classificada como não ideal, devido a uma parte das reações químicas ocorrerem após o plano C-J. Neste caso, a frente de onda de choque não é planar, mas sim curva devido a menor pressão e velocidade de reação que ocorrem nas bordas do explosivo. A região após o plano C-J não contribui para suportar a propagação da onda de choque como numa detonação ideal, porém participa

2.10.2 DETONAÇÃO NÃO IDEAL

A zona de detonação ("*detonation pressure head*") é seguida pelo plano de Chapman-Jouget (C-J) e precedida pela onda de choque (Figura 2.3). A onda de choque é considerada a primeira parte da detonação, de velocidade supersônica e alta pressão e calor. Devido a esses fatores, a onda de choque continuamente inicia explosivo ainda não detonado. Energia gerada pela decomposição das substâncias do explosivo mantêm a onda de choque devido à conservação da pressão desencadeada após a passagem dessa. Na detonação ideal, é assumido que toda a energia potencial do explosivo é liberada quase instantaneamente na zona de detonação. Após o plano C-J, são localizados produtos estáveis da detonação, consistindo de gases em alta temperatura e pressão.

Figura 2.3 - Processo de detonação ideal. (MUNARETTI, 2002)



efetivamente do processo de quebra dos materiais circundantes do explosivo, já que a rápida expansão dos gases de detonação fornece boa parte da energia para o processo final de fragmentação.

Sarma (1994), afirmou que no caso de agente explosivo tipo ANFO uma porção substancial de nitrato de amônio (38% a 55%) não reage na zona de detonação, mas sim após a passagem dessa, algumas frações de milissegundo após a frente de detonação.

2.10.3 MECANISMOS DE QUEBRA DE ROCHA

Existem inúmeras teorias descrevendo processos de quebra de rochas que ocorrem durante e após uma detonação de um explosivo interagindo com um maciço rochoso. Ainda não se encontrou uma única teoria de detonação que pudesse explicar todos os complexos mecanismos de quebra de rochas em qualquer situação de desmonte de uma litologia. Segundo Morhard *et al.* (1987), os seguintes mecanismos de quebra podem ser observados durante uma detonação em bancada por uma carga cilíndrica:

- Esmagamento do entorno da carga;
- Surgimento de fraturamento radial;
- Desplacamento (*spalling*);
- Alívio de tensões;
- Aumento do comprimento de fraturas radiais e naturais pela penetração dos gases do produto da detonação;
- Ruptura flexural;
- Criação de fraturas por cisalhamento;
- Colisão de material em deslocamento inercial.

Brown (1956) descreveu mecanismos de quebra de rocha, dividindo-os em duas categorias, aqueles causados pela energia da onda de choque de um explosivo e aqueles causados pela energia de expansão de gás do explosivo.

Segundo Hopler (1999) a energia de choque é dissipada na frente de uma onda (compressiva) entre a parede do furo e a primeira face livre ou junta aberta encontrada.

Já a energia de gás é formada pelo produto químico da reação, ou seja, os gases em expansão que movimentam o material circundante explosivo. Ambos mecanismos criam diferentes quebras na rocha, dependendo principalmente das características do explosivo, geologia e geometria do desmonte.

Segundo Worsey e Chen (1986) tanto detonação quanto deflagração de uma carga criam um pulso dinâmico, o qual dependendo da intensidade pode resultar em uma onda elástica na rocha, expandindo radialmente. Quando a onda prossegue a partir da carga, o furo é pressurizado pela expansão dos gases. Essa pressão induz compressão radial e tensão tangencial no entorno, alongando algumas fraturas criadas pela onda de choque que serão posteriormente preenchidas pelos gases que estão sendo gerados na detonação.

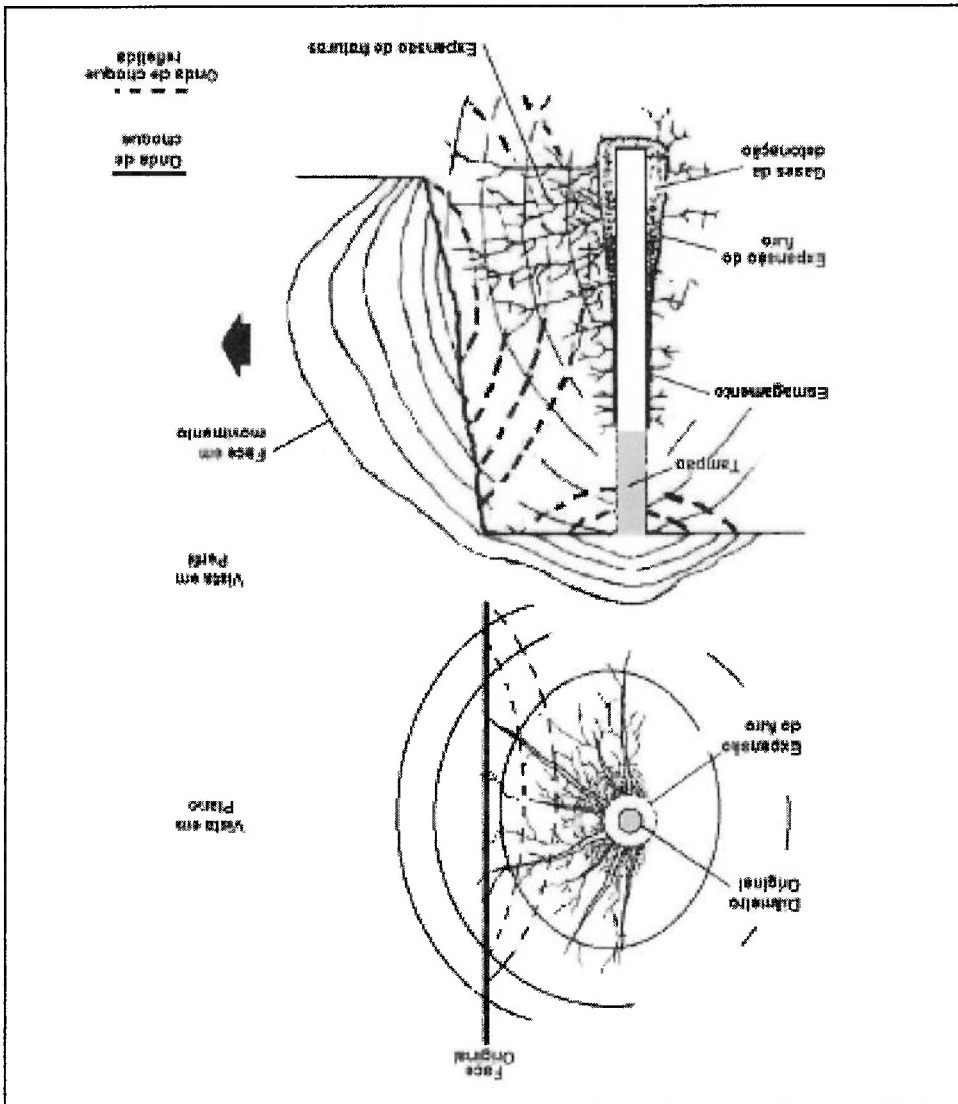
Cameron (1992), por sua vez, mostrou que o processo de quebra relativo à energia de choque de um explosivo equivale a esmagamento, fraturamento radial, deslocamento e alívio de tensão. O impacto de gases em alta pressão nas paredes de um furo cilíndrico cria condições para uma nova onda de choque no meio circundante. Essa onda de choque esmaga a rocha vizinha se a intensidade das tensões forem maiores que a resistência à compressão dinâmica da rocha (*dynamic compressive strength*). O choque induz fraturamento radial devido a esforços tangenciais que não sofrem influência da face livre. Mais tarde, deslocamento ocorre quando a face livre ou junta aberta reflete uma onda compressiva de amplitude suficiente. Essa reflexão de onda compressiva gera tração e cisalhamento.

Os gases em alta pressão dispostos dentro do furo penetram nas fraturas induzidas ou naturais após a transmissão da onda de choque. Esses gases forçam movimento na rocha empurrar paredes opostas das juntas abertas como uma cunha, estendendo fraturas e criando novas. O gás também é responsável por pressionar a parede de uma bancada que pode quebrar por ruptura flexural, além de lançar fragmentos de rocha no espaço que irão se chocar e quebrar novamente. A figura 2.4 mostra esquematicamente alguns dos processos possíveis de ocorrer em uma detonação.

