

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**ANÁLISE COMPARATIVA de EXPLOSIVOS
INDUSTRIAIS na PEDREIRA EMBU-PERUS**

Trabalho de Formatura

PMI-500

Aluno: Iuri Bueno

Prof. : Wildor Theodoro Hennies

Orientador: Giorgio de Tomi

Novembro de 1998

1326523 syono

TF. 1998

B862a

1998A

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005425

DETONAÇÃO TÍPICA de uma BANCADA na PEDREIRA EMBU - PERUS



ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO e OBJETIVOS	1
2. REVISÃO BIBLIOGRAFIA	1
• Termoquímica dos Explosivos.....	1
• Propriedades dos Explosivos.....	3
• Explosivos Industriais.....	6
• Critérios de Seleção de Explosivos.....	13
• O Processo de Detonação.....	16
• Mecanismos de Quebra da Rocha.....	19
• Parâmetros de Controle do Fogo.....	23
3. METODOLOGIA de ANÁLISE	29
4. RESULTADOS	32
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
BIBLIOGRAFIA	39
ANEXOS	

INTRODUÇÃO e OBJETIVOS

Nos dias de hoje, os explosivos industriais mais utilizados nas pedreiras da região metropolitana de São Paulo, consistem basicamente em explosivos a base de nitrato de amônio, sendo os mais frequentes o ANFO (Nitrato de Amônio com óleo combustível), emulsões bombeadas e emulsões encartuchadas, chamadas de "bananas".

Devido ao fato de serem dois explosivos com características diferentes e preços também diferentes, uma análise comparativa entre esses dois explosivos, ANFO e emulsão, levando-se em consideração resultados do fogo e seu custo, torna-se necessário.

O presente trabalho, realizado na Pedreira Embu-Perus, da empresa Embu Engenharia e Comércio S.A., localizada no bairro de Perus, região metropolitana de São Paulo, consiste em analisar e comparar os dois principais altos explosivos utilizados na pedreira, que são: a emulsão bombeada e uma mistura de ALANFO com uma banana de 1" (25,4mm) (como os furos são de 3,5"(88,9mm), a banana colocada no furo ficaria com o ALANFO, que é um granulado, em toda sua volta preenchendo todo furo), essa banana, que vai ao longo de todo o furo é chamada na pedreira de "salsichão". Portanto na pedreira se usa como alto explosivo, ou emulsão ou a mistura ou como normalmente os dois.

Para tanto foram analisados e comparados diversos fogos nas duas principais frentes de produção da pedreira, a frente 5B1 e 6B1. Os dados relevantes desses fogos foram armazenados em banco de dados e em tabelas, de maneira a poderem ser analisados com facilidade. Uma descrição teórica geral e básica sobre explosivos, explicando o mecanismo de detonação, descrevendo os principais explosivos industriais, a complexidade dos parâmetros que afetam uma boa ou má fragmentação, os critérios que se devem levar em conta ao escolher um determinado explosivo e etc. , fazem parte também do presente trabalho.

Espera-se com isso, que possa-se chegar a algumas conclusões sobre o uso dos dois explosivos e seus respectivos desempenho na Pedreira Embu-Perus, além de levantar novas questões e sugestões para futuras pesquisas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Termoquímica dos explosivos e o processo de detonação

O objetivo principal no uso de explosivos para desmonte de rochas consiste em ter uma energia química concentrada, colocada propriamente e em quantidade suficiente para que, quando liberada de maneira controlada, em tempo e espaço, possa atingir a fragmentação desejada do material rochoso.

A explosão é, de acordo com Berthelot, "uma súbita expansão de gases em um volume muito maior do que o inicial, acompanhado de barulho e violento efeito mecânico" (Jimeno, 1995).

Os tipos de explosivos são os seguintes: mecânicos, elétricos, nucleares e químicos.

Explosivos comerciais são uma mistura de componentes, alguns combustíveis e oxidantes, os quais quando apropriadamente iniciados, tem uma instantânea reação exotérmica que gerará uma série de produtos gasosos em alta temperatura que são quimicamente mais estáveis e de maior volume.

Os gases produzidos acumulam o calor gerado, dilatando para um volume que pode ser de 10.000 vezes a do furo onde o explosivo estava localizado.

Explosivos químicos, dependendo das condições as quais estão expostos, podem oferecer diferentes comportamentos. O processo de decomposição dos compostos explosivos são: a real combustão, a deflagração e a detonação. Tanto a natureza dos compostos, como o sistema de ignição e externas condições governam o processo de decomposição.

- *Combustão* : Esta pode ser definida como uma reação química qualquer, capaz de gerar calor.
- *Deflagração* : Este é um processo exotérmico no qual a transmissão da reação de decomposição é principalmente baseada sobre condutividade termal. Ele é um fenômeno superficial no qual a deflagração avança através de camadas paralelas em baixa velocidade, frequentemente, não maior do que 1.000m/s.
- *Detonação* : Este é o processo físico - químico caracterizado pela alta velocidade da reação e a formação de grandes quantidades de produtos gasosos em temperatura elevada, com aparecimento de grande força de expansão. Na detonação dos explosivos, a velocidade das primeiras moléculas gasificadas é tão grande que elas não perdem seu calor através de condutividade para a zona não reagida da carga, mas transmitem ele por choque, deformando-a e provocando aquecimento e explosão adiabática, gerando novos gases. O processo repete-se com movimentos ondulatórios que afetam toda a massa explosiva e a isto se dá o nome de onda de choque.

A detonação consiste na propagação de uma reação química que se move através do explosivo em velocidade supersônica, transformando-o em novos componentes químicos. A básica característica desta reação é que ela é iniciada e sustentada pela onda de choque supersônica.

Em explosivos de alta força, a zona de reação primária é frequentemente muito pequena, milímetros, enquanto em explosivos de baixa densidades e fortes, esta zona é muito maior, no caso do ANFO, pode chegar a vários centímetros.

A maioria dos produtos são gases, os quais atingem uma temperatura de 1.500 a 4.000°C e pressões que vão de 2 a 10GPa. Os gases sob estas condições expandem-se rapidamente e produzem uma onda de choque e tensão em toda seu redor.

Na Figura 1 um simplificado perfil de uma coluna de explosivo é mostrado. A onda de detonação, a qual é caracterizada pelo súbito surgimento de pressão, desloca-se para direita em velocidade supersônica.

Atrás do máximo nível de pressão uma contração é produzida como consequência da conservação do momento.

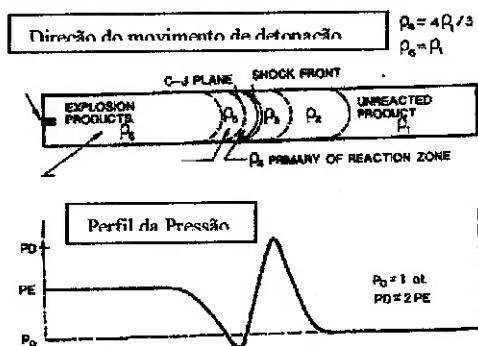


Figura 1(Jimeno,1995)

A termoquímica dos explosivos referem-se às mudanças de energia interna , principalmente sob a forma de calor. A energia armazenada num explosivo é energia potencial, latente ou estática. A energia potencial que é liberada pelo processo de detonação é transformada em energia cinética ou mecânica.

A lei de conservação de energia estabelece que num sistema isolado, a quantidade total de energia é constante, embora possa ser transformada:

$$\text{Energia Potencial} + \text{Energia Cinética} = \text{Constante}.$$

Propriedades dos explosivos

Explosivos convencionais e agentes detonantes têm diferentes propriedades que os caracterizam e são usadas para uma correta seleção, dependendo do tipo de detonação a ser realizada e as condições em que se realizaram.

As propriedades de cada grupo de explosivos também dão uma previsão de resultados de fragmentação, lançamento e vibração.

As mais importantes características são: potência e energia desenvolvida, velocidade de detonação, densidade, pressão de detonação, resistência a água e sensibilidade. Outras propriedades que também devem ser levadas em consideração são: fumos, resistência a altas e baixas temperaturas etc.

Potência e Energia

A potência é, do ponto de vista de aplicações industriais, uma das mais importantes propriedades, definida como a energia disponível para produzir efeitos mecânicos.

Há diferentes termos para expressar a potência dos explosivos. Nas dinamites originais, a porcentagem de nitroglicerina era o parâmetro de medida de potência. Mais tarde com a parcial substituição da nitroglicerina para outros produtos e a realização de teste em laboratórios, os termos foram mudados para Potência Peso Relativa e Potência Volumétrica Relativa. Desta maneira, é frequente se referir a potência de um explosivo em comparação com um explosivo padrão tal como o ANFO, que levaria o valor de 100.

Velocidade de Detonação

Velocidade de detonação refere-se a velocidade com que a onda de detonação é propagada através do explosivo, sendo portanto, o parâmetro que define o ritmo da energia liberada.

Os fatores que a afetam são: densidade de carga, diâmetro, confinamento e ignição. Com um aumento dos três primeiros parâmetros a VD cresce significativamente. Se a ignição não for suficientemente energética a detonação pode começar com velocidade baixa.

Densidade

A densidade da maioria dos explosivos varia entre 0,8 e 1,6 g/cm³ e, como a velocidade de detonação, quanto maior ela é, mais poder de quebra é fornecido.

A densidade de um explosivo é um importante fator no cálculo da quantidade de carga necessária para a detonação. Como regra geral, no fundo dos furos onde mais energia é requerida para arrancar o pé, mais altas densidades, tais como gelatinas, aquagel e emulsões são usadas. Nas cargas de coluna, onde mais baixas densidades são requeridas, é comum o uso de ANFO.

Pressão de Detonação

A pressão de detonação de um explosivo é uma função da densidade e do quadrado da velocidade de detonação. Ela é medida no plano C-J da onda de detonação quando ela se propaga através da coluna do explosivo.

Embora a pressão de detonação dependa além dos ingredientes que o compõem, da densidade e da VD. Estes parâmetros podem ser estimados pela seguinte equação:

$$PD = 432 \times 10^{-6} \times \rho_e \times VD^2 / (1 + 0,8 \times \rho_e)$$

Onde : PD = pressão de detonação (MPa) ; ρ_e = densidade do explosivo (g/cm³) ; VD = velocidade de detonação (m/s).

Comerciais explosivos têm um PD que varia entre 500 e 1500MPa.

Estabilidade

Explosivos devem ser quimicamente estáveis e não se decompor sob condições normais atmosféricas. A estabilidade dos explosivos é uma das propriedades que indicam o máximo de tempo que estas substâncias podem ser estocadas, de maneira que seus efeitos na detonação não sejam reduzidos.

Resistência à Água

Esta é a capacidade do explosivo de resistir a uma prolongada exposição à água sem perder suas características. Ela varia com a composição do explosivo e está geralmente unida a proporção de nitroglicerina ou especiais aditivos que eles contém; dinamites gelatinosas e emulsões são muito resistentes. Sais oxidantes, tais como nitrato de amônio, diminuem sua resistência a água pois eles são muito higroscópicos.

Sensibilidade

Esta característica envolve vários significados que dependem do tipo de ação externa que afetam os explosivos.

Ação controlada. A sensibilidade é equivalente a aceitar a detonação por um iniciador.

Ação incontrolável. A sensibilidade é uma medida da facilidade com que um explosivo pode ser detonado por calor, fricção, impacto ou choque.

Desensibilização

Em muitos explosivos industriais têm se observado que a sensibilidade diminui quando a densidade aumenta além de um certo valor. Este fenômeno é mais agudo em composições que não contém substâncias como TNT ou Nitroglycerina.

Em aquagels e tipos de ANFO a variação da sensibilidade é muito maior que em explosivos gelatinosos.

Na Figura 2 a influência da densidade do ANFO sobre a VD pode ser observada. Acima do valor de 1,1 g/cm³, a velocidade cai drasticamente.

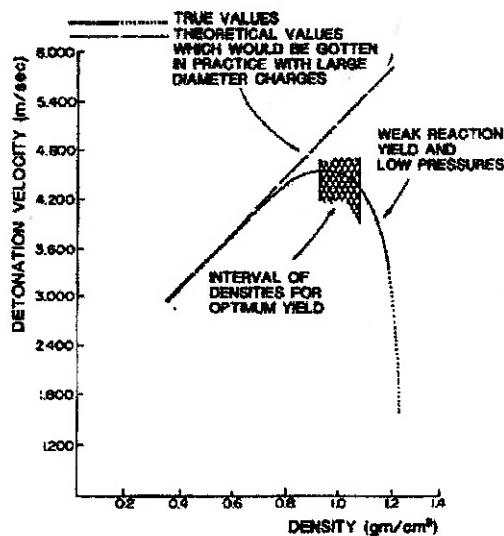


Figura 2 - Vel. de detonação x densidade do ANFO - (Jimeno,1995)

Explosivos Industriais

Os explosivos químicos industriais são classificados em dois grandes grupos, de acordo com a velocidade da onda de choque.

- a) *Rápidos e explosivos detonantes*. Com velocidades entre 2000 e 7000m/s. e
- b) *Lentos e explosivos deflagrantes*. Abaixo de 2000 m/s.

Os explosivos deflagrantes incluem pólvoras, compostos pirotécnicos e compostos propulsivos para artilharia e fogos de artifício, com praticamente nenhuma aplicação na engenharia civil e mineira, com exceção de rochas ornamentais.

Os explosivos detonantes são divididos em Primário e Secundário, dependendo de sua aplicação. Os Primários, por sua alta energia e sensibilidade, são usados como iniciadores dos Secundários, entre os quais podemos mencionar seus compostos: fulminato de mercúrio, PETN, Pentolita, etc. Os Secundários são aqueles que são aplicados para quebrar a rocha e fazem o trabalho mais útil. Seus compostos podem ser mistura de substâncias explosivas ou não, dependendo do menor preço de fabricação, do melhor balanço de oxigênio obtido e das características e propriedades que os ingredientes da mistura dão no sentido de sensibilidade, densidade, potência, resistência a água etc.