4000 K e altíssimas pressões (Dick, 1972).

2.10.4 BALANÇO DE OXIGÊNIO

2002)

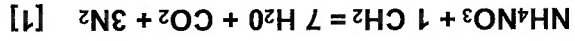


Os principais oxidantes e combustíveis nos agentes explosivos são compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. O nitrato de amônio é responsável pelo oxigênio (60%), nitrogênio (33%) e hidrogênio (7%), enquanto que o óleo supre a reação com o carbono. Para compostos de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, a liberação de energia é ótima quando o balanço de oxigênio é zero. Balanço zero é definido como o ponto no qual existe oxigênio suficiente para oxidar completamente todos os combustíveis da mistura e não existe excesso de oxigênio disponível para reagir com nitrogênio e desse modo formar óxidos nitrosos ou elementos como CO, NH₃ e CH₄. Os únicos produtos dessa reação devem ser os gases H₂O, CO₂, e N₂.

A oxidação parcial de carbono para monóxido de carbono, o que é resultado de uma deficiência de oxigênio, libera menor calor/energia do que uma oxidação completa que resulta em dióxido de carbono. Já os óxidos de nitrogênio que são produzidos quando há excesso de oxigênio, absorvem calor. Nitrogênio livre não libera e não absorve calor. Gases resultantes desse tipo de reação são ineficientes em termos de energia liberada na forma de calor, além de serem tóxicos (Dick, 1972).

Cooper (1996) afirma que o calor de formação de um elemento pode ser considerado um caso especial de calor de reação ou mudança de entalpia, envolvendo a formação de uma determinada molécula que queima até seu estado mais oxidado e quando os elementos e o composto final se estabilizam sob condições padrão de temperatura e pressão, ou seja, 25°C e 1 atmosfera.

Óleo combustível que na verdade é uma mistura complexa de hidrocarbonetos é normalmente aceito como CH₂, de modo a simplificar os cálculos para o balanço de oxigênio (Equação 1). As equações abaixo assumem a reação como ideal, baseada em calor de formação padrão para NA (87.27 kcal/mole). Para 240 g (mole de NA) e 14 g (mole de óleo), 254 g de peso total, 5.7 % de óleo combustível deve ser adicionado em 94.3 % de nitrato de amônio de modo a obter a proporção correta no balanço de oxigênio.



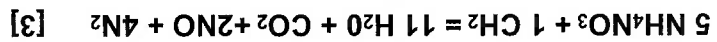
O calor de formação final é dado pela diferença entre produtos e reagentes. Baseado nisso, o calor de formação do ANFO é 230 kcal/mol e a energia térmica

liberada por grama de ANFO é de 905 calorias. Nesse processo ideal, não existe formação de gases considerados tóxicos ao ser humano.

Se a equação não está balanceada, menos energia será liberada. A Equação 2 representa uma mistura de 92.0 % de NA e 8.0 % de óleo combustível mineral. O excesso de combustível cria uma deficiência de oxigênio na reação que resulta em oxidação do carbono presente no óleo em CO, um gás venenoso quando comparado ao CO₂. Nesse caso, devido ao baixo calor de formação do CO, apenas 818 calorias são liberadas por grama de ANFO.



Na Equação 3, uma mistura de 96,6 % de NA e 3,4 % de óleo combustível mineral mostra uma situação de excesso de oxigênio. Uma parte do nitrogênio do nitrato de amônio combina com esse excesso de oxigênio para formar NO, o qual ainda reage com oxigênio presente na atmosfera e produz o extremamente tóxico NO₂. O calor absorvido pela formação de NO reduz o calor de formação do ANFO para apenas 600 calorias, a qual é bem inferior a mistura com excesso de combustível. Além disso, os gases produzidos pelo excesso de combustível são menos perigosos do que os produzidos pela falta desse elemento. Devido a esses motivos, para se utilizar no dia a dia de uma mineradora, é preferível uma pequena deficiência no oxigênio, ou seja, costuma-se padronizar a mistura em 94 % NA e 6 % óleo combustível.



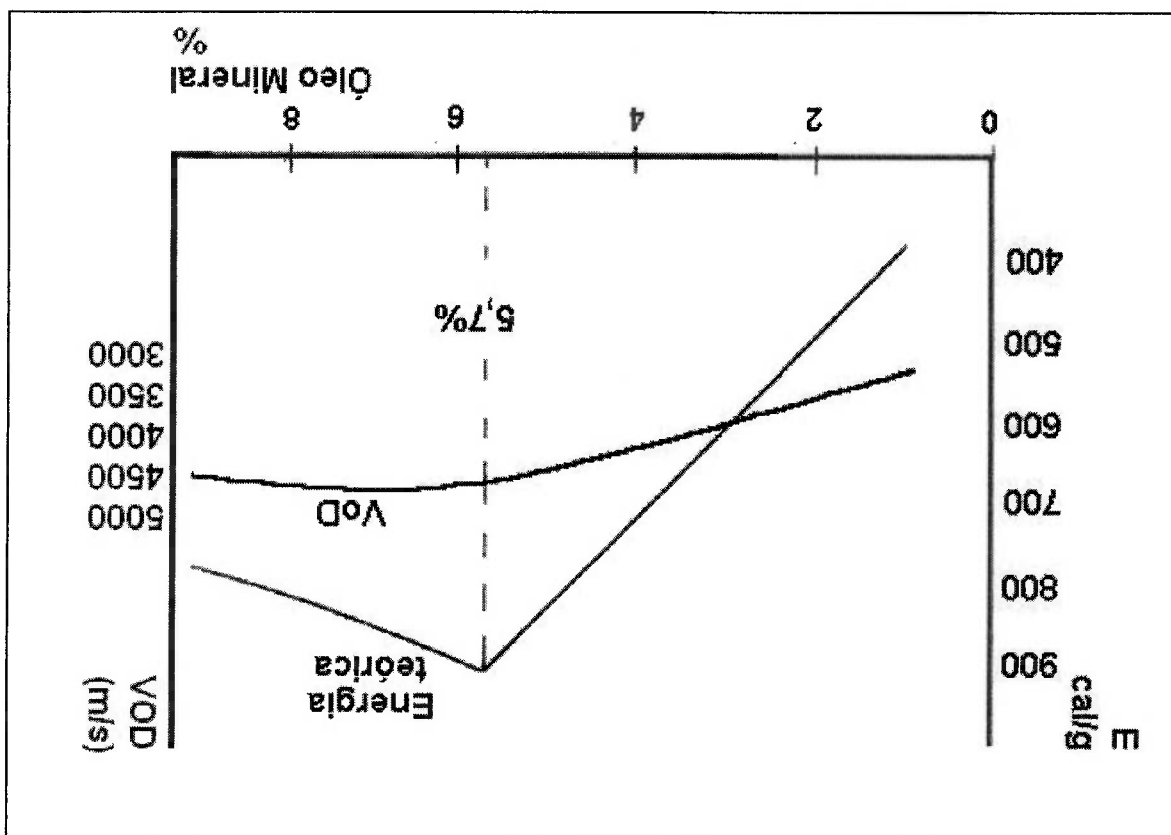
A Figura 2.5 mostra os efeitos do balanço de oxigênio no desempenho do ANFO. A energia teórica ideal alcança um pico de 5.7% de óleo combustível e cai mais rapidamente para uma mistura de excesso de oxigênio do que uma mistura com excesso de óleo. Ao lado esquerdo da Figura 2.5, maior quantidade de oxigênio e menor de combustível é observada, o que faz o ANFO gerar gases de cores alaranjadas. Ao lado direito do gráfico, com o excesso de combustível, gases negros e maiores velocidades de detonação são observados.

2.11 VIBRAÇÃO DE SOLOS

2.11.1 CRITÉRIOS DE PREVENÇÃO DE DANOS CAUSADOS POR VIBRAÇÕES DE SOLOS

Os critérios de prevenção das vibrações de solo geradas pelos desmontes com explosivos, têm sido objeto de numerosos estudos, desde o começo do século, especialmente na Suécia e EUA, embora outros países tenham contribuído também mas de forma menos significativa. Entre nós, registram alguns trabalhos elaborados pelo LNEC, que conduziram à publicação da Norma Portuguesa NP - 2074 (1983) (Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares).

Figura 2.5 - O efeito do balanço de oxigênio no desempenho do ANFO. (MUNARETTI, 2002)



Dos estudos atrás citados destacam-se os de Rockwill em 1927 e Thoenen Et Windes em 1942, que estabeleceram critérios de segurança, tendo um parâmetro característico a aceleração de partícula; Crandell em 1949 que empregou o coeficiente energético; Morris em 1950 que estabelece um novo critério de dados baseado na amplitude de vibração; Langefors e Kilstrom em 1959 que adotaram como parâmetro mais significativo a velocidade de partícula propondo distintos níveis, segundo a intensidade dos danos potenciais.

Posteriormente em 1963 estes últimos autores consideravam já o tipo de solo no qual estavam fundadas as estruturas e propunham critérios de âmbito mais geral. Durante a década de 60 e 70, diversos investigadores, como Nortwood, Crawford Edwards, Fogelson, etc. expuseram diversos limites de segurança baseados todos na velocidade da partícula, vislumbrando-se já necessidade de adequar esses níveis de prevenção aos distintos tipos de construções, tal como fez Ashley em 1976, Chae em 1978, Wiss em 1981, etc. (MARTINS, 1997)

Relação entre o nível de carga $Q/D3/2$ e a velocidade de vibração de solos V em rochas duras (em rochas brandas um certo valor V/C requer 2-4 vezes mais carga) e o dano potencial em edifícios normais.

Refira-se, que o OSM (Office of Surface Mining) dos EUA em 1983, reconhecendo a dependência que existe entre a frequência dominante das vibrações e as distâncias à zona de desmonte, publicou as seguintes recomendações para proteger as edificações próximas das pedreiras.

Apresenta-se ainda, o critério de prevenção de danos "Langefors/Kilstrom - 1963" e respectiva Tabela "Distâncias/carga de Detonação Instantânea", que tem sido usado há anos, com ótimos resultados.

Tabela 2.1 - Distâncias/carga de Detonação Instantânea. (MARTINS, 1997)

Distância D(m)	Cargas máximas para se obter o nível (Kg)			
	0,008	0,015	0,030	0,060
1.0	0.008	0.015	0.030	0.060
5.0	0.09	0.18	0.36	0.73
10.0	0.35	0.50	1.00	2.00
20.0	0.72	1.34	2.70	5.40
25.0	1.00	1.90	3.80	7.60
30.0	1.31	2.50	5.00	10.00
35.0	1.66	3.10	6.20	12.40
40.0	2.02	3.80	7.60	15.20
45.0	2.41	4.50	9.00	18.00
50.0	2.83	5.30	10.60	21.20
55.0	3.26	6.10	12.20	24.40
60.0	3.72	7.00	14.00	28.00
65.0	4.19	7.90	15.80	31.60
70.0	4.69	8.80	17.60	35.20
75.0	5.20	9.70	19.40	38.80
80.0	5.72	10.70	21.40	42.80
85.0	6.27	11.80	23.60	47.20
90.0	6.83	12.80	25.60	51.20
95.0	7.41	13.90	27.80	55.60
100.0	8.00	15.00	30.00	60.00
200.0	22.60	42.40	84.80	169.60
250.0	31.60	59.30	118.60	237.00
300.0	41.60	78.00	156.00	312.00
350.0	52.40	98.20	196.40	393.00
400.0	64.00	120.00	240.00	480.00
450.0	76.40	143.20	286.40	573.00
500.0	89.40	167.70	335.40	671.00
550.0	103.20	193.50	387.00	774.00
600.0	117.60	220.50	441.00	882.00
650.0	132.60	249.00	498.00	996.00
700.0	148.00	278.00	556.00	1112.00
750.0	164.30	308.00	616.00	1232.00
800.0	181.00	339.00	678.00	1356.00
850.0	198.30	372.00	744.00	1488.00
900.0	216.00	405.00	810.00	1620.00
950.0	234.30	439.00	878.00	1756.00
1000.0	253.00	474.00	948.00	1896.00
1250.0	353.60	663.00	1326.00	2652.00
1500.0	465.00	871.00	1742.00	3484.00
2000.0	715.50	1342.00	2684.00	5368.00

2.11.2 INFLUÊNCIA DAS DIVERSAS VARIÁVEIS NAS VIBRAÇÕES DE SOLOS

As variáveis que afetam as características das vibrações são sensivelmente as mesmas que influenciam os resultados dos desmontes de rocha de explosivos. Inclusive, a maior parte dos investigadores afirma que os desmontes com os melhores resultados em termos de fragmentação, são normalmente os que menos vibração induzem. (MARTINS, 1997)

Baseiam-se no fato de a energia do explosivo ser nestes casos utilizada preferencialmente na fragmentação da rocha e só uma pequena percentagem se dissipa como vibração de solos e onda aérea.

As variáveis que condicionam as vibrações de solos classificam-se em dois grupos: as que são controladas pelo operador de substâncias explosivas e as que o transcendem.

Diâmetro de Perfuração - O aumento do diâmetro de perfuração tem um efeito negativo, pois a quantidade de explosivo por furo é proporcional ao quadrado do diâmetro, resultando muitas vezes em cargas por atraso superiores às aconselháveis pelos critérios de segurança.

Altura da Bancada - Para obter uma melhor fragmentação e eliminar os problemas de repés deve procurar-se, que a altura da bancada (H) seja sempre superior ao dobro da distância à frente (V) - " $H/V > 2$ ". Ao mesmo tempo reduz-se o nível de vibração por a carga explosiva ficar menos confinada.

Distância à Frente (V) e Espaçamento (E) - Se a distância for excessiva, os gases provenientes da detonação do explosivo encontram uma grande resistência para fragmentar e descolar a rocha e, por conseguinte, parte da energia do explosivo é transferida para a rocha sob a forma de energia sísmica, aumentando deste modo a intensidade de vibração.

Este fenómeno tem no pré-corte o exemplo mais claro. Neste tipo de trabalho o confinamento é total, devido à inexistência de superfície livre disponível, podendo registar vibrações da ordem de 5 vezes superiores às de um desmonte de bancada convencional.

Se a distância à frente (V) é insuficiente os gases atingem rapidamente a superfície livre, impulsionando os fragmentos de rocha de forma descontrolada e aumentando a área e o ruído.

No que se refere ao espaçamento (E) a sua influência é semelhante ao parâmetro anterior e inclusivamente a sua dimensão depende da distância à frente (V).
Subfuração - Se a Subfuração tiver uma dimensão superior à necessária, para assegurar um bom corte na base da bancada, não melhorará com este acréscimo o corte do fundo mas, em contrapartida, aumentará substancialmente a intensidade de vibração e deixará um piso irregular. Além de conduzir a um custo adicional de explosivos e perfuração.

Tampão - Um comprimento excessivo do tampão além de pôr problemas de fragmentação na parte superior da banca, aumenta o confinamento, podendo dar lugar a um acréscimo do nível de vibrações.

Inclinação dos Furos - Os inclinados facilitam o corte da bancada ao nível do piso, conseguindo-se uma redução de vibrações relativamente a desmontes com furos verticais.

Carga por Atraso - Pode-se afirmar que a carga por atraso é o fato individual mais importante que afeta a geração de vibrações. As intensidades das vibrações de solos e aéreas num determinado ponto dependem quase exclusivamente da carga máxima por tempo de atraso e da distância do referido ponto ao local do desmonte. Em desmontes em que se empregam detonadores com diferentes tempos de atraso é a maior carga por atraso que condiciona a intensidade de vibração gerada e não a carga total do desmonte. Sempre que o tempo de atraso entre detonadores com saída consecutivas sejam superiores a 9 ms (Segundo USBM), para que não haja amplificação das ondas originadas por outros furos.

Consumo Específico de Explosivos - Quando se apresentam problemas de vibrações quase todos os operadores são tentados a diminuir as cargas específicas das suas pegas, pensando deste modo diminuir as vibrações. Contudo, o efeito é exatamente o contrário devido ao aumento do confinamento e má distribuição espacial explosivo. Assim, a energia do explosivo, é insuficiente para deslocar e fragmentar a

rocha. Verifica-se que reduzindo de 20%, o consumo específico relativamente ao valor último, os níveis de vibração poderão aparecer multiplicados por 2 ou por 3.

2.11.3 MEDIDAS PRÁTICAS PARA REDUZIR VIBRAÇÕES DE SOLOS

As medidas práticas que a seguir se apresentam têm sido aplicadas entre nós e noutros países, com sucesso. Na redução de vibrações de solos resultantes reclamações. (MARTINS, 1997)

Redução da Carga de Detonação Instantânea - De acordo com a distância que se encontra a edificação a proteger. A carga deverá estar de acordo com a tabela (Cargas/distâncias - "Langefors e Kilstrom") atrás apresentada e utilizar-se-á o nível 0,015 para distâncias inferiores a 300 metros, para distâncias maiores aconselha-se o nível 0,03.

Sempre que se faça medição da velocidade de vibração os valores da carga por atraso deverão ser ajustadas em função dos resultados obtidos.