Vejamos agora alguns dos principais explosivos secundários industriais:

Nitrato de Amônio

Nitrato de Amônio (NH_4NO_3) é um sal branco inorgânico com um ponto de fusão de 160,6°C. Sozinho, ele não é um explosivo, somente atinge essa propriedade quando é misturado com pequenas quantidades de materiais combustíveis com os quais reagem violentamente pela contribuição de oxigênio. Para se ter uma idéia o ar tem 21% de oxigênio, NA tem 60%.

Embora o NA possa ser encontrado sob diversas formas, na fabricação de explosivos ele é usado na forma de pequenas esferas porosas, assim ele tem uma melhor característica para absorver e reter líquidos combustíveis e é facilmente manipulado.

O NA tem alta solubilidade em água, que varia consideravelmente para diferentes temperaturas:

Para 10°C 60,0% de solubilidade (em peso);

Para 20°C 65,4% de solubilidade;

Para 30°C 70,0% de solubilidade;

Para 40°C 73,9% de solubilidade.

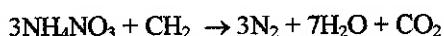
Por esta razão podemos ver por que o ANFO não é usado em furos encharcados.

ANFO

O ANFO (*Amonium Nitrate Fuel Oil*) nada mais é que o nitrato de amônio misturado com óleo combustível.

Qualquer substancia combustível pode ser usada com NA para produzir um agente detonador. O produto mais comum é o óleo diesel o qual, quando comparado com outros, tais como gasolina, querosene, etc., tem a vantagem de ter o mais alto ponto de volatilidade e, como uma consequencia, menor risco de uma explosão vaporosa.

A reação de decomposição do sistema balanceado é:



produzindo cerca de 920 kcal/kg. A estequiometria da mistura corresponde a 95,3% de NA e 5,7% de óleo diesel, que é o equivalente a 3,7 litros de diesel para cada 50kg NA.

A influênciā da porcentagem de diesel sobre a energia liberada e a velocidade de detonação está indicada na Figura 3.

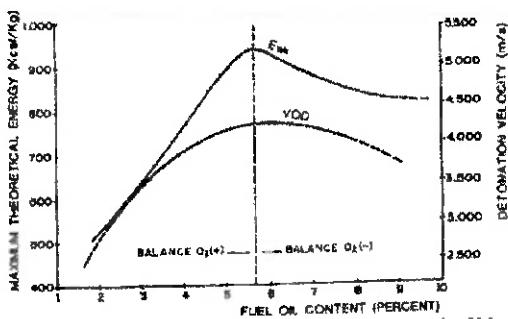


Figura 3 - gráfico Energia liberada x % óleo diesel - (da referência 1)

Pode-se ver que nem a mais alta porcentagem nem a mais baixa porcentagem indicada é interessante, para o máximo rendimento da detonação.

Quando fumaça de coloração laranja aparecem após uma detonação, isto indica uma insuficiência de óleo diesel, ou que o ANFO absorveu água do furo, ou não foi apropriadamente iniciado.

Como acontece com NA, a água é o principal inimigo do ANFO pois ele absorve uma grande quantidade de calor para produzir vapor e isto diminui consideravelmente o poder do explosivo. Num furo de 76mm de diâmetro, uma umidade de mais de 10% dessensibiliza o explosivo. Figura 4.

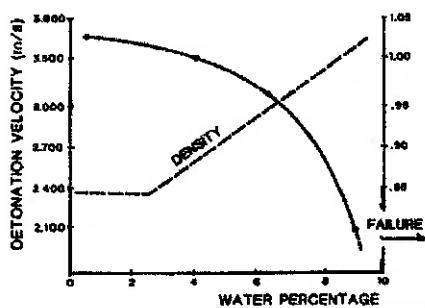


Figura 4 - gráfico Vel. de detonação x % de água - (Jimeno,1995)

As características do ANFO também variam com a densidade. Com seu aumento, a velocidade de detonação também aumenta, mas se torna também mais difícil conseguir sua iniciação. Densidades acima de $1,2 \text{ g/cm}^3$ o ANFO torna-se inerte e pode não ser detonado ou somente detona nas áreas próximas.

O tamanho dos grãos de ANFO também influenciam a densidade do ANFO. Portanto, quando o ANFO está abaixo de 100#, sua densidade muda para $0,6 \text{ g/cm}^3$, o que significa que para se atingir a densidade normal, entre $0,8$ e $0,85 \text{ g/cm}^3$, é preciso comprimir fisicamente na hora do carregamento.

Por outro lado, o diâmetro da carga é um parâmetro importante para a velocidade de detonação do ANFO. Figura 5.

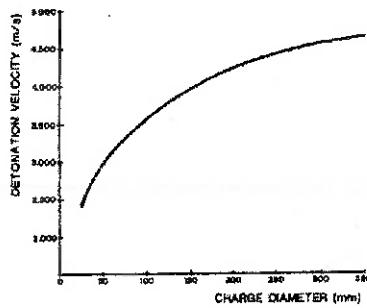


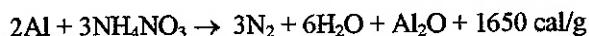
Figura 5 - gráfico Vel. de detonação x diâmetro de carga - (Jimeno,1995)

O diâmetro crítico deste explosivo é influenciado pelo seu confinamento e densidade da carga. Para densidades de $0,8 \text{ g/cm}^3$, o diâmetro crítico está por volta de 25mm, enquanto que para densidades de $1,15 \text{ g/cm}^3$, ele sobe para 75mm.

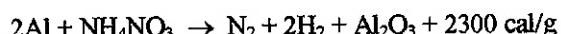
ALANFO

Como a densidade do ANFO é baixa, a energia resultante por metro de coluna é também baixa. Para elevar esta energia, produtos como alumínio tem sido adicionados com bons resultados técnicos e econômicos.

Quando o alumínio é misturado com nitrato de amônio em pequenas quantidades, a seguinte reação acontece:



mas, se a porcentagem de alumínio é maior, a reação produzida é :



Na Figura 6, a energia produzida pelo ALANFO com diferentes quantidades de alumínio é comparado com o ANFO.

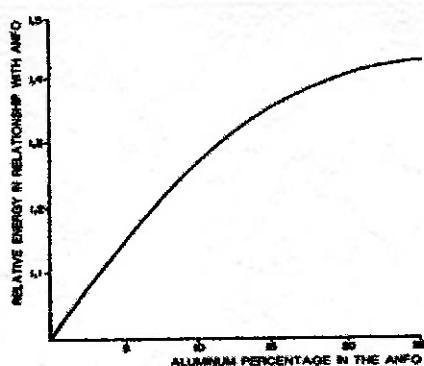


Figura 6 - gráfico Energia relativa com ANFO x % de Al no ANFO - (Jimeno,1995)

O limite prático, tanto como rendimento quanto econômico, fica entre 13 e 15%. Acima de 25% há uma redução de eficiência energética.

O alumínio deve estar com as seguintes especificações: quase 100% entre 20 e 150 # e mais de 94% puro.

Lamas

Lamas são agentes detonantes baseados em soluções aquosas saturadas de NA, frequentemente com outros oxidantes tais como nitrato de sódio e/ou nitrato de cálcio, nos quais o combustível, sensibilizadores, gelatinas e agentes ligantes são dispersados para evitar a segregação de sólidos.

Estes explosivos foram desenvolvidos no final da década de 50 quando Cook e Farnam obteram os primeiros teste positivos com uma mistura de 65% de NA, 20% de Al e 15% de água. A fabricação de lamas nos dias de hoje é baseada na mistura de soluções oxidantes com outra de nitrato monometil de amina (MMAN), e a adição de diversos sólidos e líquidos tais como oxidantes, espessadores, gelatinas, etc.

A solução oxidante é feita de água, nitrato de amônio e nitrato de sódio, no qual gomas são adicionadas para dar uma alta viscosidade para reter as bolhas de gás. O nitrato de sódio tem a vantagem de sua grande quantidade de oxigênio e também o menor ponto de cristalização da solução salina.

A solução de MMAN é preparada pelo aquecimento do container no qual ela é transportada. Este produto tem excelente sensibilidade, é muito bom combustível, tem um balanço de oxigênio negativo e alta densidade. A proporção de MMAN nas lamas varia entre 10 e 35%.

A mistura de aditivos sólidos é feita de alumínio, nitrostarch, gomas e outras substâncias em menores proporções.

O alumínio aumenta proporcionalmente a sensibilidade das lamas e a gomas e o nitrostarch servem para espessar a mistura. Eventualmente agentes ligantes são adicionados às lamas.

Uma das características das lamas é que são seguras, para fabricar e manusear, devido aos sensibilizadores em sua composição não serem essencialmente explosivos. Mesmo assim, seus resultados são muito bons o que significa que as lamas podem ser usadas em pequenos diâmetros e serem iniciadas com cartuchos convencionais.

Sua resistência à água é excelente e sua potência é equivalente ou superior aos de explosivos convencionais e podem ser ajustados em função da composição da lama. A energia desenvolvida oscila entre 700 e 1500 cal/g.

Emulsão

Esse grupo de explosivos é o mais recente no mercado, conservando as mesmas propriedades da lama, mas, ao mesmo tempo melhorando duas fundamentais características, potência e resistência à água.

Do ponto de vista químico, uma emulsão é um sistema de duas fases na qual uma fase interna ou dispersada está distribuída numa externa ou contínua.

A emulsão explosiva é também conhecida como um tipo de *água no óleo*, na qual há uma fase aquosa composta de sais inorgânicos oxidantes dissolvidos em água, e uma fase oleosa de um líquido combustível imissível com a água que é um hidrocarboneto.

Na tabela 1 a velocidade de detonação de cada um dos explosivos, com respectivos diâmetros, refletem a forte dependência da eficiência da reação com o tamanho das partículas.

Explosive	Size (mm)	Form	VOD (km/sec)
ANFO	2.000 mm	All solid	3.2
Dynamite	0.2 mm	All solid	4.0
Slurry	0.2 mm	Solid/liquid	3.3
Emulsion	0.001 mm	Liquid	5.0-6.0

Tabela 1 - (da referência 1)

Dependendo do tipo de combustível, óleo diesel, ceras, gomas, etc., as características reológicas da emulsão são diferentes, assim como suas aplicações e métodos de manuseio. Também o tipo de agente

emulsivo usado para reduzir a tensão superficial entre os dois líquidos imissíveis e portanto permitir a formação da emulsão, pode ajudar a evitar problemas de coagulação de grandes gotas de solução de nitrato de amônio assim como o fenômeno de cristalização dos sais.

A preparação da emulsão, entre encartuchados e volumétricos, é dado na Figura 7. Começando de diferentes componentes: fase aquosa oxidante, óleo e fase estabilizante, e um prévio aquecimento, uma intensa agitação dinâmica para se obter uma emulsão base que é mais tarde refinada para homogeneiza-la e estabiliza-la. Após isto, ela é misturada com produtos secos que ajustarão a densidade ou a potência do explosivo. Estes produtos sólidos podem ser alumínio em pó, agentes gasosos para reduzir a densidade, nitrato de amônio em grãos, etc.

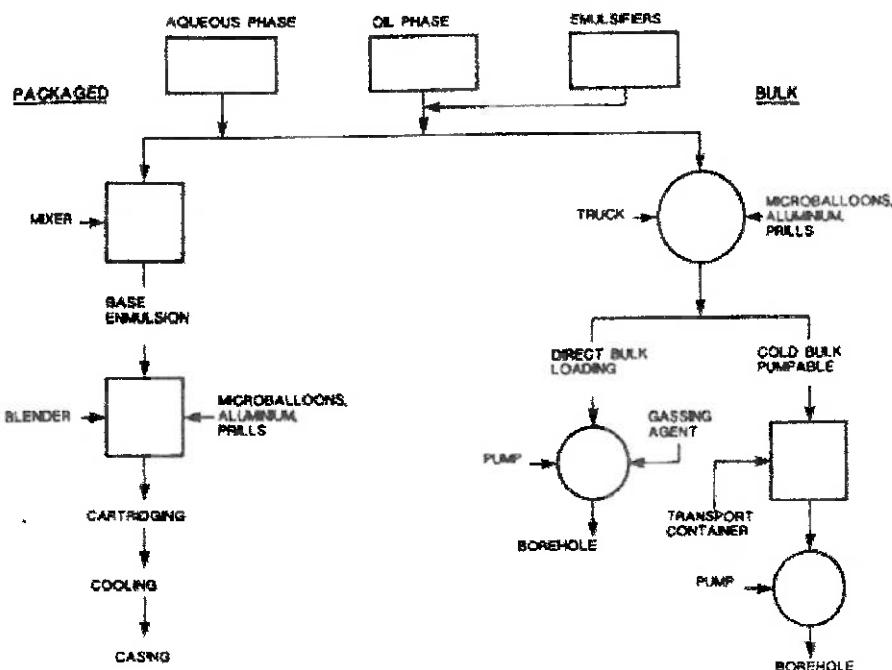


Figura 7 – esquema de fabricação da emulsão encartuchada, e a bombeada do caminhão
(Jimeno,1995)

Alumínio em pó, embora aumente a energia desenvolvida pelo explosivo, tem efeito redutor da velocidade de detonação.

Por outro lado, a sensibilidade da emulsão diminui com o aumento da densidade, fazendo-se necessário trabalhar sobre o diâmetro crítico e o uso de iniciadores potentes.

A recente tendência em usar emulsão no desmonte de rochas é baseado nas vantagens listadas abaixo:

- Excelente resistência à água
- Possibilidade de obter produtos com densidades entre 1 e 1.45 g/cm³
- Altas velocidades de detonação, 4000 a 5000m/s
- Muito segura fabricação e manuseio

- Possibilidade de cargas mecanizadas e preparação de misturas com ANFO

ANFO Pesado

O ANFO pesado é uma mistura de emulsão e ANFO, dando uma nova perspectiva no campo dos explosivos.

O ANFO deixa vazios intersticiais que podem ser ocupados por explosivos líquidos tais como emulsão que agem como uma matriz energizante.

Embora as propriedades deste explosivo dependem da porcentagem da mistura, suas principais vantagens são:

- Mais energia,
- Melhor sensibilidade,
- Alta resistência à água ,
- Possibilidade de carregamento com variação de energia ao longo do furo.