A minimização da carga de detonação instantânea poderá obrigar a:

- Diminuir o diâmetro
- Diminuir o comprimento dos furos pela redução das alturas de bancada
- Separação das cargas no interior do furo por interposição de espaçamentos de terra, com um comprimento mínimo de 1 metro. As cargas serão iniciadas por detonadores com tempos distintos mas consecutivos. A carga mais próxima da superfície será iniciada com o tempo mais baixo.

Redução do Confinamento do Explosivo através de:

- Redução da distância à frente (V) e espaçamento (E)
- Remoção de repês ou escombro de desmontes anteriores antes do tiro.
- Redução do tampão (comprimento mínimo - 30D - D - diâmetro de perfuração)
- Redução de subfurações para os valores mínimos necessários para garantir o corte ao nível do piso $\approx 0.3 \text{ V}$

- Uso de tempos de atraso entre furos e fiadas efetiva que proporcionem um máximo alívio aos furos e fiadas subsequentes, evita-se assim, sobreposições de ondas e melhora-se o deslocamento da rocha.

- Orientação das pegas por forma a dispor de pelo menos uma superfície livre e o mais extenso possível.

Redução do Numero de Furos com Detonadores Instantâneos, já que estes apresentam menor dispersão que os números mais altos da série.

Orientação da Sequência de Iniciação, deve ser feita por forma a que a progressão se faça no sentido de se afastar da estrutura a proteger, devendo a iniciação ser feita no ponto mais próximo deste.

Utilização do Consumo Específico Adequado, já que uma diminuição deste pode aumentar o confinamento das cargas e por conseguinte a intensidade de vibrações.

Obviamente, um consumo excessivo dá lugar a uma sobrecarga desnecessária acompanhada de grandes efeitos perturbadores.

Controle de Perfuração para que as malhas coincidam com as previamente definidas.

Uso de Detonadores Elétrico de microratardo (25 ms) e um sistema de iniciação com um numero de tempos adequado.

Limitar a Aplicação de Explosivos aos Extratos Rochosos sempre que exista solo de recobrimento, este deverá ser removido por outros meios.

Criar, Sempre que Possível, Zonas de Descontinuidade entre a estrutura a proteger e os maciços a desmontar

2.12 SOBREPRESSÃO ATMOSFÉRICA

A onda aérea é a onda de pressão que aparece associada à detonação de uma carga explosiva. (MARTINS, 1997)

O ruído é apenas a parte audível e infrassónica do espectro, desde 20 Hz a 20 KHz. As ondas aéreas são vibrações no ar com baixa frequência, tendo valores normalmente abaixo dos 20 Hz.

De acordo com o WISS e LINEHAN (1978), as fontes principais destas perturbações são as seguintes:

- Movimento do terreno provocado pela detonação
- Escape dos gases pelo furo depois da ejeção do tampão

- Escape dos gases através de fendas criadas na superfície livre do maciço rochoso

- Deslocamento da frente da bancada ao progredir o desmonte
- Detonação do cordão iniciador ao ar livre

A combinação das vibrações, associadas a essas fontes dão lugar a uma frente móvel de sobrepressão de ar que se desloca a partir do local de desmonte. Como o ar é compressível, absorve parte da energia da onda de pressão para libertá-la posteriormente através da expansão desses gases quentes, causando uma depressão nos referidos pontos.

As características da onda aérea não são fáceis de prever, pois dependem de diversos fatores, tais como, os climáticos, topográficos, etc. e conjuntamente com algumas variáveis controláveis pelo operador poderão alterar as suas características de caso para caso.

2.12.1 CRITÉRIOS DE PREVENÇÃO DE DANOS PROVOCADOS POR ONDA AÉREA

A onda aérea implica geralmente menos problemas que vibrações de solos. Windes (Bureau of Mines . USBM) efetuou estudos sobre os possíveis danos causados pela onda aérea que acompanha os desmontes de rocha em pedreiras. Durante o estudo detonou cargas ao ar livre a distancias determinadas de estruturas, tendo concluído que a onda de pressão provoca a ruptura de vidros muito antes (valores de sobrepressão baixos) da ocorrência de qualquer outro tipo de dano estrutural.

Na continuação do estudo procedeu a desmontes em pedreiras com cargas de explosivo normalmente usadas com cargas ao ar livre, não se tendo observado qualquer quebra de vidros. Concluiu, então que os danos causados por onda aérea eram insignificantes nas condições normais de exploração em pedreiras. Em estudo aprofundado sobre eventuais danos provocados por sobrepressões de ar o "Ballistic Research Laboratorie" chegou a conclusões às de Windes. Todavia, a onda aérea tal como o ruído que a acompanha, são fatores incómodos que provocam, por vezes, queixas mas sem causarem, no entanto, danos.

Contudo, indicaremos como critério de prevenção de danos, o valor limite de sobre pressão de ar proposto pelo "UBSM . 1978" para que se não verifiquem quebras de vidro

Sobrepresão		Efeito provável
180 dB (L)	20,0 KPa	Danos importantes em estruturas normais
170	6,3	Aparecimento de fendas em azulejos
170	6,3	Ruptura de muitos vidros de janela
150	0,63	Ruptura de alguns vidros de janela
140	0,2	Provável ruptura de grandes vidros
136	0,13	Limite de onda aérea proposto pelo UBSM
120	0,02	Queixas

Tabela 2.2 - valor limite de sobre pressão de ar. (UBSM, 1978)

2.12.2 MEDIDAS PRÁTICAS PARA REDUZIR SOBREPRESSÃO ATMOSFÉRICA

As medidas que se apontam têm sido utilizadas com sucesso na redução da onda aérea: (MARTINS, 1997)

Redução da Carga de Detonação Instantânea: Bastará respeitar as cargas máximas de detonação instantâneas definidas anteriormente para não induzirem danos nas estruturas. As recomendações, que se apresentam, para que a probabilidade de ultrapassar os níveis de sobrepressão indicados pelo UBSM sejam extraordinariamente baixas.

Escolha do Tempo de Atraso entre Furos: Escolher os tempos de atraso, entre furos subsequentes, por forma que o desmonte avance ao longo da frente a uma velocidade inferior à do som no ar (340 m/s).

Aumentar o Comprimento do tampão: Aumentar o confinamento das cargas de explosivo, através de maiores comprimentos de tampão, mas não excessivo, e empregar material inerte adequado.

Ligações de Superfície com Cordão Detonante: Evitar o emprego de cordão detonante nas ligações de superfície sempre que este seja necessário deverá ser

coberto com areia fina com uma espessura mínima de 7 a 10 cm, para cordões de 12 g/m.

Atenção às Condições Atmosféricas: Evitar ou adiar a execução de disparos quando as condições atmosféricas e de vento se conjugam para a formação de focos com elevados níveis de sobrepressão. Adiar sempre desmontes quando coexistirem nevoeiro ou céu nublado sem vento durante ventos fortes e em dias que a temperatura de superfície esteja a cair.

Iniciação Fundo de Furo: A iniciação fundo de furo reduz a onda aérea relativamente a uma iniciação pela boca.

Sequência de Iniciação: Os esquemas de iniciação deverão ser escolhidos por forma a evitar a amplificação de ondas aéreas.

Inspeccionar o Estado das Frentes: Antes de iniciar o carregamento de pega é importante inspeccionar o estado das frentes para corrigir a carga de furos que tenham ficado com distâncias à frente inferiores às nominais.

Controlar as Cargas dos Furos em Terrenos com Cavernas: Em maciços com cavernas controlar sempre a carga de explosivo para eliminar concentrações pontuais.

Criar Barreiras: Dispor barreiras vegetais ou taludes em terra, entre os desmontes e os pontos receptores, conduzirá a um maior conforto nesses pontos.

3 SEGURANÇA NO USO DE EXPLOSIVOS

3.1 PROCEDIMENTO GENÉRICO PARA O CARREGAMENTO E DETONAÇÃO DE EXPLOSIVOS EM MINAS CÊU ABERTO

Detonação é uma atividade complexa e exige habilidades especiais por parte do cabo de fogo (blaster) e os outros membros da equipe de detonação. Esta exige uma cuidadosa coordenação de tarefas entre o pessoal de carregamento e as outras pessoas que trabalham nas imediações do local do desmonte. Antes de realizar o carregamento de um furo, o blaster deve examinar os logs de perfuração para identificar potenciais áreas problemáticas, como presença de falhas preenchidas por argila (popularmente conhecidos como lisos), vazios, ou anomalias geológicas. Isto é seguido por uma inspeção visual da face da bancada. O blaster deve olhar para a

presença de pedras soltas, trincas na parede da bancada causadas por fogo anterior, extratificações, e outras irregularidades. Perfilamento a laser, conhecido como *boretrack*, é uma ferramenta importante para conhecer pontos onde o pé da bancada está mais leve e pode causar ultra-lançamentos. (BAJPAVEE, 2004)

Com base no plano de detonação aprovados e os resultados do exame, o blaster vai calcular o peso de carga, geometria, decorrentes, e outros parâmetros. Procedimentos de segurança devem garantir que as pessoas que não estão envolvidos diretamente com operações de carregamento e detonação não devem permanecer na área de risco.

Locais de carregamento devem ser isolados e sinalizados antes de iniciar o procedimento de carregamento.

Durante o carregamento de explosivo bombeado, o operador deve estar atento à possíveis falhas geológicas, monitorando a subida do nível de explosivo ao longo do furo, além de garantir a quantidade correta de explosivos em cada furo.

O blaster ou um funcionário designado deve conectar os furos individuais para a disparo de linha. É boa prática uma verificação ao longo da linha para reexaminar as conexões. Quando for feito controle de vibração e ruído, os equipamentos para esse fim devem ser conferidos.

Em seguida, o blaster deve retirar todos os funcionários da área da explosão, colocar guardas em todos os acessos para a área de risco e comunicar ao capataz meu sobre a explosão iminente. O blaster, e ajudantes se houver, deve sair da área de risco ou ficar dentro de um abrigo de detonação.

Antes da detonação o blaster deve receber confirmação clara e inequívoca dos guardas e capataz da mina.

Só então o fogo é iniciado.

Desmonte de rocha libera uma enorme quantidade de energia de uma forma muito curto espaço de tempo. É imperativo estabelecer um protocolo eficaz para manter a segurança área da explosão.

Antes de liberar a área, o blaster deve realizar uma inspeção visual do material desmontado e verificar os explosivos não detonados, falhas de ignição, e outros

problemas. O relatório do fogo deve ser finalizado nesse momento. Finalmente, todos os explosivos não utilizados devem ser devolvidos para a revista.

3.2 RISCOS DE EXPLOÇÃO A CÉU ABERTO

Os perigos da explosão de superfície são principalmente devido à falta de segurança na área de risco, ultra-lançamentos (*flyrock*), explosão antes da hora e falha de ignição (Verakis & Lobb, 2001).

O desmonte, em geral, tem dois propósitos: fragmentação e movimentação de rocha. O deslocamento da rocha detonada depende dos parâmetros de plano de fogo, condições geológicas, e as restrições de lavra.

Não é esperado que fragmentos de rocha saiam dos limites da área de risco do desmonte. O blaster determina os limites dessa área e é responsável pelo cumprimento das leis de segurança. Langerfors & Kishistrom (1963), Roth (1979) e Persson et al. (1994) têm desenvolvido teorias para calcular faixa ultra-lançamento de rocha. O blaster pode usar tais conceitos, em conjunto com a experiência passada, para determinar o raio da área de risco.

O Instituto de Fabricantes de Produtos Explosivos (IME, Institute of Makers of Explosives) define *flyrock* como a rocha impelido além do área da explosão com a força de uma explosão (IME, 1997). Uma lesão devido a *flyrock* é sustentada quando ele viaja para além da área da explosão e fere alguém. Os principais fatores responsáveis por ultra-lançamento são erros no carregamento dos furos, plano de fogo inadequado, anomalia geológica e falha estrutural da rocha, também ineficiente, retardos inadequados ao longo do fogo. Lesões geralmente são causadas por falha no isolamento da área, local de abrigo inadequado, falha de comunicação (Rehák et al., 2001).

3.3 AS LIÇÕES APRENDIDAS COM OS ACIDENTES FATAIS

A energia liberada por uma carga explosiva em um furo esmaga a rocha ao nas proximidades da parede do furo, as fraturas na rocha além da zona esmagada, gera ondas sísmicas, cria deslocamento de ar, e move a rocha desmontada. Qualquer

incompatibilidade entre a distribuição da energia explosiva, força geomecânica do maciço rochoso circundante e confinamento cria um potencial para *flyrock*. *Flyrock* é originada na face vertical na parte de cima da bancada.

Embora as circunstâncias de cada incidente variem, algumas semelhanças importantes foram observadas. Deficiência ou falta de atenção à tarefa, pessoal, ou fatores ambientais têm o potencial de causar ferimentos. (BAJPAVEE, 2004)

3.3.1 FATORES PESSOAIS

Os fatores pessoais incluem a educação, capacitação profissional, a experiência no trabalho, histórico de lesões anteriores, a percepção visual, excesso de trabalho, carregamento e desmonte com pressa, stress, entre outros. No entanto, educação, formação profissional e experiência desempenham um papel vital. Em um dos estudos de caso, a vítima tinha três dias de experiência em mineração e muito pouco conhecimento de reconhecimento de riscos nessa operação. Pela falta de conhecimento, o operador e o visitante se posicionaram dentro da área de risco.

A blaster não deve ter pressa ou tomar qualquer atalho para agilizar o carregamento e desmonte, isto pode resultar em ferimentos graves e muitas vezes a morte. No estudo de caso 2, vemos que o blaster tomou um atalho e foi de baixo de um caminho para detonar a explosão. Após uma falha de ignição, o blaster decidiu detonar a foto mais de perto. Um caminho não deve ser considerado como um abrigo de detonação. (BAJPAVEE, 2004)

3.3.2 FATORES OPERACIONAIS

Tarefa de detonação da rocha fatores exige uma excelente coordenação de uma série de tarefas.

Algumas das tarefas são executadas pelo blaster, enquanto outras são realizadas pelo time de carregamento sob a supervisão do blaster. Várias tarefas também são realizadas por equipes não relacionados com a detonação. O blaster deve coordenar as atividades de carregamento e desmonte com o capataz mina para garantir segurança e eficiência. Incapacidade de coordenar as tarefas corretamente pode resultar em ferimentos graves ou morte. A lista de tarefas inclui a análise de log de

perfuração, a inspeção da face da bancada e análise de dados do perfilamento dos furos, se houver. Os furos são examinados para carga, espaçamento, inclinação, e o layout geral. Estudo de caso 1 salienta a importância destas tarefas. A próxima tarefa é limpar o local da explosão antes do carregamento e amarração dos furos. Uma vez que os furos são carregados e prontos, os funcionários devem ser removidos da área da explosão ou ser mandados para um abrigo de detonação. Estudos de caso 2, 4, 6 e 9 indicam a importância do uso de abrigos seguros. Estes acidentes fatais poderiam ter sido evitadas usando abrigos de detonação.

Sinalização deve ser colocada na entrada para todas as vias de acesso que leva à área da explosão. em caso estudo 5, uma estrada de acesso que leva à área da explosão não foi guardado e um residente na área inadvertidamente, entrou na área da explosão. Este foi um acidente evitável. Dependendo do local condições, pode haver requisitos adicionais. Dos estudos de caso, era evidente que má execução ou coordenação de tarefas pode causar uma fatalidade. (BAJPAVEE, 2004)

3.3.3 FATORES AMBIENTAIS

O ambiente de mineração frequentemente apresenta muitos pontos de risco. Além de ruído, fumaça, poeira e chão irregular que apresenta inúmeros outros perigos ambientais. Movimento de equipamentos de grande porte como *draglines*, pás-carregadeiras, escavadeiras, tratores de esteiras, perfuratrizes e veículos de serviço podem tirar a atenção. Muitas vezes a visibilidade do blaster é impedida devido a grandes pilhas de estéril, sujeira, ou material explodido. Nosso estudo indica que em várias ocasiões, o blaster não podia ver a área da explosão do ponto de detonação o que resultou em ferimentos fatais. Um importante fator ambiental, muitas vezes esquecido, são as anomalias geológicas. Estudos de caso 3, 7 e 10 ilustram o papel de anomalia geológica em causar lesão *flyrock*.

- Diretrizes para uso de explosivos em mineração a Céu Aberto no Brasil:
- FUNDACENTRO - Recomendação Técnica de Procedimentos: Escavações, Fundações e Desmonte de Rochas
- Normas Reguladoras de Mineração (NRM)
- NR-19 Explosivos

3.4 RECOMENDAÇÃO TÉCNICA FUNDACENTRO

- NR-21 Trabalhos a Céu Aberto
- NR 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração
- ABNT - NB 942 Segurança de Escavações a Céu Aberto

Nas atividades de desmonte de rochas é obrigatória a adoção de “Plano de fogo” elaborado por profissional habilitado. Na elaboração do “Plano de fogo” é obrigatória a exigência de um profissional habilitado (Blastier), responsável pelo armazenamento, preparação das cargas, carregamento das minas, ordem de fogo, detonação e retirada de explosivos não detonados e providências quanto ao destino adequado das sobras de explosivos.