A fabricação é relativamente simples, como a matriz de emulsão pode ser preparada numa planta estática e transportada por caminhões um tanque estoque ou para caminhões misturadores. Com estes caminhões, a mistura de emulsão e nitrato de amônio e óleo diesel em adequadas proporções para o trabalho podem ser preparadas *in situ*.

Dinamites Gelatinosas

Em 1875, Alfred Nobel descobriu que grandes quantidades de nitroglicerina (NG) podem ser dissolvida e ser conservada em nitrocelulose (NC), obtendo-se um produto com consistência plástica de fácil uso e manuseio para época. Esta gelatina tinha 92% de NG e 8% de NC tendo um balanço de oxigênio igual a zero e liberava mais energia que a NG pura.

Após isso, com a intenção de reduzir a força da mistura explosiva, oxidantes e combustíveis foram adicionados, em apropriadas proporções para manter o balanço de oxigênio.

Nos dias de hoje, a porcentagem de NC - NG oscila entre 30 e 35% e o restante correspondem a oxidantes tais como nitrato de amônio, combustíveis e outros produtos especiais que corrigem a hidroscopicidade do nitrato.

As principais vantagens destes explosivos, são:

- Alta potência.
- Alta densidade, entre 1,2 e 1,5g/cm³.
- Altas velocidades de detonação, entre 5000 e 6000m/s.
- Grande resistência à água e estabilidade química.

Seus maiores problemas são:

- Riscos de acidentes na fabricação e transporte

- Sensibilidade a estímulo subsônico
- Fortes dores de cabeça nas pessoas, devido a NG dilatar os vasos sanguíneos
- Falta de flexibilidade em condições atmosféricas extremas.
- Alta custo de fabricação

Dinamite Granular

Esta mistura explosiva que é sensibilizada com NG mas com uma porcentagem abaixo de 15% tem uma consistência granular ou em pó.

Neste grupo de explosivos, uns tem uma base inerte e outros uma base ativa. Os primeiros, agora obsoletos, foram desenvolvidos por Nobel em 1867 e consistia de NG e kieselguhr. Aqueles com base ativa, são fabricados substituindo os materiais inertes por uma mistura de oxidantes e combustíveis que adicionam potência.

Os primeiros oxidantes usados eram nitrato de sódio, que foi substituído por nitrato de amônio, de maior eficiência energética.

Em casos especiais aditivos são adicionados para reduzir a higroscopicidade do NA.

Em certos explosivos granulares, parte ou toda NG é substituída por TNT.

As características desses explosivos são:

- Menor potência que as gelatinas.
- Velocidade de detonação e densidades entre 3000 e 4500m/s e 0,9 a 1,2g/cm³, respectivamente.
- Muito pouco resistência à água.
- Adequada para rochas leves e semi-dura como carga de coluna.

Critérios de Seleção de Explosivos

A seleção do tipo de explosivo é uma importante parte do plano de fogo e, consequentemente a obtenção de resultados.

Aqueles que usam muito frequentemente explosivos caem na rotina e miram apenas o mínimo custo de desmonte, sem levar em conta uma série de fatores que devem ser analisado para uma adequada seleção: custo do explosivo, diâmetro de carga, características da rocha, volume da rocha a ser detonado, presença de água, condições de segurança, atmosferas explosivas, e problemas de abastecimento.

Custo do explosivo

O custo do explosivo é obviamente um importante critério de seleção. Para começar deve-se escolher o explosivo mais barato e que o trabalho e o manuseio possam ser realizado.

Comparando-se os custos por unidade de peso, pode-se ver que o ANFO é o mais barato. Outras características desse agente detonante é a segurança, facilidade de estocagem, transporte e manuseio.

Entretanto, mesmo sendo o mais barato, o ANFO tem alguns problemas, tais como pobre resistência à água e baixa densidade.

Quando fala-se de custo seria mais correto expressar-se por unidade disponível de energia (\$/kcal) do que por unidade de peso (\$/kg) porque, o fato é que o resultado da detonação depende da energia destinada a fragmentação e empolamento da rocha.

Para um plano de fogo usando um tamanho fixo do furo requerendo um explosivo ou explosivos com um particular potência, e tendo fixado o tampão e a subfuração, o mais baixo custo será atingido por explosivo que tenham a potência requerida com mais baixo custo por unidade de comprimento do furo.

Diâmetro de Carga

Quando explosivos são usados com velocidade de detonação que variam muito com o diâmetro, como é o caso do ANFO, as seguintes precauções devem ser tomadas:

- ❖ Com furos abaixo de 50mm, é melhor o uso de lamas ou dinamites encartuchadas, mesmo embora eles sejam mais caros.
- ❖ Entre 50 e 100mm, o ANFO é adequado como carga de coluna e sendo carregado pneumáticamente para aumentar a densidade.
- ❖ Acima de 100mm, não há problemas com o ANFO.

Características da Rocha

As propriedades do maciço rochoso a ser detonado é um dos mais importantes parâmetros, não apenas por sua influência direta no resultado da detonação, mas por sua inter-relação com variáveis do plano.

As rochas podem ser classificadas em quatro tipos, e o seguinte critério de seleção é recomendado:

Maciços rochosos resistentes - Nestas formações, há muito pouca fissuras e planos de fraqueza, o que requer que o explosivo crie um grande número de novas superfícies, dependendo portanto da Energia de Choque. Os explosivos ideais são aqueles com alta densidade e velocidade de detonação: lamas, emulsões e gelatinas explosivas.

Rochas altamente fissuradas - Explosivos com alta Energia de Choque tem muito pouca influência na fragmentação final nesses maciços pois quando eles começam a desenvolver fissuras radiais, elas são rapidamente interrompidas quando interseparam uma fissura pré existente. Por esta razão, explosivos com alta Energia Gasosa, como o ANFO, é o indicado.

Rochas que formam blocos - Em maciços com grande espaçamento entre discontinuidades que formam volumosos blocos *in situ*, a fragmentação é governada principalmente pela geometria do fogo, e em menor grau pelas propriedades dos explosivos.

Nestes casos explosivos com balanceada Energia de Choque e Gasosa são recomendados, como o ALANFO e ANFOs pesados.

Rochas porosas - Neste caso um grande efeito "para-choque" e absorção de tensão é produzido, com a energia de gases realizando quase todo o trabalho de quebra. Dessa forma o explosivo adequado seriam aqueles com baixa densidade e velocidade de detonação, como o ANFO. Uma atenção maior deve ser consideradas para reter os gases nos furos por o máximo de tempo possível:

- ❖ Controle do material e tamanho do tampão
- ❖ Afastamento adequado
- ❖ Iniciação do fundo

Condições Atmosféricas

Baixas temperaturas tem fortes influências em explosivos que contém NG, que tendem a congelar a temperaturas abaixo de 8°C. Para resolver esse problema, substâncias como nitroglicol são usadas para baixar o ponto de solidificação para -20°C.

O ANFO não é afetado em baixas temperaturas quando apropriadamente iniciado, mas quando em quentes temperaturas é preciso controlar a evaporação do óleo diesel.

Presença de Água

Quando o ANFO está com mais de 10% de umidade, uma alteração é produzida que para a detonação. Portanto quando há água no furo deve-se fazer o seguinte:

- ◆ Se não há muita presença de água, o ANFO é colocado em sacos plásticos com densidades de 1,1g/cm³. Iniciadores axiais devem ser usados pois se um cartucho é rompido durante o carregamento, ele dessensibiliza toda a coluna.
- ◆ Se há muita água, o furo pode ser desaguado usando um compressor de ar da própria perfuratriz e carregando o ANFO antes da água voltar ao furo.
- ◆ Se o fluxo de água torna impossível esse desaguamento, deve-se usar emulsões ou aquagel.

Problemas Ambientais

O principal problema que afetam as áreas próximas é a vibração.

Do ponto de vista do explosivo, aqueles com mais alta Energia de Choque dão os mais altos níveis de vibração. Assim, quando viável, é melhor usar o ANFO ao invés de lamas.

Fumos

Embora muitos explosivos são preparados para seu balanço de oxigênio dê o máximo de energia e o mínimo de gases tóxicos, a formação de gases prejudiciais com certos gases nitrosos e contendo CO é inevitável.

Os fumos entram como critério de seleção em operações subterrânea apenas e deve ser apontado que é mais um problema de pobre ventilação do que do tipo de explosivo.

O Processo de Detonação

Para ilustrar como a reação química de um explosivo cria pressões extremamente altas que por sua vez promovem a quebra e o deslocamento da rocha, vejamos a Figura 8 .

Duas formas básicas de energia são liberadas quando um alto explosivo reage: a energia de choque e a energia gasosa.

Numa detonação a reação química se move ao longo do material explosivo a uma velocidade maior do que a velocidade do som na rocha.

Uma vez iniciada a reação ela se mantém e conduz uma onda supersônica através do explosivo.

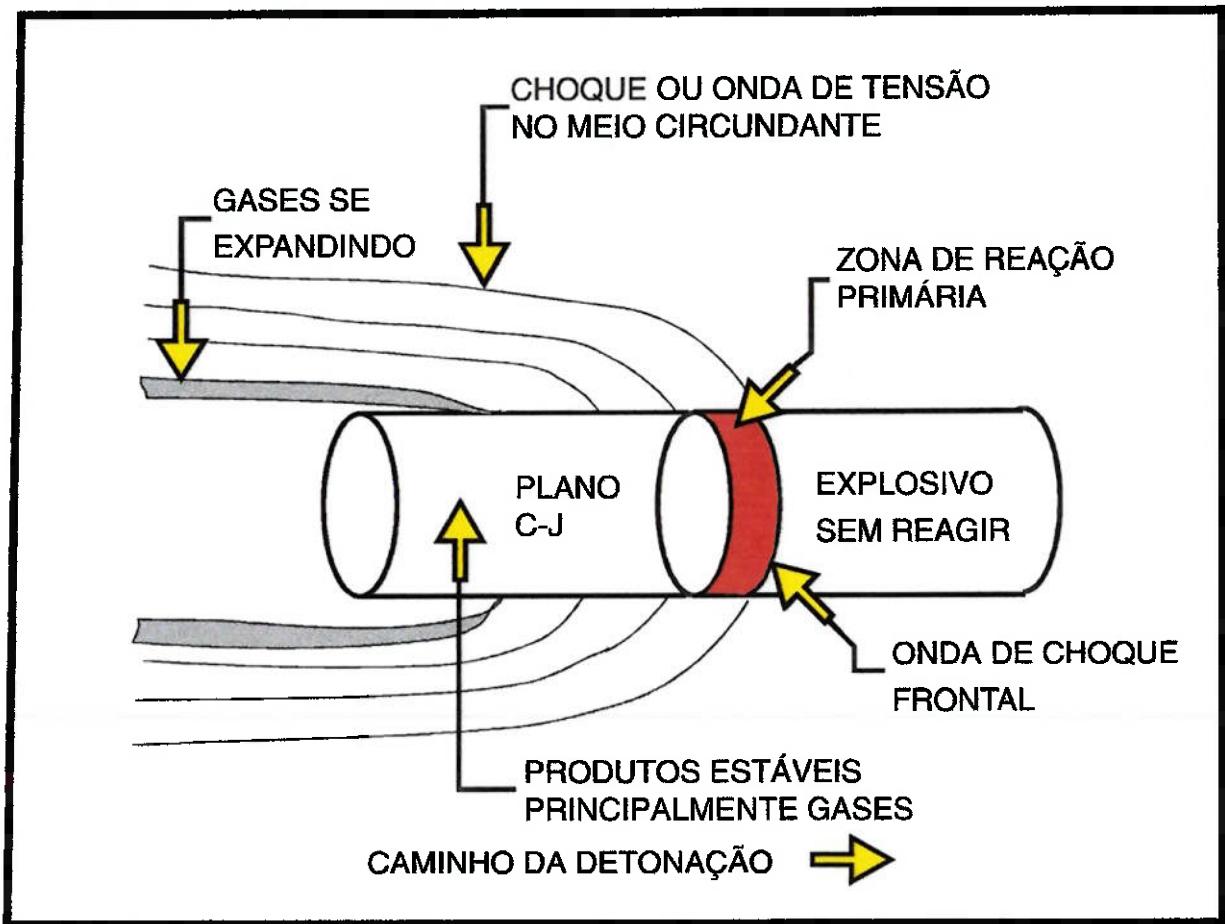


Figura 8 -Reação química de um explosivo- (Cintra,1998)

A zona de reação primária, área em que a decomposição química começa é limitada na frente pela onda de choque frontal e atrás pelo plano Chapman-Jouquet (C-J).

Na deflagração não existe a onda de choque frontal porque a decomposição se dá a velocidades subsônicas.

Parte da reação pode também ocorrer atrás do plano C-J, particularmente se alguns dos ingredientes são de granulação grosseira ou combustíveis metálicos. Podem afetar o desempenho do explosivo mas não influem na estabilidade ou velocidade da detonação.

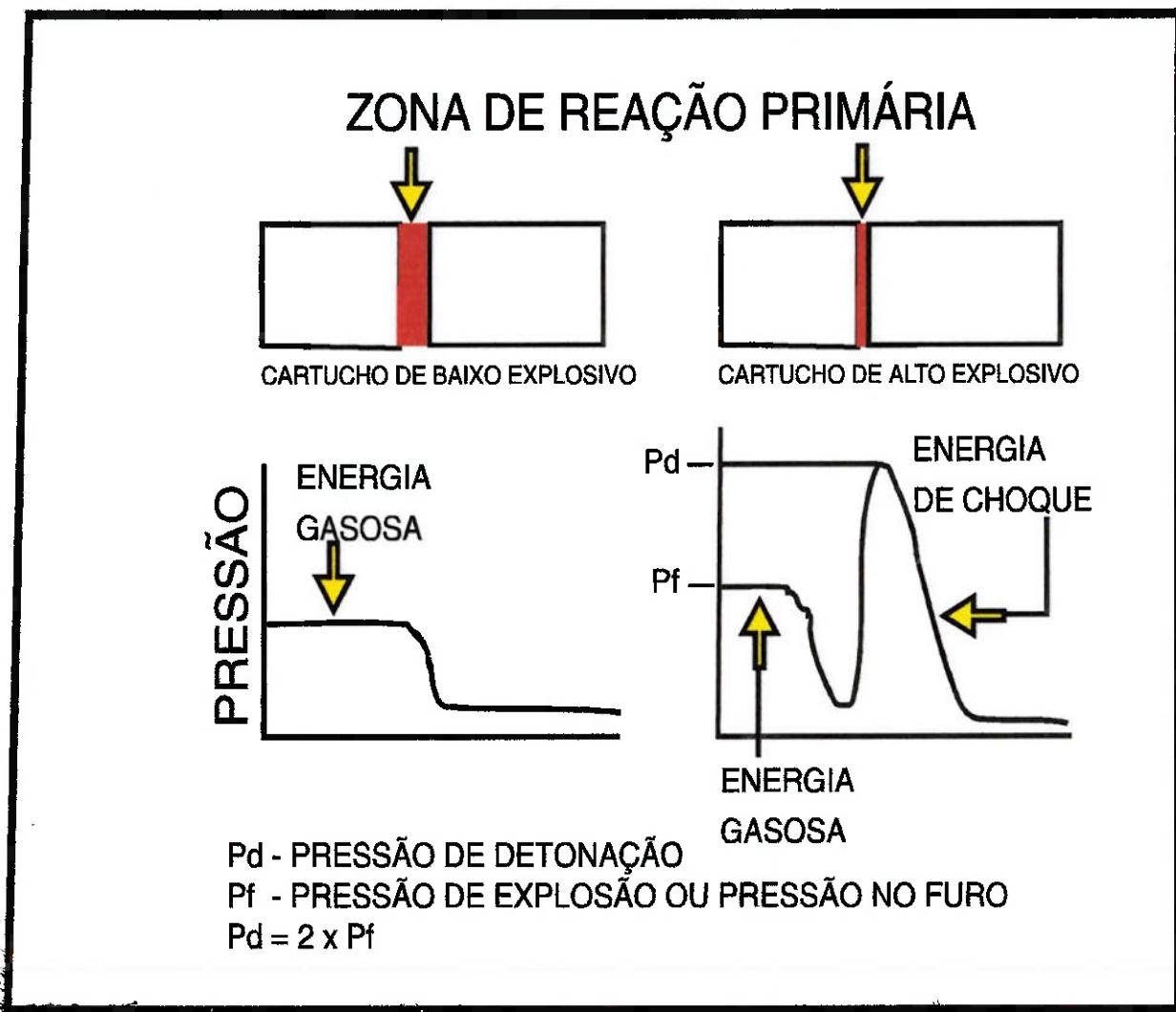


Figura 9 - Zona de reação de explosivos (Cintra,1998) -

Em explosivos de alta velocidade a zona de reação é bastante delgada. Em explosivos de baixa velocidade ela é bastante espessa. Veja Figura 9. Na detonação do ANFO ela pode atingir diversos centímetros.

O comprimento da zona de reação depende dos seguintes itens:

**ingredientes,
granulometria,
peso específico e
confinamento**

É a zona de reação que determina o diâmetro crítico dos explosivos.

Atrás do plano C-J estão os produtos da reação e em alguns casos, as partículas que não reagiram.

A maioria dos produtos são gases cujas temperaturas variam de 1500 a 4000 °C e altas pressões variando de 2 a 10 Gpa.

Estes gases a tais altas temperaturas e pressão se expandem rapidamente produzindo choque ou ondas de tensão no meio circundante.

Energia de Choque

O perfil de pressão, mostra como as forças são aplicadas à rocha. A pressão inicial, denominada pressão de detonação (P_d), é criada pela onda de choque supersônica que se move no mesmo sentido que a zona de reação. No caso em que a velocidade da reação é menor do que a velocidade do som na rocha, não haverá a geração da pressão de detonação.

A energia de choque é o resultado da pressão de detonação.

Ela é função do peso específico vezes o quadrado da velocidade de detonação.

A pressão de detonação é a pressão exercida pela onda de detonação propagando através da coluna de explosivos.

A pressão de detonação provoca a cominuição da rocha em volta do furo.

Na deflagração, embora a reação química se mova rapidamente, através do explosivo, e libere calor ou chama vigorosamente, a reação se move muito lentamente para produzir significante onda de choque e cominuição da rocha em volta do furo.

Um bom exemplo de deflagração é a pólvora. A indústria de explosivos, tomou como valor limite entre detonação e deflagração, 900 m/s. Este é um valor arbitrário.

A pressão de detonação ou energia de choque pode ser considerada similar a energia cinética que é máxima na direção do movimento.

A pressão de detonação nos cantos de um cartucho é virtualmente zero porque a onda de detonação não se estende aos cantos do cartucho.

Para tirar o máximo efeito da pressão de detonação do explosivo é necessário coloca-lo no material a ser quebrado e inicia-lo na extremidade oposta aquela em contato com o material. Colocar o cartucho deitado em cima de um bloco e inicia-lo de tal forma que a detonação seja paralela ao material é negar qualquer efeito da pressão de detonação. Além disto o explosivo estará sujeito a pressão causada pela expansão radial dos gases depois que a onda de detonação passou. Veja Figura 9.

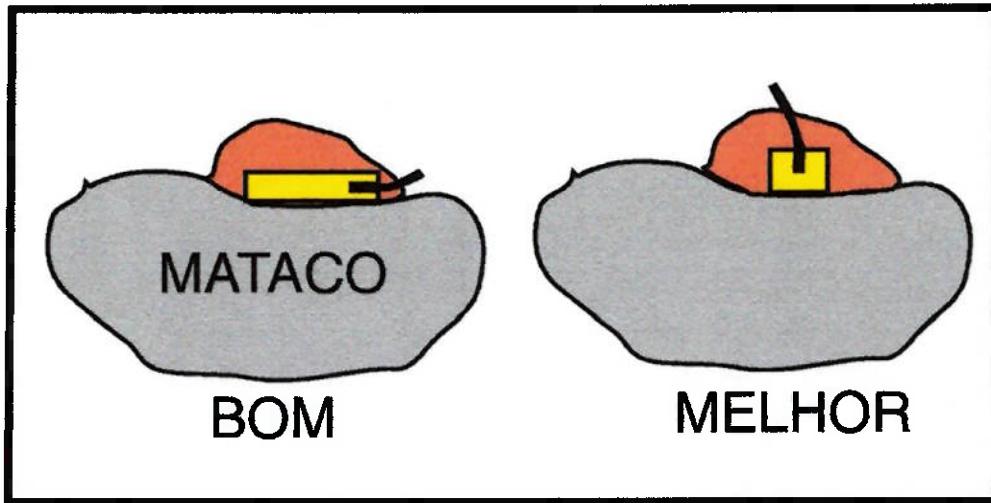


Figura 10 - Colocação de explosivos em mataços (Cintra,1998)

Para maximizar o uso da pressão de detonação devemos:

- selecionar maior área de contato possível do explosivo com o material.
- iniciar o explosivo na extremidade contrária a de contato com o material. Veja Figura 10 .

Energia Gasosa

A pressão de detonação é seguida por uma pressão uniforme sustentada, designada por pressão de explosão (P_e) ou pressão no furo.

A energia gasosa liberada durante o processo de detonação é responsável por grande parte da fragmentação com cargas confinadas.

A pressão no furo, também designada por pressão de explosão é a pressão que é exercida nas paredes do furo pela expansão dos gases depois de completada a reação química.

Resulta da:

da quantidade de gases liberada por unidade de peso de explosivo.

da quantidade de calor liberado durante a reação.

Para a condição de carga em que o explosivo ocupa toda a seção do furo e não existe ar na coluna, a pressão no furo é aproximadamente metade da pressão de detonação. É importante frisar que esta relação é apenas uma aproximação e condições podem existir onde a pressão de explosão excede a pressão de detonação. Isto explica o sucesso do ANFO que possui pressão de detonação relativamente baixa e pressão de explosão relativamente alta.

A pressão de explosão é calculada pela hidrodinâmica ou através de testes subaquáticos.

Mecanismo de Quebra da Rocha

Durante a detonação da carga do explosivo dentro da rocha, as condições presentes são caracterizadas por duas fases de ação:

1. Fase – um forte impacto é produzido pela onda de choque associada à Energia de Choque, durante um curto espaço de tempo.
2. Fase – Os gases produzidos atrás da frente de detonação vêm em ação, com altas temperaturas e pressão, implicando Energia gasosa.

Na fragmentação de rocha com explosivo muitos mecanismos de quebra estão envolvidos, com maior ou menor importância, mas eles todos exercem influência nos resultados no fogo.

Esmagamento da rocha

Num primeiro instante, a pressão na frente da onda de tensão, que se expande em forma cilíndrica, atinge valores que excedem a resistência a compressão dinâmica da rocha, provocando a destruição da estrutura intergranular e intercristalina.

A espessura dessa chamada zona de esmagamento aumenta com a pressão de detonação do explosivo e com o acoplamento entre a carga e a parede do furo. De acordo com Duvall e Atchison (1957), com explosivo de alta potência em rochas porosas essa zona pode atingir raios de 8D, mas ela fica normalmente entre 2 e 4D.

Fraturamento Radial

Durante a propagação da onda de choque, a rocha ao redor do furo é sujeita a intenso compressão radial que induz componentes de tensão nos planos tangentes da frente da onda. Quando as tensões tangenciais excedem a resistência de tensão dinâmica da rocha, a formação de uma área de fissuras radiais em volta da zona de esmagamento do furo é formada(Figura 11).

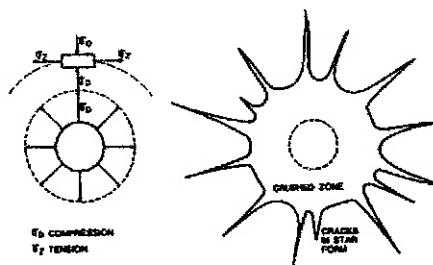


Figura 11 - fraturamento radial - (Jimeno,1995)

O número e comprimento dessas fissuras radiais aumenta com:

- A intensidade da onda de choque na parede do furo ou no limite exterior da zona de esmagamento e
- A diminuição da resistência a tensão dinâmica da rocha e a atenuação da Energia de Choque.

Reflexão

Quando a onda de choque atinge uma superfície livre duas ondas são geradas, uma onda de tensão e outra onda de cisalhamento. Isto ocorre quando fissuras radiais não propagam mais do que um terço da distância entre a carga e a face livre. Embora a magnitude relativa da energia associada com as duas ondas

dependam do ângulo de incidência da onda de choque de compressão, o fraturamento é usualmente causado pela ondas de tensão refletidas. Se a onda de choque é forte o suficiente para exceder a resistência dinâmica da rocha, o fenômeno conhecido como escamamento acontece, voltando para o interior da rocha. A resistência a tensão da rocha atinge valores entre 5 e 15% da resistência à compressão.

Este mecanismo não contribui muito para o processo de fragmentação global, estima-se que oito vezes mais de explosivo seriam necessários se a rocha fosse fragmentada apenas pelo reflexão das ondas.

Extensão dos Gases

Depois que as ondas de choque passam, a pressão dos gases causam um campo de pressão quase-estática ao redor do furo. Durante ou após a formação das fraturas radiais pela componente tangencial da onda, os gases começam a expandir e penetrar nas fraturas. As fissuras radiais são prolongados sob a influência da concentração de pressão em suas pontas. O número e o comprimento da abertura e desenvolvimento das fissuras dependem fortemente da pressão dos gases, e um escape prematuro desses devido a um tamponamento insuficiente ou pela presença de um plano de fraqueza na face livre pode levar a uma baixa performance da energia do explosivo.

Fraturamento por liberação de carga

Antes das ondas de choque atingirem a face livre, o total de energia transferido para a rocha pela compressão inicial varia entre 60 e 70% da energia de detonação. Depois que a onda de compressão passa, um estado de equilíbrio quase-estático é produzido, seguido por uma subsequente queda da pressão nos furos quando os gases escapam pelo tampão, através das fissuras radiais e com o lançamento da rocha. A Energia de Tensão é rapidamente liberada, gerando uma iniciação de fraturas de tensão e cisalhamento no maciço rochoso.

Quebra por Flexão

Durante e após o mecanismo de fraturamento e escamamento, a pressão aplicada pela explosão dos gases sobre o material na frente da coluna de explosivos, faz a rocha agir como uma viga engastada no fundo do furo e na área do tampão, produzindo a deformação e fraturamento pelo mesmo fenômeno da flexão. Figura 12.

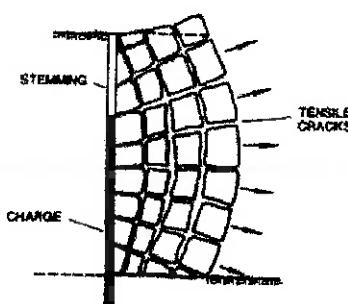


Figura 12 - mecanismo de quebra por flexão - (Jimeno,1995)

Como mostrado anteriormente, a pressão de detonação pode ser expressa pela seguinte equação simplificada:

$$PD = (\rho_e \times VD^2) / 4$$

Onde: PD = pressão de detonação (kPa), ρ_e = densidade do explosivo (g/cm^3), VD = velocidade de detonação (m/s).

A máxima pressão transmitida para a rocha é equivalente a:

$$PT_m = 2PD / (1 + n_z)$$

Onde n_z é o relacionamento entre a impedância do explosivo e o da rocha:

$$n_z = (\rho_e \times VD) / (\rho_r \times VC)$$

onde: VC = velocidade de propagação das ondas através do maciço rochoso (m/s), ρ_r = densidade da rocha (g/cm^3).

Isto significa que a onda do explosivo é melhor transmitida para a rocha quando a impedância do explosivo é próxima da da rocha, dando um n_z tendendo a 1, enquanto PT simultaneamente tende a PD. A pressão de onda dentro da rocha diminui exponencialmente, assim a tensão radial gerada para determinada distância será:

$$\sigma_i = PB \times (r_b/DS)^x$$

onde : σ_i = tensão radial de compressão, PB = pressão na parede do furo, r_b = raio do furo, DS = distância do centro do furo ao ponto em estudo, x = expoente da lei de absorção, o qual, para cargas cilíndricas é perto de 2.