A quantidade de explosivos e acessórios necessários ao “Plano de fogo” deve ser restrita ao momento de detonação, evitando-se a estocagem próximo à frente de trabalho.

O Blastier deve se ater às condições atmosféricas para realizar as detonações, sendo proibido realizá-las quando a atmosfera encontrar-se efetivamente carregada, evitando assim a detonação acidental provocada por descarga elétrica atmosférica.

As áreas onde se utilizem explosivos deverão ser isoladas e sinalizadas, com sinais visuais e sonoros que não se confundam com os sistemas padronizados de emergência, tais como ambulância, polícia, bombeiro, etc.

O tempo entre o carregamento e a detonação deve ser o mínimo possível. (FUNDACENTRO, 2002)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ESTUDO DE CASO – PEDREIRA NA GRANDE SÃO PAULO

4.1.1 PLANO DE FOGO

Na pedreira em estudo, localizada na Grande São Paulo os fogos são dimensionados da seguinte forma:

- Diâmetro do furo: 3,5 polegadas;
- Espaçamento: 3,2 m;
- Afastamento: 2,5 m;
- Altura da Bancada: 12 m;
- Inclinação do Furo: 15
- Tampão: 1,8m
- Subturação: 1m
- Razão de carga média: 340 g/T
- Quantidade de linhas: 3

O tipo de explosivo usado é a emulsão bombeada, comercialmente conhecida como Powergel.

4.1.2 SISMOGRAFIA E RUÍDO

4.1.2.1 INSTALAÇÃO E DEFINIÇÃO DOS LOCAIS MONITORADOS

A instalação dos sísmógrafos (geofone e microfone) seguiu os mais usuais procedimentos técnicos utilizados em termos de escolha do local, método de fixação e nivelamento dos sensores.

Os geofones foram cravados em solo firme, conforme figura 4.1:

A definição dos pontos monitorados foi feita pela própria pedreira. Foram monitorados dois pontos, dentro do terreno da pedreira durante a detonação, conforme fotos a seguir:

Tabela 4.1 – *Trigger* dos sismógrafos

Data	Ponto Monitorado	Instrumentista	Sismógrafo (SN)	Velocidade de Disparo (Trigger) (mm/s)	Pressão Acústica de Disparo (dB)	Tempo de Captação (s)
	16/01	01	Carlos	8761	0,51	116
		02	Carlos	8799	0,51	116

Os sismógrafos foram programados para disparar de acordo com os parâmetros apresentados no quadro abaixo:

Figura 4.1 - Geofones





Figura 4.2 – Ponto monitorado dentro da pedreira, junto ao Britador

O ponto monitorado junto à portaria estava a uma distância de aproximadamente 770 metros da bancada detonada e o ponto de medição colocado no britador ficava a, aproximadamente, 350 metros da bancada. Através das fotos a seguir, podemos caracterizar a localização da bancada detonada e o resultado da detonação:



Figura 4.3 – Ponto monitorado dentro da pedreira, junto à portaria



Figura 4.4 – Bancada antes do fogo

Da mesma forma buscou-se captar a intensidade máxima da pressão acústica, gerada pelo deslocamento de ar, representada por SPL e medida em dBL.

$$V_r = \sqrt{(T_1^2 + V_1^2 + T_2^2)}$$

Para o monitoramento da vibração decorrente da detonação de explosivos foram captadas as intensidades máximas da componente vertical (V_v -1), longitudinal (V_l -2) e transversal (V_t -3), bem como a intensidade associada à maior resultante vetorial (V_R). O valor da velocidade resultante V_R se refere à máxima intensidade da soma vetorial das três componentes axiais, calculadas em um mesmo instante. Esta é automaticamente calculada pelo sísmógrafo para o momento em que se tem o pico de composição vetorial, expressa pela equação:

Figura 4.5 – Bancada depois do fogo



4.1.2.2 VALORES DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA E DE PRESSÃO ACÚSTICA

Os Relatórios de Análise Sismográfica apresentam os valores de pico de velocidade de partícula obtidos, onde as componentes longitudinal, transversal e vertical são representadas respectivamente por L, T e V, e a resultante (VR) por sua vez é representada por Resultant: PPV.

A direção longitudinal é definida pelos pontos de detonação e captação enquanto que a direção transversal é definida como a direção no plano horizontal perpendicular à direção longitudinal. A pressão acústica é representada por dB.

Os valores de deslocamento de partícula (PD), aceleração de partícula (PPA) e frequência associada ao pico de cada canal (FREQ) também podem ser encontrados nos referidos relatórios.

4.1.2.3 LIMITES ADOTADOS

No Brasil a ABNT, através da NBR 9653:2005, estabelece os seguintes limites para prevenção de danos superficiais em edificações causados por detonações de rocha com o uso de explosivos:

- Pressão acústica – 134 dB;
- Vibração – 15,0 mm/s a 50 mm/s (dependendo da frequência) – em qualquer uma das componentes (L, T, V) como descrito no gráfico a seguir:

Faixa de Frequência	Limite de Vibração de partícula de pico		Pressão Acústica
	4 a 15 Hz	15 a 20 mm/s	
	15 a 40 Hz	20 a 50 mm/s	
Acima de 40 Hz	50 mm/s		134 dB

Tabela 4.2 – Limites adotados

TABELA RESUMO DE MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO											
RELAÇÃO DE FOGOS						PONTOS DE MONITORAMENTO					
Data (Hora)	FOGO	CME (kg)	PT	Dist. (m)	L (mm/s)	Fre. (Hz)	T (mm/s)	Fre. (Hz)	V (mm/s)	Fre. (Hz)	Vr (mm/s)
16/01 (18:07)	BANCO 942	60	01	548	2,03	20	1,71	20,8	2,16	25	2,6
			02	888	0,3	11,1	0,3	3	0,3	35,7	0,4
											119

Tabela 4.3 – Resumo

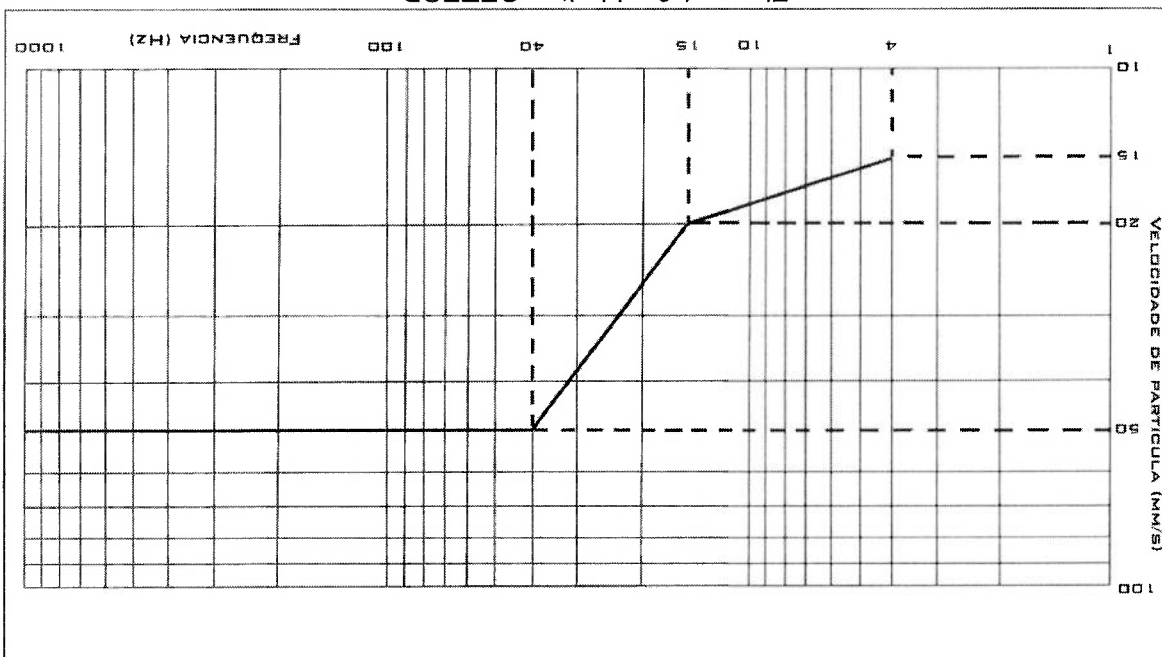
Na tabela abaixo, são apresentados os resultados obtidos durante os monitoramentos, a cada dia e em cada local.