Quando as impedâncias dos meios são iguais ($\rho_{r2} \times VC_2 = \rho_{r1} \times VC_1$), uma grande parte da energia será transmitida e o resto será refletida, chegando ao limite, quando ($\rho_{r2} \times VC_2 \ll \rho_{r1} \times VC_1$) como por exemplo, entre rocha e ar, onde quase toda energia será refletida voltando como uma onda de tensão que pode ter uma importância especial na quebra da rocha.

A performance dos explosivos sobre as rochas é, portanto, um grupo de ações elementares que ocorrem simultaneamente em poucos milisegundos, associado com os efeitos da onda de choque que transporta a Energia de Tensão, e com os efeitos da explosão dos gases ou Energia de Bolhas. Figura 13.

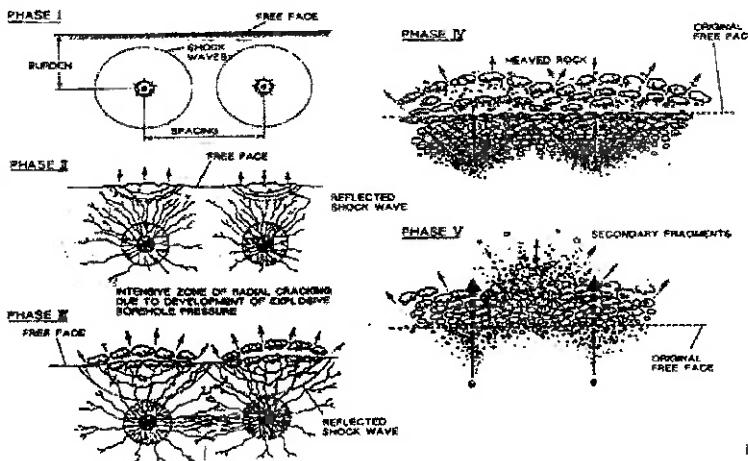


Fig.

Figura 13 – Fase I,II,III,IV,V do processo de detonação (Jimeno,1995)

A energia total desenvolvida pelo explosivo é medida pelo método proposto por Cole pode ser expressa como a soma desses dois componentes:

$$ETD = ET + EB$$

Onde : $ET = \frac{K_1}{Q} \int P^2 x dt \text{ (cal/g)}$ (Deformação)

$$EB = \frac{K_2}{Q} x T_e^3 \text{ (cal/g)} \quad (\text{Bolha})$$

Estimativas realizadas por Hagan (1977) demonstraram que apenas 15% do total de energia gerado na detonação é usada como ferramenta de trabalho no mecanismo de fragmentação e lançamento da rocha. Rascheff e Goemans (1977) estabeleceram um modelo teórico de distribuição da energia, em testes realizados em blocos cúbicos de rocha colocados submersos em piscina. Esta investigação garante que aproximadamente 53% da energia do explosivo está associada com as ondas de choque. Estes valores dependem da condição do experimento e vários resultados são encontrados, podendo variar de 5 a 50% do total de energia, dependendo do tipo de rocha e de explosivo.

Portanto, em rochas duras a Energia de Choque é mais importante na fragmentação do que a Energia de Gases, e o contrário, para rochas porosas, leves e muito fissuradas também é válido.

Parâmetros Controláveis do Fogo

Nos cálculos e planos de fogo, os parâmetros controláveis são classificados nos seguintes grupos:

- A. Geométrico (Diâmetro, comprimento de carga, afastamento, espaçamento etc.)
- B. Fisicoquímicos (tipos de explosivos, potência, energia, sistema de ignição, etc.)
- C. Tempo (espera e sequencia de ignição)

Para facilitar a compreensão e normalização dos símbolos usados no texto, a Figura 14 é usada para mostrar uma bancada de detonação onde parâmetros diferentes de um projeto e as mais frequentes terminologia usadas na fragmentação com explosivos são mostradas.

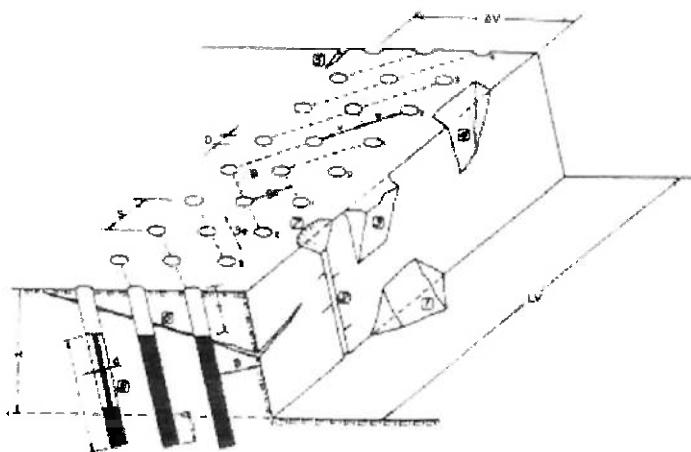


Figura 14 – Esquema de uma bancada de detonação (Jimeno,1995)

Parâmetros de projeto

- H = altura da bancada
- D = diâmetro do furo
- L = comprimento do furo
- d = diâmetro de carga do explosivo
- B = afastamento nominal
- S = espaçamento nominal
- LV = comprimento da área do furo
- AV = largura da área do furo
- B_e = afastamento efetivo
- S_e = espaçamento efetivo do furo
- T = comprimento do tampão
- l = comprimento de carga
- θ = ângulo entre os o centro de tiro das cargas de mesma espera
- t_r = tempo de espera
- 1 = pé
- 2 = meia cana
- 3 = ponta
- 4 = cavidade

5 = fissura de tensão

6 = roubo

7 = cratera

8 = carga com folga lateral

Diâmetro do furo

O diâmetro ideal de perfuração para uma dada operação dependem dos seguintes fatores:

- Propriedades do maciço a ser detonado.
- Grau de fragmentação requerido.
- Custos de perfuração e detonação.
- Capacidade dos equipamentos de carga.

Quando o diâmetro do furo é pequeno, os custo de perfuração, e iniciação são altos e, carregamento, tamponamento e amarração levam muito tempo e trabalho.

Quando D é muito pequeno, a única vantagem é uma menor razão de carregamento, devido a uma ótima distribuição do explosivo.

Quando o diâmetro é grande, os planos de furação serão correspondentemente grandes e a distribuição obtida poderá ser inaceitável se as juntas e descontinuidades forem largamente separadas e formando blocos *in situ*. Figura 15.

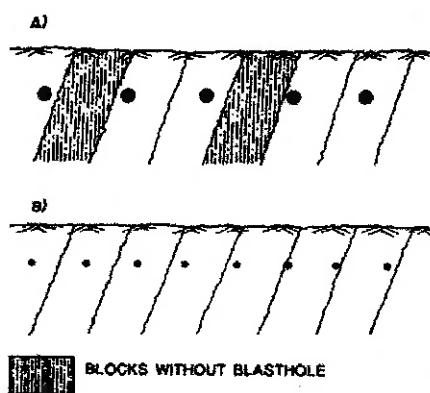


Figura 15 - influência do plano de perfuração e descontinuidades na geração de grandes blocos - (Jimeno,1995)

Um aumento em D é acompanhado pelas seguintes vantagens:

- Mais alta velocidade de detonação que dá mais estabilidade e menos influência das condições externas.
- Menores custos gerais de perfuração e detonação.
- Possibilidade de mecanização do carregamento do fogo.
- Mais alto produtividade de perfuração (m^3 detonado/ ml furado)
- Aumento do rendimento da escavadeira, como consequencia de menores zonas de baixa produtividade.

O comprimento do tampão aumenta com o diâmetro, e o colar dos furos podem tornar-se uma fonte potencial de matacos.

Nos maciços rochosos quando o comprimento da carga l e o diâmetro D tem razão $l/D < 60$, um aumento no último parâmetro tende a aumentar a fragmentação. Quando $l/D > 60$, um aumento em D requer um aumento na razão de carregamento, mantendo-se a fragmentação constante.

Em detonações de superfície, os diâmetros variam de 50mm a 380mm. Em fogos de engenharia civil o mais comum é que o D esteja entre 50 e 125mm, já na área de mineração este parâmetro se encontra entre 165 e 310mm.

Altura da bancada

A rigidez do paralelogramo de rocha localizado na frente dos furos exercem grande influência no resultado do fogo. Quando a razão H/B é grande, será fácil o lançamento e deformação da rocha, especialmente no centro da bancada. A razão ótima é que $H/B \geq 3$.

Quando H é pequeno qualquer variação no afastamento ou no espaçamento, terá grande influência no resultado do fogo. Quando H aumenta, com B constante, o espaçamento pode aumentar aos máximos valores sem afetar a fragmentação.

Se a altura da bancada é muito grande, poderá haver problemas com desvios de furos, que não somente afetaram a fragmentação como também aumentam os riscos de fortes vibrações e ultralançamentos devido a relação $B \times S$ não permanecer constante ao longo do furo.

Inclinação do Furo

A inclinação dos furos trazem numerosos benefícios, assim como algumas desvantagens que devem ser estudadas caso a caso. Os benefícios de um furo inclinado são:

- melhor fragmentação, lançamento e empolamento da pilha, como o afastamento B é mantido mais uniforme ao longo do furo e o ângulo de projeção aumenta.
- Mais macio e segura inclinação nas novas bancadas criadas.
- Mais alta produtividade na frente de carregamento, devido a maior empolamento e menor altura da pilha.
- Menor subfuração e melhor uso da energia do explosivo, com menor nível de vibração.
- Menor razão de carregamento pois a onda de choque é melhor refletida no pé da bancada e possibilita um aumento do afastamento sem aumentar o risco de aparecer repé.
- Aumento da produção furada por unidade de volume desmontada.

Já podemos listar abaixo algumas desvantagens:

- Aumento de desvios quando os furos são longos.
- Aumento do comprimento de perfuração
- Dificuldade no posicionamento da perfuratriz.
- Maior uso de bits, hastes e luvas.
- Menor produtividade com escavadeiras devido a menor altura da pilha.
- Problemas no carregamento de explosivos, especialmente em furos com água.

Comprimento do Tampão

O tampão é a porção do furo que é carregado com material inerte, acima da carga para confinar e para reter os gases produzidos pelo explosivo, assim melhorando o processo de fragmentação. Se o tampão é insuficiente, haverá escapes prematuros de gases, que gerarão impacto de ar e ultralançamento. Por outro lado, se o tampão for excessivo, haverá grandes quantidades de matacos provenientes da parte do topo da bancada, pobre empolamento da pilha e elevado nível de vibração.

O comprimento ótimo do tampão, na prática, aumenta com a diminuição da qualidade e competência da rocha, variando entre 20D e 60D.

Subfuração

A subfuração J é o comprimento que se deve furar abaixo do nível do solo para quebrar a rocha na altura da bancada e atingir adequada fragmentação e lançamento permitindo que os equipamentos de carga atinjam níveis esperados de produtividade.

Se a subfuração for pequena, a rocha não será devidamente cisalhado no nível do solo, aparecendo repé e aumentando consideravelmente o custo de carregamento.

Entretanto, se a subfuração for excessiva, o seguinte pode ocorrer:

- aumento do custo de perfuração e desmonte.
- Aumento do nível de vibração.
- Excessiva fragmentação no topo de futuras bancadas, causando problemas de perfuração e estabilidade desses taludes e bancadas.
- Aumento do risco de roubo e cavidades, pois o componente vertical do lançamento da rocha é acentuado.

Afastamento e Espaçamento

O afastamento B é a mínima distância do eixo do furo até a face livre, e o espaçamento é a distância entre os furos numa mesma fileira. Estes parâmetros dependem basicamente do diâmetro de perfuração, as propriedades das rochas e dos explosivos, a altura da bancada e o grau de fragmentação e lançamento desejado.

Várias fórmulas foram sugeridas para se calcular o afastamento, que levam em conta um ou mais desses parâmetros; entretanto, seus valores caem todos numa média de 25 a 40D, dependendo fundamentalmente da propriedades do maciço. Figura 16.

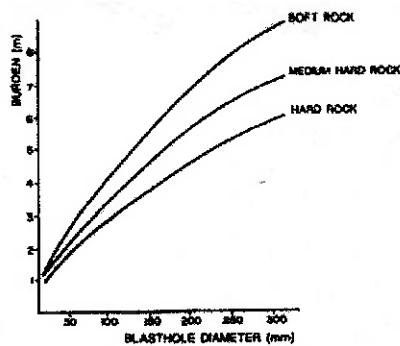


Figura 16 - gráfico afastamento x diâmetro do furo - (Jimeno,1995)

É muito importante estar certo se as dimensões do afastamento B está adequado. Menores ou maiores valores podem ser encontrados devido às seguintes situações:

- Erros de marcação
- Erros de inclinação e direcionais
- Irregularidades na face inclinada
- Desvios durante a perfuração.

Se o afastamento é pequeno, o escape de gases e a expansão em alta velocidade em direção da face livre, promovem a fragmentação da rocha e projetam-na incontrolavelmente, provocando um aumento na sobrepressão do ar e barulho.

O valor do espaçamento é calculado em função do afastamento, o tempo de espera entre os furos e a sequencia de ignição. Espaçamento muito pequeno causam excessiva esmagamento entre as cargas e crateras superficiais, grandes blocos na frente dos furos e problemas com repé.

Excessivo espaçamento entre os furos, causam fraturamento inadequado entre as cargas, problemas com o pé e faces irregulares com pontas em novas bancadas.

Modelo dos Furos

Na bancada de detonação, o desenho normal de furação fica entre quadrada ou retangular, mais fácil de ser marcada. Entretanto, o modelo mais eficiente é o escalonado, especialmente aqueles furados em uma malha de um triângulo equilátero, pois eles dão ótima distribuição da energia do explosivo na rocha e permite maior flexibilidade quando na modelagem da sequencia e direção de quebra.

Geometria da Face Livre

A mais efetiva geometria da face livre é aquela na qual cada ponto da superfície está equidistante do centro de carga do explosivo.

A melhor face livre é atingida por:

- Locando as cargas paralelas a face livre ou formando o menor ângulo possível.
- Projetar uma sequencia de ignição em que cada furo forme com a face um semi-cilindro convexo ou uma superfície bi-planar. Figura 17.

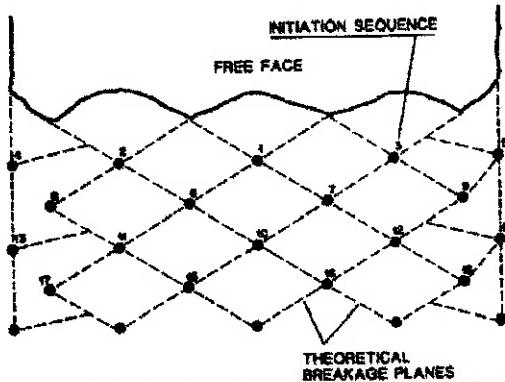


Figura 17 - geometria da face livre e a sequencia de iniciação - (Jimeno,1995)

Explosivos

Quando escolhemos um explosivo para uma dada operação, atenção cuidadosa deve ser dada para as propriedades da rocha a ser fragmentada, assim como a disponibilidade dos explosivos no mercado.

Quando rochas macias são quebradas, quase toda a área específica do material é criada pela detonação, e o explosivo usado deve ser de máxima potência e velocidade de detonação que produzam alta pressão nos furos. Por outro lado, em rochas altamente estratificadas ou fissuradas, na qual a área total das descontinuidades é relativamente maior do que a criada pela detonação, explosivos de baixa densidade e velocidade de detonação são mais eficientes.

Razão de Carregamento

A quantidade de explosivo para fragmentar 1m³ ou 1t de rocha é o parâmetro conhecido como *razão de carregamento*. De acordo com a opinião de diversos especialistas, este parâmetro não é o melhor sendo apenas uma ferramenta usada no plano de fogo, a menos que ele se refira ao modelo de explosivo ou seja expresso como energia consumida, basicamente porque a distribuição espacial do explosivo na rocha tem grande influência nos resultados do fogo.

A razão pode ser aumentada com um aumento do diâmetro do furo. Quando a razão de carregamento é alta, aparte de dar uma boa fragmentação, lançamento e empolamento da rocha, há uma diminuição de problemas com pé e isto ajuda a atingir um ótimo custo-efetividade de operação, isto é, perfuração, detonação carregamento transporte e britagem.

METODOLOGIA de ANÁLISE

Na Pedreira Embu-Perus há atualmente duas frentes principais de lavra para produção de pedra britada: 6B1 (já em fase de esgotamento) e a 5B1 (ver em anexo foto 1) . Frentes que são detonadas esporadicamente (, 7A, 6A, 5A e 5B) e frentes de desenvolvimento (4 A e 8A) não foram analisadas nesse

trabalho devido ao pouco número de fogos que são dados nessas frentes, sendo portanto analisados apenas os fogos das frentes 6B1 e 5B1 no período de 20/05/98 a 29/10/98.

As bancadas são todas de 10m de altura com inclinação do talude de 20°. Trabalha-se na produção com 1 carregadora Caterpillar 980-C e duas Michigan 125 - C (sendo uma de reserva) e cinco caminhões fora-de-estrada Randon RK425 com capacidade para 12m³. O serviço de perfuração é realizado por uma perfuratriz hidráulica Atlas Copco modelo 642 alugada que trabalha em dois turno (ver em anexo foto 2).

O britador primário é um 100x80 da FAÇO. Assim para essa pedreira é definido como um mataco aquelas rochas provenientes do fogo que têm diâmetros maiores que aproximadamente 80cm. Esses matacos devem ser quebrados na frente de lavra pelo rompedor hidráulico montado numa escavadora Liebherr 942 (também alugado). Na "boca" do primário há uma pinça hidráulica que retira ocasionais matacos que venham a ser descarregados no britador.

A produção média da pedreira gira em torno dos 420.000m³ anuais, trabalhados em um único turno de lavra e dois de rebitagem.

O plano de fogo tem uma malha com 3° linhas de perfuração com um afastamento médio de marcação na 1° linha de 2,7m, na 2° de 2,5m e na 3° de 2,2, espaçamento médio de 2,5m, tampão médio de 2,2m com 40cm de ar separando o explosivo do material de tamponamento que é a brita 1.

Essa malha de marcação é definida de uma maneira simples e conta de longa experiência dos técnicos responsáveis. Sendo a razão de carregamento definida como a massa total de explosivos dividido pelo volume de material desmontado empolado, temos a seguinte fórmula:

$$R = \frac{RLCx(H_f - T)}{(H_f \cos \alpha)AxE}$$

onde R = razão de carregamento; RLC = razão linear de carga do explosivo a ser usado; H_f = comprimento perfurado do furo; A = afastamento; E = espaçamento; T = tampão; α = ângulo de inclinação da bancada.

A média do diâmetro do furo num fogo, está por volta dos 90mm (3,5"), podendo as vezes chegar a 80mm, junto com a densidade do explosivo predominante a ser usado encontramos a RLC (kg/m), o tampão e o H_f é conhecido, escolhendo uma razão de carregamento razoável, hoje está por volta de 950g/m³, iremos encontrar a malha quadrada de marcação AxE (não confundir com malha real : devido a inclinação, o afastamento real é igual a cosαxA). A partir daí joga-se um maior afastamento na 1° linha e diminui progressivamente na 2° e na 3° linha mantendo-se constante o espaçamento, de forma que a malha média se aproxime com a malha quadrada, garantindo assim a razão de carregamento desejada, mas com maior fator de segurança pois houve um aumento do afastamento na 1 Linha. Analisa-se então, o resultado e a partir dos próximos fogos muda-se, em função do resultado, a razão, o afastamento ou o espaçamento etc. . Esse é um método muito empírico e que foi se adequando muito bem à pedreira ao longo dos anos.

O carregamento teoricamente obedece a seguinte regra: para carga de fundo, emulsão bombeada, para carga de coluna ALANFO + salsichão; bananas de emulsão com 21/4" são usadas entre a emulsão e o ALANFO + salsichão. Essa configuração varia muito, principalmente em função da quantidade de água presente nos furos, o que impossibilita a utilização de ALANFO. É justamente por causa dessa variação de quantidade de um tipo ou de outro explosivo é que foi possível comparar os resultados de fogos com muito ALANFO, com fogos com muita emulsão.

O sistema de iniciação é feita da seguinte maneira : na carga de fundo coloca-se dois (para maior segurança) Amplex (explosivo a base de Nitropenta) que irá iniciar a emulsão que por sua vez inicia a banana de 2 1/4" que inicia o salsichão e este percorre todo o furo iniciando o ALANFO. O Amplex é iniciado por uma espoleta de linha silenciosa CA250ms. Na superfície utilizando-se de espoletas de retardo (linha silenciosa HTD 17ms) é feito um sequenciamento de ligação que simplificadamente pode ser exemplificado logo abaixo (essa sequencia é frequentemente mudada de acordo com as necessidades do fogo):

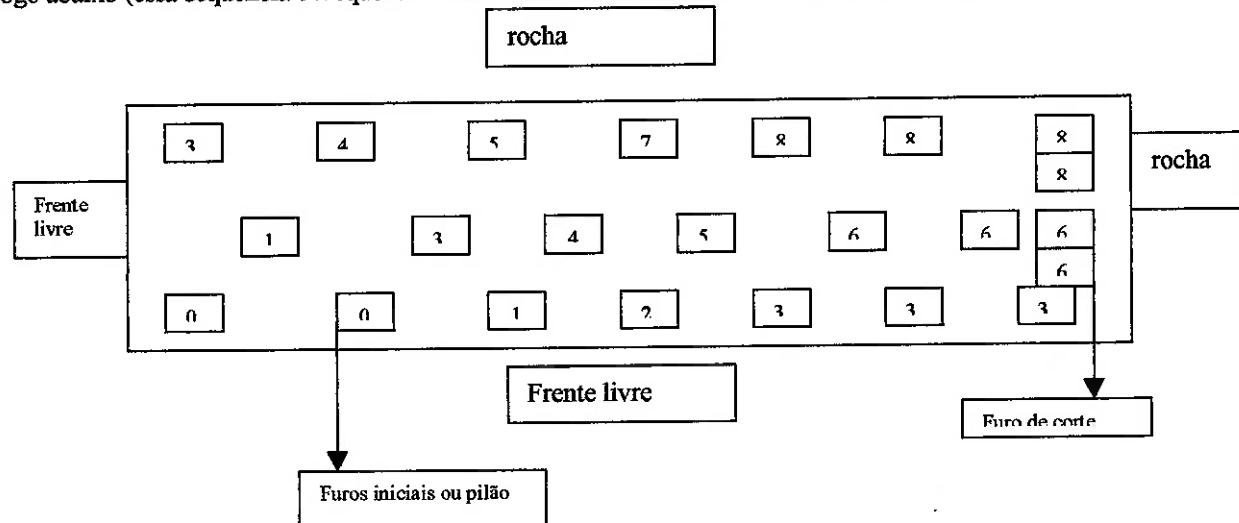


Figura 18 - Esquema simplificado de ligação na Embu-Perus -

Notar que como cada espoleta que vai dentro do furo tem uma espera de 250ms e cada retardo desses na superfície (indicado com números) correspondem a 17ms, há uma garantia de que todos os furos estejam acionados antes do primeiro, o 0, detonar, evitando possíveis falhas.

A iniciação é feita por estopim que detona um pedaço de cordel amarrado aos retardos do pilão.

Para fazer o levantamento de fragmentação dos fogos, foi utilizado como parâmetro, um índice de mataco que foi definido como o número de matacos de um fogo, dividido pelo volume empolado e multiplicado por 1000, temos assim o número de matacos para cada 1000m³ empolado desmontado. A contagem de mataco é realizada por um apontador treinado e que fica ao lado do rompedor hidráulico, anotando onde e quantos matacos ele quebra. É importante ressaltar que matacos muito grandes são contados como 2, 3, e até 4, pois um fogo com matacos de menor diâmetro é com certeza um fogo bem melhor fragmentado que um fogo com matacos grandes.

A curva granulométrica de um fogo com muitos matacos grandes apresenta maior índice de material grosso que vai para o britador, diminuindo nossa produtividade, uma vez que há um escalpe de finos no

alimentador do britador primário. Portanto, conforme temos um aumento do número de matacos temos consequentemente uma diminuição de nossa capacidade de produção.

Na pedreira Embu-Perus, todos os dados de um fogo são armazenados em um programa no qual pode-se fazer uma consulta para verificar quantidade de explosivo usado, volume desmontado, total de metros perfurados etc. (um exemplo de um fogo está em anexo). A partir disso foi possível lançar todos esses dados adicionando-se índice de mataco e custos e montar uma tabela possibilitando separar as frentes, fazer gráficos, analisando e comparando fogo a fogo, frente a frente.

RESULTADOS

A proposta do trabalho é tentar verificar a existência ou não de uma relação entre a porcentagem de um explosivo (emulsão ou ALANFO) e resultados de fragmentação.

Abaixo podemos mostrar o levantamento dos fogos na frente 5B1 com seus respectivos resultados de fragmentação e custos. Da mesma forma mostramos as tabelas dos fogos na frente 6 B1.

DATA	F	em (%)	m 1 (%)	m 2 (%)	AF (%)	d (mm)	Ve (m³)	Rcc (g/m³)	m perf. (m)	L.M.
20/Mai	5B1	62,86%	3,65%	8,80%	24,68%	85,3	5832	740	578	147
29/Mai	5B1	68,29%	3,07%	5,95%	22,68%	89,8	6669	885	622	149
26/Jun	5B1	49,38%	5,75%	5,00%	39,87%	85,8	7858	813	762	73
03/Set	5B1	52,21%	4,72%	5,45%	37,62%	87,9	8659	1019	991	94
25/Set	5B1	77,62%	1,84%	7,04%	13,50%	86,6	8190	964	822	74
07/Out	5B1	80,77%	1,84%	8,30%	9,09%	83,0	7263	1009	848	86
20/Out	5B1	80,12%	1,62%	6,25%	12,01%	89,1	8761	1010	855	67
29/Out	5B1	79,92%	1,77%	5,24%	13,08%	87,1	8627	959	877	41

Tabela 2 – dados de fogos da frente 5B1

DATA	Explosivos	Custo expl	m perfurados	Custo perf.	Accessórios	Custo Ac.	Gasto Total	C emp
20/Mai	R\$ 2.208,25	R\$ 0,38	R\$ 2.550,88	R\$ 0,44	R\$ 1.300,58	R\$ 0,22	R\$ 6.059,71	R\$ 1,04
29/Mai	R\$ 3.015,76	R\$ 0,45	R\$ 2.744,25	R\$ 0,41	R\$ 1.346,15	R\$ 0,20	R\$ 7.106,16	R\$ 1,07
26/Jun	R\$ 2.986,03	R\$ 0,38	R\$ 3.362,81	R\$ 0,43	R\$ 1.365,22	R\$ 0,17	R\$ 7.714,06	R\$ 0,98
03/Set	R\$ 4.149,10	R\$ 0,48	R\$ 4.370,96	R\$ 0,50	R\$ 2.135,99	R\$ 0,25	R\$ 10.656,05	R\$ 1,23
25/Set	R\$ 4.231,68	R\$ 0,52	R\$ 3.625,02	R\$ 0,44	R\$ 1.753,98	R\$ 0,21	R\$ 9.610,67	R\$ 1,17
07/Out	R\$ 4.045,07	R\$ 0,56	R\$ 3.738,29	R\$ 0,51	R\$ 1.821,70	R\$ 0,25	R\$ 9.605,06	R\$ 1,32
20/Out	R\$ 4.766,83	R\$ 0,54	R\$ 3.770,18	R\$ 0,43	R\$ 1.818,01	R\$ 0,21	R\$ 10.355,02	R\$ 1,18
29/Out	R\$ 4.425,94	R\$ 0,51	R\$ 3.868,58	R\$ 0,45	R\$ 1.797,18	R\$ 0,21	R\$ 10.091,70	R\$ 1,17