4.1.2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

No Estado de São Paulo a CETESB através do procedimento técnico D7.013 de Abril de 1992, estabelece limites para minimização de desconforto causado por detonações de rocha com o uso de explosivos:

- Pressão acústica – 128 dB;
- Vibração – 4,2 mm/s, na resultante (Vr), para captação com geofone tri-axial.

Figura 4.6 – Limites CETESB



4.1.2.4.1 VIBRAÇÃO

Os valores de pico de velocidade de partícula nas componentes vetoriais ficaram abaixo dos limites da NBR 9653:2005, conforme pode ser observado no gráfico abaixo:

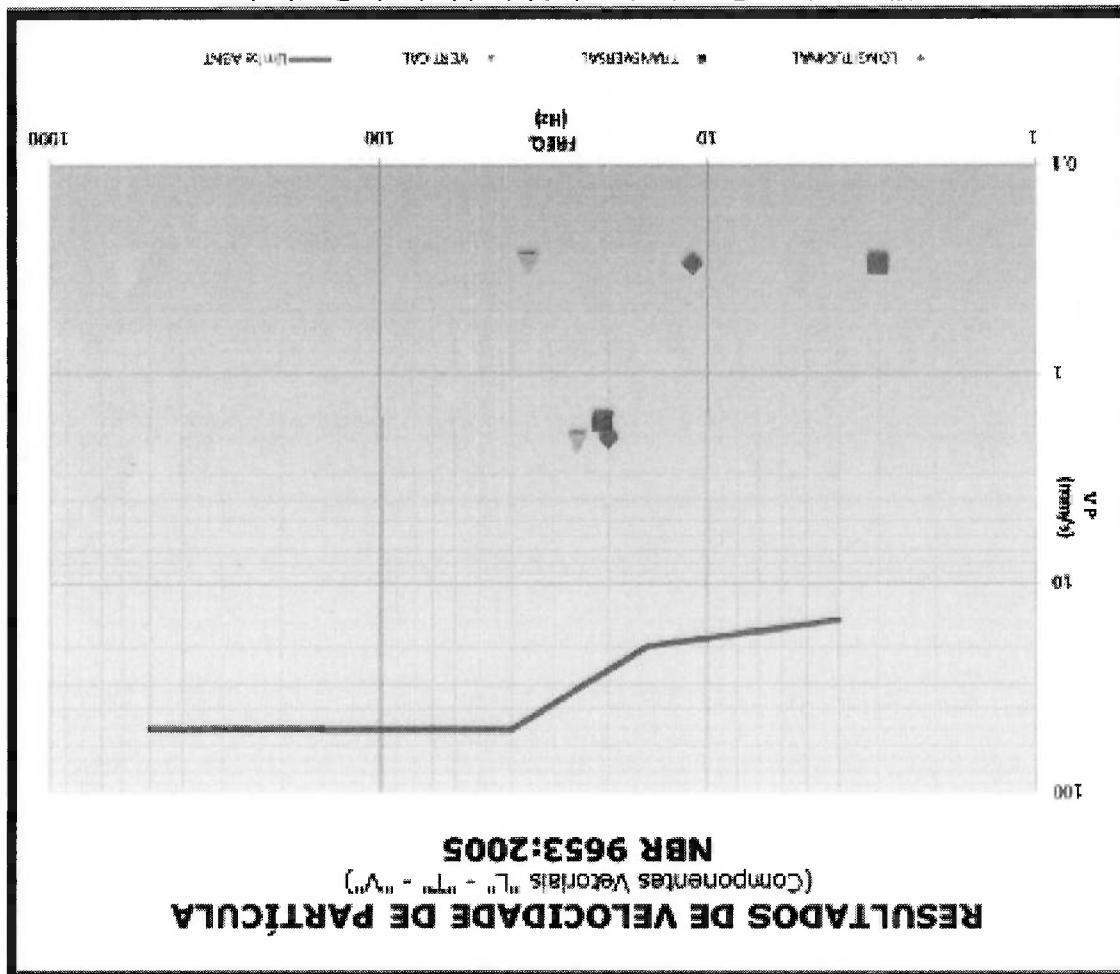


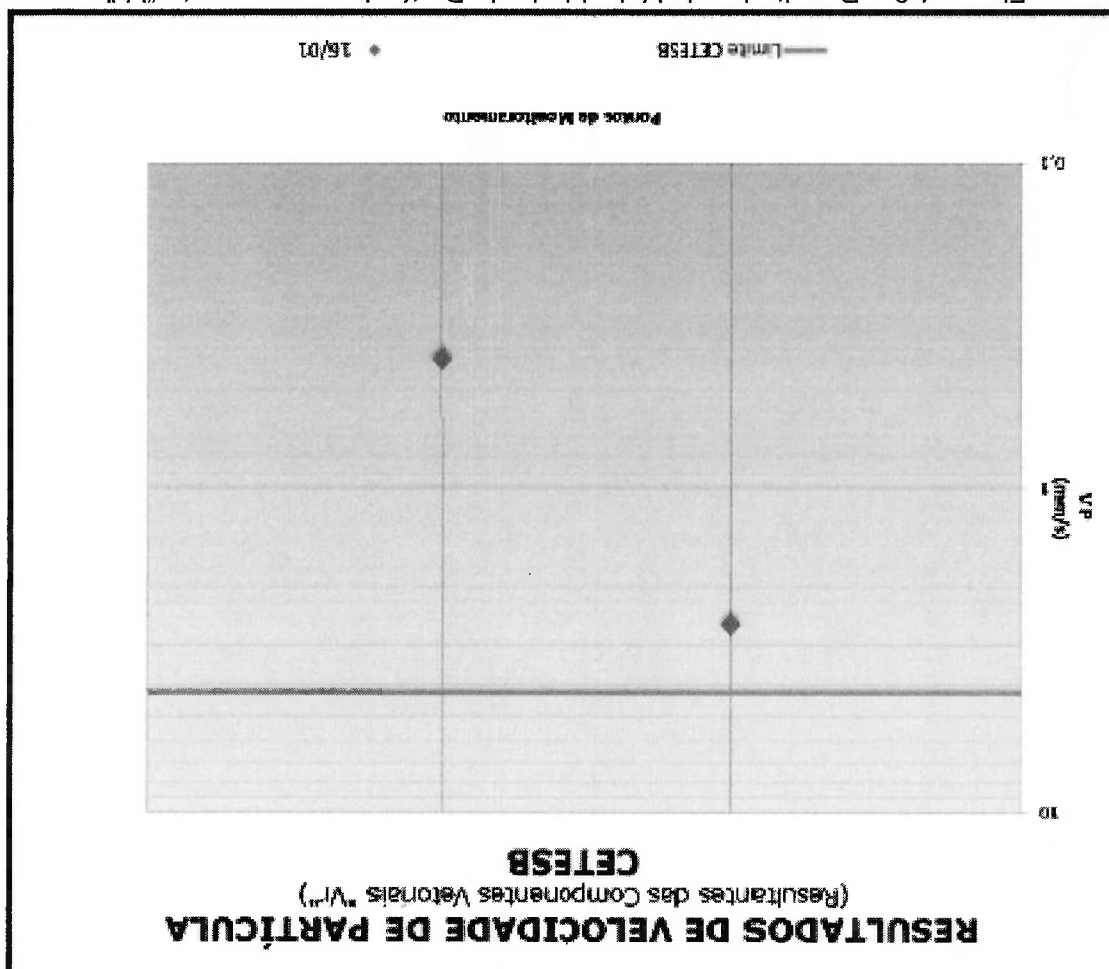
Figura 4.7 – Resultados de Velocidade de Partícula

Em relação aos valores das resultantes das componentes vetoriais de velocidade de partícula, podemos observar que ficaram abaixo do limite de desconforto preconizado pela CETESB.