Tabela 3 – dados de custos de fogos da frente 5B1

DATA	F	em (%)	m 1 (%)	m 2 (%)	AF (%)	d (mm)	Ve (m³)	Rcc (g/m³)	m perf. (m)	I.M.
26/Mai	6B1	72,13%	3,30%	4,42%	20,15%	91,1	7273	914	701	130
05/Jun	6B1	62,86%	3,12%	8,76%	25,26%	88,8	7273	886	695	127
23/Jun	6B1	58,87%	4,34%	4,19%	32,60%	87,3	7619	885	774	86
14/Jul	6B1	49,21%	6,37%	2,74%	41,68%	82,7	7142	897	808	80
22/Jul	6B1	44,84%	5,67%	4,39%	45,10%	85,2	7776	929	833	137
04/Ago	6B1	33,90%	6,69%	1,64%	57,77%	90,0	8364	902	816	96
18/Ago	6B1	49,87%	4,97%	6,65%	38,51%	86,0	7607	928	805	98
10/Set	6B1	74,36%	1,94%	8,45%	15,25%	90,0	6926	1018	734	117
22/Set	6B1	80,50%	1,80%	6,66%	11,04%	87,9	6926	936	710	163
01/Out	6B1	82,49%	1,32%	6,37%	9,82%	86,0	5831	1140	668	105
14/Out	6B1	79,61%	2,36%	3,47%	14,57%	90,0	5728	1074	579	87
22/Out	6B1	71,36%	2,48%	5,15%	21,02%	88,1	5112	985	561	49

Tabela 4 – dados de fogo da frente 6B1

DATA	Explosivos	Custo expl	m perfurados	Custo perf.	Acessórios	Custo Ac.	Gasto Total	C emp
26/Mai	R\$ 3.443,81	R\$ 0,47	R\$ 3.090,97	R\$ 0,43	R\$ 1.481,91	R\$ 0,20	R\$ 8.016,69	R\$ 1,10
05/Jun	R\$ 3.266,70	R\$ 0,45	R\$ 3.063,23	R\$ 0,42	R\$ 1.456,76	R\$ 0,20	R\$ 7.786,70	R\$ 1,07
23/Jun	R\$ 3.254,33	R\$ 0,43	R\$ 3.414,85	R\$ 0,45	R\$ 1.531,87	R\$ 0,20	R\$ 8.201,05	R\$ 1,08
14/Jul	R\$ 2.955,83	R\$ 0,41	R\$ 3.565,61	R\$ 0,50	R\$ 1.620,97	R\$ 0,23	R\$ 8.142,41	R\$ 1,14
22/Jul	R\$ 3.242,94	R\$ 0,42	R\$ 3.673,01	R\$ 0,47	R\$ 1.629,78	R\$ 0,21	R\$ 8.545,73	R\$ 1,10
04/Ago	R\$ 3.088,36	R\$ 0,37	R\$ 3.600,59	R\$ 0,43	R\$ 1.651,39	R\$ 0,20	R\$ 8.340,34	R\$ 1,00
18/Ago	R\$ 3.317,27	R\$ 0,44	R\$ 3.548,76	R\$ 0,47	R\$ 1.407,59	R\$ 0,19	R\$ 8.273,62	R\$ 1,09
10/Set	R\$ 3.760,20	R\$ 0,54	R\$ 3.236,79	R\$ 0,47	R\$ 1.509,34	R\$ 0,22	R\$ 8.506,33	R\$ 1,23
22/Set	R\$ 3.523,96	R\$ 0,51	R\$ 3.133,18	R\$ 0,45	R\$ 1.430,12	R\$ 0,21	R\$ 8.087,27	R\$ 1,17
01/Out	R\$ 3.620,01	R\$ 0,62	R\$ 2.946,83	R\$ 0,51	R\$ 1.274,41	R\$ 0,22	R\$ 7.841,25	R\$ 1,34
14/Out	R\$ 3.261,90	R\$ 0,57	R\$ 2.553,35	R\$ 0,45	R\$ 1.218,40	R\$ 0,21	R\$ 7.033,66	R\$ 1,23
22/Out	R\$ 2.581,29	R\$ 0,50	R\$ 2.475,28	R\$ 0,48	R\$ 1.208,04	R\$ 0,24	R\$ 6.264,62	R\$ 1,23

Tabela 5 – dados de custos de fogos da frente 6B1

Onde em = emulsão; m1 = salsichão; m2 = bananas de 2 1/4" (57,15mm) ; AF = ALANFO; C emp = custo/m³ empolado; d = diâmetro médio; Ve = volume desmontado empolado; Rcc = razão de carregamento; m perf = metros perfurados; Custo Ac = custo dos acessórios; Custo perf = custo de perfuração; Custo expl. = custo de explosivos; I.M. = índice de matacos.

Fazendo os gráficos %emulsão x I.M. nas duas frentes, podemos ver que não é verificada qualquer relação entre a porcentagem de emulsão e o resultado de fragmentação. Já nos gráficos porcentagem de emulsão x custo de explosivos, verifica-se, é claro, um aumento do ítem custo de explosivos a medida que aumentamos a porcentagem de emulsão.

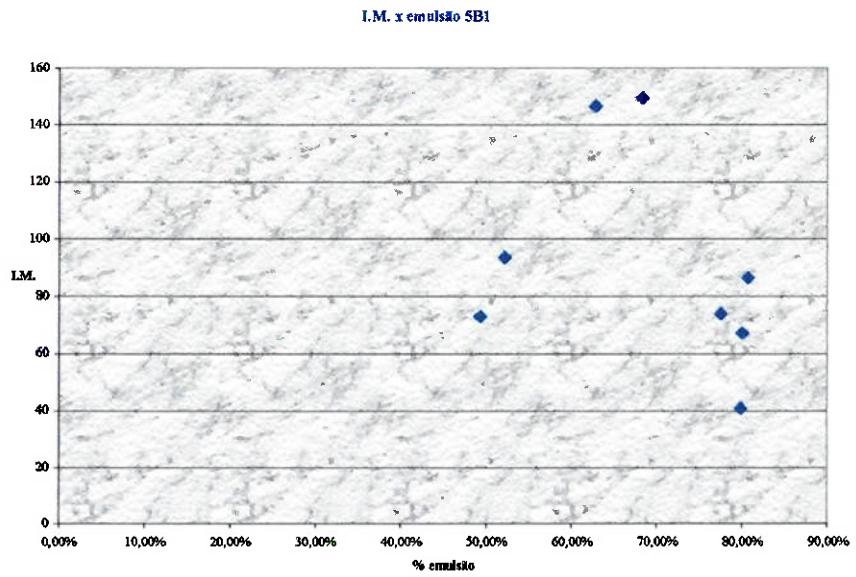


Figura 18 – gráfico I M x % emulsão (5B1)

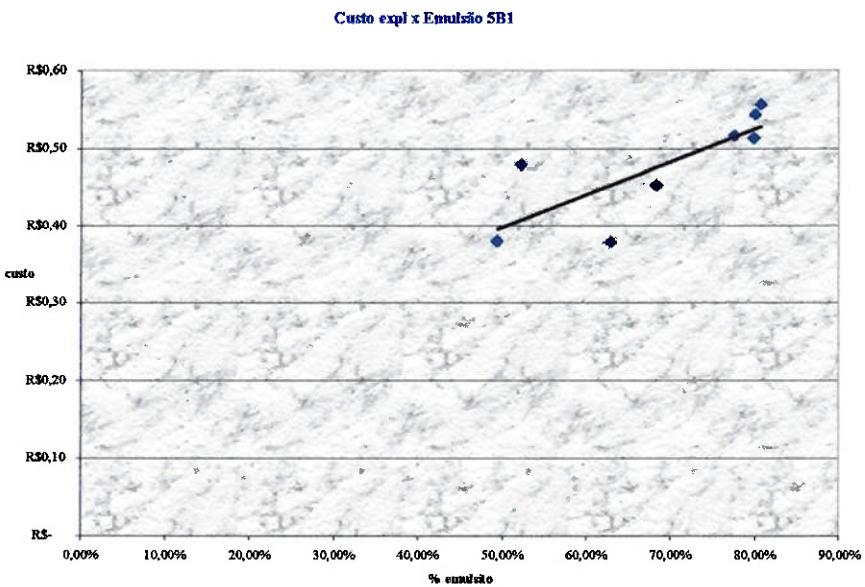


Figura 19 – gráfico custo x % emulsão (5B1)

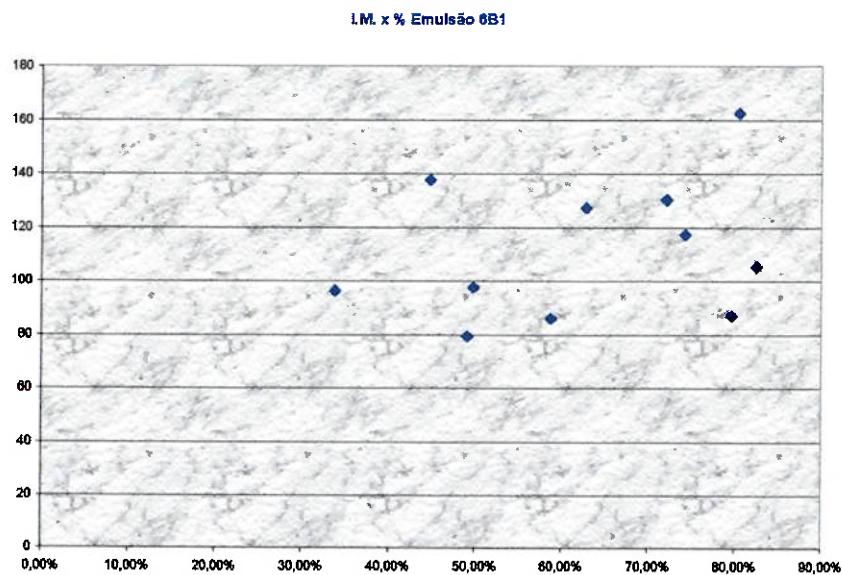


Figura 20 – gráfico I M x % emulsão (6B1)

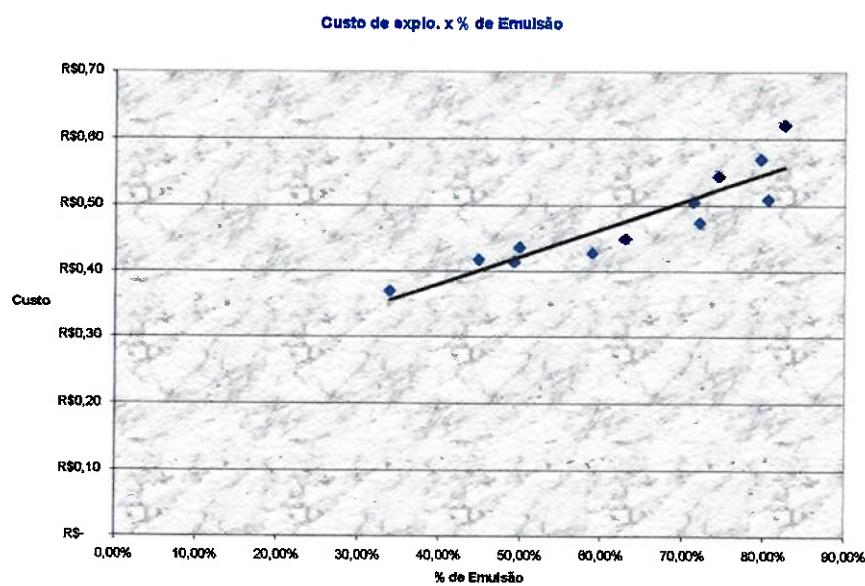


Figura 21 – gráfico custo x % emulsão (6B1)

Devido a um aumento progressivo que se fez na razão de carregamento dos fogos durante o período de pesquisa, que podem ter afetado os resultados, foi feito os mesmos gráficos, %emulsão x I.M., para fogos com faixas de razão de carregamento próximas, sem separar por frentes.

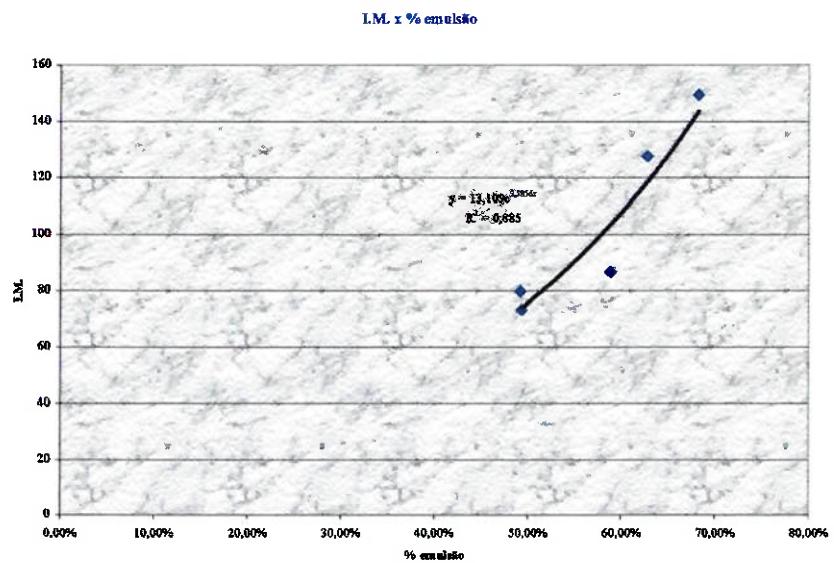


Figura 22 – razão entre 800g/m³ e 900g/m³

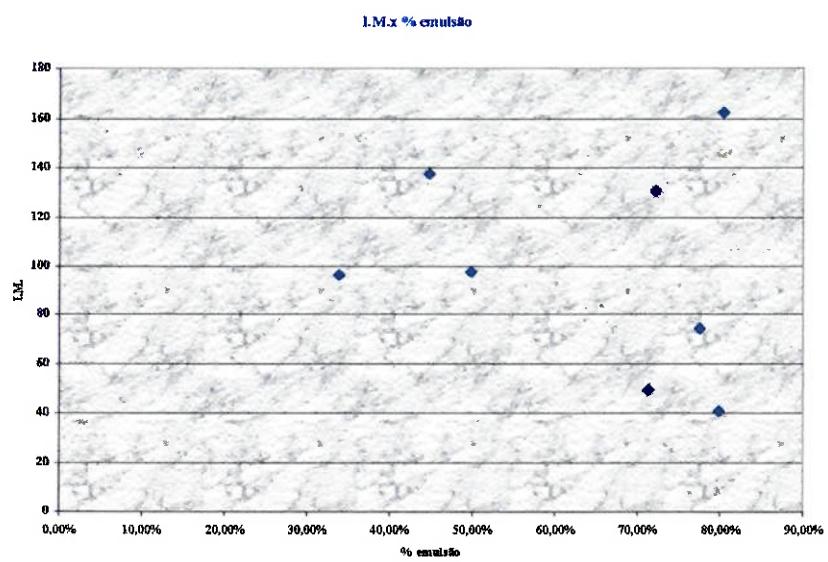


Figura 23 – razão entre 900g/m³ e 1000g/m³

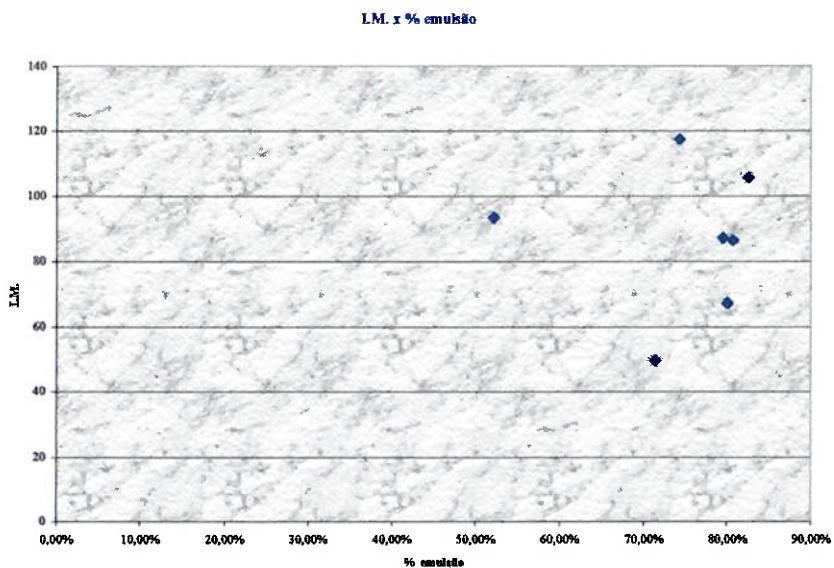


Figura 24 – razão maior que $1000\text{g}/\text{m}^3$

Verifica-se por esses gráficos que apenas na faixa de razão entre $800\text{g}/\text{cm}^3$ e $900\text{g}/\text{cm}^3$ há uma tendência de aumento do índice de mataço, ou seja uma pior fragmentação, conforme aumenta-se a porcentagem de emulsão do plano de fogo. É bom ressaltar que houve poucos fogos nessa faixa de razão, o que dificulta uma boa conclusão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como podemos ver nas fotos 3 e 4 em anexo, a pedreira Embu-Perus, apresenta um maciço muito fissurado. Vimos na teoria que maciços desse tipo fragmentam melhor com explosivos com maior Energia Gasosa, sendo portanto, no nosso caso, recomendado o uso na carga de coluna do ALANFO + “Salsichão”, pois na carga de fundo há sempre uma necessidade de uma maior Energia de Choque e maior velocidade de detonação, sendo recomendado o uso de emulsão.

A malha e todo o planejamento de fogo é feito com essas recomendações, só que quando há presença de muita água nos furos e seja impossível soprar sem que a água volte, a recomendação é de que se carregue o furo com emulsão na carga de coluna também.

Foi levantado e analisado a variação da quantidade de emulsão nos fogos e comparado com a fragmentação obtida, na esperança de se obter alguma relação. Não foi feito uma comparação de resultados levando-se em conta o lançamento e as condições de repé, pois todos os fogos tiveram esses resultados muito parecidos.

Devido a fortes chuvas, o uso de emulsão foi se tornando cada vez mais necessário, a ponto de se chegar a carregar fogos com cerca de 80% de emulsão.

Analizando dados e gráficos mostrados anteriormente pode-se ver que não houve, uma relação de fragmentação com a porcentagem de emulsão carregada, esperava-se que fogos com predominância de ALANFO + “Salsichão”, fragmentassem melhor do que fogos predominantemente carregados com emulsão.

O fato de não conseguir obter uma relação acima descrita, pode ser explicada pelo fato de que o resultado de um desmonte dependa de diversos parâmetros, e que possivelmente influenciaram mais nos resultados dos desmontes do que o tipo de explosivo usado, mostrando a dificuldade de se conseguir isolar um único parâmetro e descreve-lo.

O fato da razão de carregamento não ter se mantido constante durante a pesquisa deve ter atrapalhado na análise dos resultados, ela subiu durante o período de cerca de 850g/cm³ para cerca de 1000g/cm³. No entanto analisando os gráficos separados por faixas de razão de carregamento, vamos observar uma relação esperada teoricamente entre a quantidade de emulsão x fragmentação, nos fogos que têm razão de carga entre 800 e 900g/cm³, nesses fogos conforme a porcentagem de emulsão sobe a fragmentação do fogo piora. No entanto como tivemos poucos fogos dentro dessa faixa de razão de carga, podemos apenas levantar a hipótese de que quando trabalhamos com razões acima de 900g/cm³, o explosivo seja ele qual for fornece para nosso maciço a Energia Gasosa e Energia de Choque suficiente para a realização de um bom desmonte, ou seja temos sobra de energia. Quando baixamos de 900g/cm³, a emulsão, como não apresenta tanta Energia Gasosa quanto o ANFO, se torna menos eficiente que o nosso explosivo a base de ANFO, pois esse mesmo com uma razão menor ainda fornece a Energia Gasosa necessária para um bom resultado do fogo na pedreira. Seria recomendado que se continuasse esse estudo baixando a razão atual da pedreira para cerca de 850g/cm³, para poder levantar um maior número de dados e aí sim tirar conclusões mais concretas, além de um estudo sobre a influência do aumento do razão de carregamento no resultado de um desmonte.

Por fim, como ainda não se comprovou uma relação entre a porcentagem de um explosivo e seus efeitos no resultado do fogo, na pedreira Embu-Perus, ou seja, pode-se conseguir um bom resultado com um ou com outro explosivo, temos que analisar portanto o custo, e analisando os preços de explosivos vemos que não há dúvidas de que o explosivo a base de ANFO seria o melhor, só que temos o problema de muita água impossibilitando o uso de ANFO com uma certa frequência. É por isso que hoje, a pedreira Embu-Perus está estudando a possibilidade de se abandonar totalmente o uso de ANFO, pois isso dispensaria a estocagem de nitrato de amônio e do “Salsichão”, permitindo também um carregamento de fogo 100% mecanizado, o que seria uma grande vantagem em termos de segurança (ver fotos 5 e 6 em anexo).

BIBLIOGRAFIA

1. **JIMENO, C.L.; JIMENO, E.L.; CARCEDO, F.J.A.** : Drilling and Blasting of Rocks, Rotterdan, A.A.Balkena, 1995.
2. **CINTRA, B.H.** : O Processo de Detonação, arquivo fornecido pelo autor, 1998.
3. **SILVA, M.A.R.** Contribuição ao Estudo da Cominuição à Partir da Malha de Perfuração, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, 1995.
4. **E. I. Du Pont de Nemours & Co.** : Blasters'Handbook, 1969.
5. **Explo - Industrias Químicas e Explosivos S.A.**: Técnicas Básicas de Desmonte de Rocha, novembro 1979.
6. **UDY, L.L.**: Hard Rock Blasting - Soft Rock Blasting with Explosives to Use, outubro 1994.
7. **GREGORY, C.E.**: Explosives for North American Engineers, Trans Tech Publications, 1973.

ANEXOS

(inclui Exemplo de relatório de fogo e Fotos)



Foto 1 - visão geral da Pedreira Embu-Perus -



Foto 2 - visão geral de carregamento e perfuração -



Foto 3 - visão da parede da frente 6B1 muito fissurada -



Foto 4 - visão da parede muito fissurada da frente 5B1



Foto 5 - carregamento mecanizado de emulsão



Foto 6 - carregamento mecanizado de emulsão

EMBU S.A. ENGENHARIA E COMÉRCIO

Relatório de Fogo (cod : 57)

DATA : 04/11/98 HORA : 12:00:00 Praça : 6B1

CONCLUSÕES

Massa (Kg) gasta por tipo de explosivo

emuls = 1.843,00 (81,95%)

magl = 36,78 (1,64%)

mag 2 = 160,00 (7,11%)

ANFO = 209,05 (9,30%)

SOMA = 2.248,83

DIÂMETRO

Diâmetro médio (mm) = 85,74

VOLUMES

Compacto (m³) = 2.706,38

Empolado (m³) = 4.871,48

Em toneladas (t) = 7.307,21

EXPLOSIVO

Massa total de explosivo (Kg) = 2.248,83

Metros carregados totais (m) = 420,80

RAZÃO DE CARREGAMENTO

Compacta (g/m³) = 830,94

Empolada (g/m³) = 461,63

Em toneladas (g/t) = 307,76

Razão linear (Kg/m) = 5,34

FRAGMENTAÇÃO

Número de fogachos : 0

Fragmentação : 100,00%

QUANTIDADE DE FUROS

Parte 1	NORMAIS	CORTE	TOTAIS
Linha 1 :	16	0	16
Linha 2 :	15	1	16
Linha 3 :	15	1	16
TOTAIS	46	2	48

METRAGEM PERFURADA

Parte 1	NORMAIS	CORTE	TOTAIS
Linha 1 :	175,41	0,00	175,41
Linha 2 :	165,38	11,50	176,88
Linha 3 :	163,33	11,48	174,81
TOTAIS	504,12	22,98	527,10

EMBU S.A. ENGENHARIA E COMÉRCIO

Relatório de Fogo (cod : 57)

DATA : 04/11/98 HORA : 12:00:00 PRAÇA : 6B1

tempo : tempo bom / Brinquedo : leo / cabo de Fogo : guilherme / Apontador : guilherme

número de Linhas : 3 fogo não escalonado

Iniciação

Esquema de Ligação

Observações

Linha = 1 não escalonado - explosivos (Kg) * acessórios (unidades)

note	t(m)	A(kg)	E(m)	caixa	magn.	magn 2	armq	Expd 1	Expd 2	ca	ca 25	armq 0	D(m)
1	13,88	2,60	2,50	10,00	1,22	9,64	12,95	0,50	2,40	2,00	2,00	2,20	85,20
2	13,81	2,60	2,50	15,00	1,71	12,80	14,80	0,00	2,00	2,00	2,00	2,20	85,20
3	13,80	2,60	2,50	15,00	2,50	6,40	18,50	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,20
4	13,79	2,60	2,50	10,00	3,42	5,84	29,60	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,40
5	13,77	2,60	2,50	15,00	0,79	11,26	7,40	0,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,40
6	13,66	2,60	2,50	15,00	2,93	9,60	16,65	0,00	2,00	2,00	0,00	2,20	85,40
7	13,54	2,60	2,50	15,00	1,40	9,56	14,80	2,00	2,00	2,00	0,00	2,20	85,20
8	13,37	2,60	2,50	10,00	2,93	8,04	14,80	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,20
9	13,42	2,60	2,50	15,00	2,38	6,46	21,05	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,20
10	13,36	2,60	2,50	15,00	1,83	8,04	24,05	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,00
11	13,33	2,60	2,50	15,00	1,28	11,26	12,95	2,00	2,00	2,00	0,00	2,20	85,40
12	13,48	2,60	2,50	10,00	3,29	6,46	18,50	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,40
13	13,38	2,60	2,50	10,00	0,00	16,00	6,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,00
14	13,62	2,60	2,50	10,00	0,00	16,04	6,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	84,60
15	13,50	2,60	2,50	0,00	3,24	0,00	9,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,20	84,60
16	13,49	2,60	2,50	10,00	3,11	4,84	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	2,20	84,60

Linha = 2 não escalonado - explosivos (Kg) * acessórios (unidades)

note	t(m)	A(kg)	E(m)	caixa	magn 1	magn 2	armq	Expd 1	Expd 2	Expd 3	ca	ca 25	armq 0	D(m)
1	13,48	2,30	2,50	43,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,20	85,20
2	13,89	2,30	2,50	69,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,20	85,50
3	13,81	2,30	2,50	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,50
4	13,82	2,30	2,50	61,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,50
5	13,69	2,30	2,50	61,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,50
6	13,60	2,30	2,50	62,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,50
7	13,38	2,30	2,50	58,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,80
8	13,34	2,30	2,50	62,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	85,80
9	13,24	2,30	2,50	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	86,00
10	13,23	2,30	2,50	61,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	87,00
11	13,28	2,30	2,50	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	87,00
12	13,34	2,30	2,50	62,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	87,00
13	13,30	2,30	2,50	57,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	87,00
14	13,50	2,30	2,50	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	86,00
15	13,54	2,30	2,50	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	86,00
16	13,50	2,30	2,50	10,00	6,45	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	2,20	86,00

Linha = 3 não escalonado

- armazéns (kg) * acessórios (unidades)

note	t(m)	R(m)	S(m)	caixa	mag 1	mag 2	armq	armq 1	armq 2	ca	ca 25	armq 0	T(m)
1	13,51	2,30	2,50	53,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,26

CARGAS TOTAIS DE CADA PESO		
PESO	KG	Local
1.	33,77	L1P1
2.	41,31	L1P1
3.	42,40	L1P1
4.	49,42	L1P1
5.	34,39	L1P1
6.	41,38	L1P1
7.	40,60	L1P1
8.	35,13	L1P1
9.	47,83	L1P1
10.	48,88	L1P1
11.	40,43	L1P1
12.	38,19	L1P1
13.	26,00	L1P1
14.	26,00	L1P1
15.	17,91	L1P1
16.	33,90	L1P1
17.	63,00	L1P1
18.	60,00	L1P1
19.	61,00	L1P1
20.	60,00	L1P1
21.	60,00	L1P1
22.	63,00	L1P1
23.	57,00	L1P1
24.	4,80	L1P1
25.	60,00	L1P1
26.	61,00	L1P1
27.	53,00	L1P1
28.	61,00	L1P1
29.	60,00	L1P1
30.	56,00	L1P1
31.	61,00	L1P1
32.	14,45	L1P1
33.	61,00	L1P1
34.	53,00	L1P1
35.	61,00	L1P1
36.	59,60	L1P1
37.	45,00	L1P1
38.	23,54	L1P1