Os valores de pressão acústica registrados ficaram abaixo do limite estabelecido pela NBR 9653:2005. Já o limite estabelecido pela CETESB, foi ligeiramente superado (131 dBL), como observado no gráfico a seguir, mas o resultado não tem maior significado prático por se tratar de um ponto interno da Pedreira, junto à área de britagem:

4.1.2.4.2 PRESSÃO ACÚSTICA

Figura 4.8 – Resultados de Velocidade de Partícula, componente “Vr”



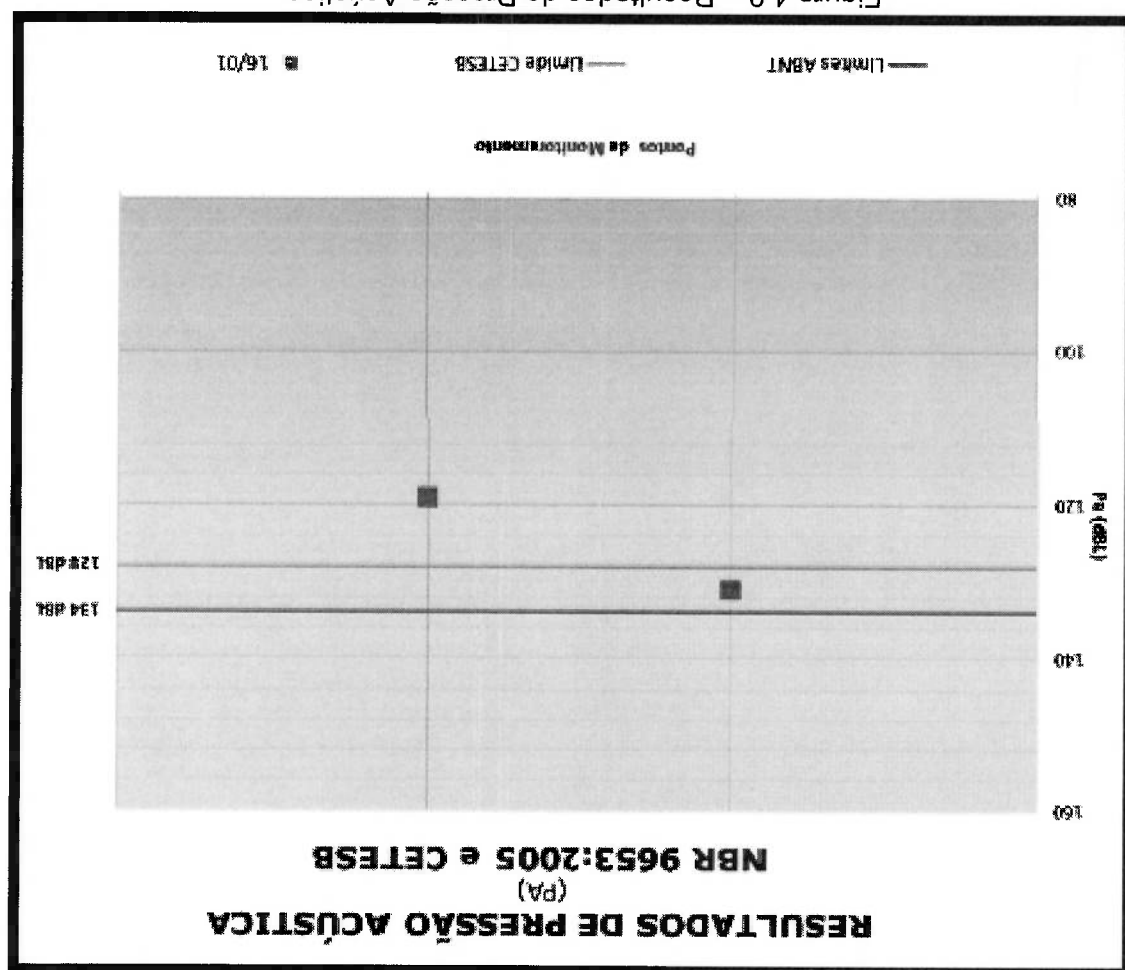


Figura 4.9 – Resultados de Pressão Acústica.

5 CONCLUSÕES

Da análise dos registros sismográficos não se verificaram anomalias que pudessem indicar um mau funcionamento ou incorreta instalação dos sensores, validando, sob esse aspecto, as medidas obtidas.

Todos os resultados, tanto das componentes vetoriais como na resultante dessas componentes de velocidade de partícula mantiveram-se abaixo dos limites preconizados pela NBR 9653:2005 (critério de danos) e pela CETESB (critério de desconforto).

Quanto aos valores de pressão acústica, todos os valores registrados ficaram abaixo do limite preconizado pela NBR 9653:2005. Apenas no ponto 01 (Britagem Primária) foi registrado um valor de 131 dBL, ultrapassando ligeiramente o limite de desconforto estabelecido pela CETESB, embora tal limite seja aplicável ao monitoramento em imóveis habitados, o que não é o presente caso, pois esse ponto monitorado fica internamente no terreno da pedreira e no momento da detonação, toda área da pedreira é evacuada.

De maneira geral, os resultados obtidos no monitoramento mostraram um ótimo desempenho em relação ao planejamento e aplicação dos planos de fogo praticados. Os resultados e conclusões deste trabalho se aplicam única e exclusivamente aos monitoramentos efetuados no dia 16 de Janeiro de 2012, no que se refere às características do fogo detonado (carga por espera, tempos de retardo, tipo de explosivo e malha de furação, comprimento de subfuração e tampão, posicionamento relativo da bancada aos pontos monitorados, condições meteorológicas, etc..).

6 BIBLIOGRAFIA

- Blasting Technique, Nashville, TN, January 28-31, 2007. Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers, 2007; 1: 1-6
- 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**. v.2, n.56, p.131 - 137, 2003b.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - **Norma D7.013 - Mineração por explosivo**. São Paulo: 1992. 7 p.
- CAMERON, A. R., (1992) "Developments of Techniques for Evaluating the Performance of Bulk Commercial Explosives." PhD Thesis, University of Queensland, 435p.
- IME (1997). Glossary of commercial explosives industry terms. Institute of Makers of Explosives, Washington, D.C., Safety Publication No. 12, p.16.
- MUNARETTI, E. (2002), "Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de Misturas Explosivas a Base de Nitrato de Amônio e Óleo Combustível", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 249 p.
- MARTINS, Alvaro Rocha. "Segurança na Aplicação de Explosivos na Indústria da Construção Civil", Curso de Especialização em Segurança , Higiene e Saúde do Trabalho, Outubro 1997, Portugal
- M. Rezaei, M. Monjezi, A. Yazdian Varjani. Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining. Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Safety Science, 2010
- Pinheiro, Rinaldo. Explosivos: Conceitos Básicos, Classificação de Explosivos, Principais Propriedades, Tipos de Explosivos, Acessórios de Detonação. Apostila de aula, UFSM. Site acessado em 15/janeiro/2012.
- http://www.ufsm.br/engcivil/MaterialDidatico/TRP1002_Mat_para_infraestrutura_de_tra_nsp/notas_de_aula/Explosivos.pdf
- RECOMENDAÇÃO TÉCNICA DE PROCEDIMENTOS: ESCAVAÇÕES, FUNDAÇÕES E DESMONTES DE ROCHAS, FUNDACENTRO, 2002

Richard J. Mainiero, Marcia L. Harris, and James H. Rowland III. Dangers of Toxic Fumes from Blasting. Proceedings of the 33rd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Nashville, TN, January 28-31, 2007. Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers, 2007; 1: 1-6

Subchefia para Assuntos Jurídicos, (2000) "Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados, (2000), ANEXO R-105.", Decreto Nº 3,665, de 20 de Novembro de 2000, Diário Oficial da União, 128p. Brasília.

SILVA, Luís Antonio Abadi e. Estudo da efetividade de barreiras de amortecimento no controle de vibrações geradas pelo desmonte com explosivos em mina de carvão à céu aberto. 2005. Mestrado. PPGEM UFRGS

SISKIND, D.E., STAGG, M.S., KOPP, J.W., DOWDING, C.H. *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. Report of Investigation 8507 USBM - United States Bureau of Mines, 1980. 74 p.

TEMA VI. A INFLUENCIA DOS DESMONTES POR EXPLOSIVOS NA ESTABILIDADE DOS TALUDES, Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva, Geomecânica aplicada a la pequeña minería, Curso - Proyecto CYTED XIII - 3 - Junio 2005 - Córdoba - Argentina

T. S. Bajpayee, T. R. Rehak, G. L. Mowrey, and D. K. Ingram. Blasting Injuries in Surface Mining with Emphasis on Flyrock and Blast Area Security. NIOSH Pittsburgh Research Laboratory, J Saf Res 2004 Jan; 35(1), 2004 Jan; :47-57

Wiss, J. F. & P. Linehan. Control of Vibration and Blast Noise from Surface Coal Mining – Executive Report. Contract Report to the Bureau of Mines, #J0255022, Wiss, Janney, Elstner and Associates, Inc., Northbrook, Ill, 1978.