

# Comentários sobre o Desmonte de Rochas com Explosivos

## Processo de fragmentação da rocha (Parte 02 de 03)

Por Bruno Pimentel.

Olá meus amigos, espero que todos estejam bem e com boas expectativas para o mês que se inicia, assim que como sempre deixamos aqui os links para que possa verificar os nossos artigos anteriores, assim como se registrar, para que sejam notificados automaticamente a cada novo artigo que publicamos. Mas antes disso, apenas reforçando o que falamos no início do nosso artigo passado, devido a outras demandas, estaremos realizando as nossas publicações mensalmente.

Português

<https://www.linkedin.com/newsletters/desmonte-de-rocha-c-explosivo-6941709482355748864/>

English

<https://www.linkedin.com/newsletters/rock-blasting-6959820770344595456/>

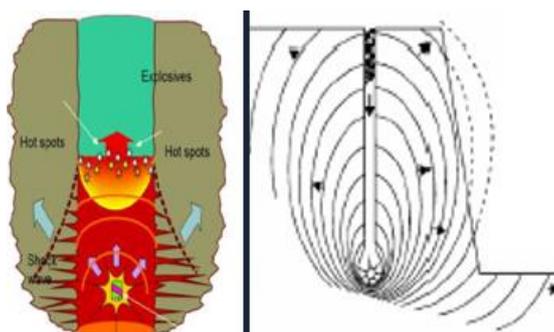
No artigo de hoje detalharemos um pouco mais as quatro fases principais do processo de fragmentação que mencionamos no artigo passado, para que possamos ter um melhor entendimento do que ocorre em cada fase e de como elas interagem entre si.

### **FASE 01 – EFEITOS IMEDIADOS DA DETONAÇÃO => ONDA DE CHOQUE**

Quando o explosivo detona, ele gera uma onda de choque, que causa um impacto direto na rocha, esse impacto é causado pela rápida transformação dos explosivos em gases, liberando uma grande quantidade de energia, em forma de pressão e calor.

No nosso caso, quando falamos de desmonte de rochas, esse impacto será causado diretamente na rocha que está nas paredes internas do furo, que é a parte que está em contato direto com o explosivo.

Quando a onda de choque impacta as paredes do furo, elas provocam uma força de compressão, fazendo com que a parede do furo se estenda, ou seja, provoca uma deformação elástica na rocha, e até o ponto que a intensidade dessa onda supere a resistência a compressão da rocha, e quando isso ocorre, ela causa uma trituração da rocha.



A extensão desse primeiro impacto da energia do explosivo sobre a rocha vai depender de uma série de fatores, iniciando pelas propriedades da rocha, que vão desde sua resistência a compressão, até as suas características físicas nas áreas próximas ao furo.

Outro fator determinante são as características do explosivo, sua pressão de detonação, assim como a velocidade da reação de detonação, que vão influenciar diretamente na intensidade do impacto gerado.

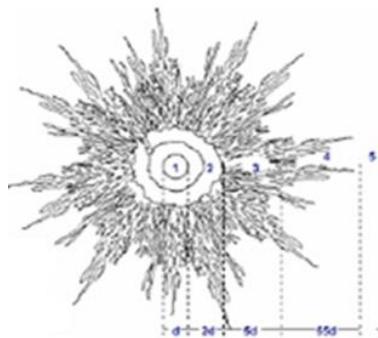
Também teremos influências das configurações da nossa detonação, principalmente do grau de contato entre o explosivo com a parte do furo, que normalmente relacionamos ao fator de acoplamento da carga explosiva, do confinamento, e da presença de contaminantes no explosivo, e entre o explosivo e a parede do furo, como água, detritos e outros. E aqui vemos a importância do controle de qualidade, tanto no que se refere a qualidade do explosivo utilizado, quanto com relação as condições da aplicação desse explosivo na nossa detonação.

Ainda, quando analisamos essa fase 01 do processo de fragmentação, considerasse que podemos ter 3 etapas principais de fragmentação, causadas por esse impacto inicial da detonação sobre a rocha que está nas paredes circundando o explosivo:

1 - A primeira etapa, se refere a parcela de rocha que está extremamente próxima ao explosivo, normalmente considerando até a distância de 1 a 2 vezes o diâmetro do furo, e que seria a etapa de pulverização, onde a rocha sofre um impacto tão intenso que ela é completamente triturada, sendo essa a principal parcela de finos gerados pela detonação.

2 - Depois teríamos a segunda etapa, que normalmente compreende a rocha que está distante de duas à cinco vezes o diâmetro do furo, onde teríamos a zona de geração intensa de fissuras, que seria responsável pela geração de finos e de fragmentos pequenos.

3 - Por fim, temos a terceira etapa, que é exercida sobre a rocha que está a uma distância superior a 5 vezes o diâmetro do furo, até a região que for impactada pela força residual dessa onda de choque inicial da reação do explosivo, que ocorre no que chamamos de zona de deformação elástica.



Nessa zona de deformação elástica, a onda de choque inicial já não tem força para exercer uma fragmentação consistente na rocha, assim que o seu efeito nessa zona corre o risco de ser mais prejudicial do que benéfico, pois ela pode simplesmente comprometer a estabilidade das formações geológicas da rocha, expandindo essas estruturas, ou simplesmente abrir fraturas maiores, que vão causar uma maior dissipação dos gases, diminuindo assim a pressão gerada por eles no momento da sua expansão.

Por isso, que idealmente queremos que as duas primeiras etapas sejam mais intensas, principalmente em rochas duras, enquanto que a terceira etapa ela seja reduzida, para que

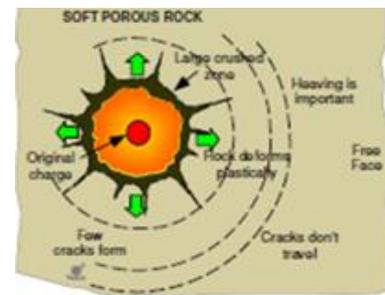
não comprometa o trabalho da expansão gasosa que virá em seguida a essa primeira fase do processo.

Uma primeira observação que precisamos fazer sobre esse processo, é que se tivéssemos uma rocha perfeitamente homogênea, as fraturas radiais seriam criadas uniformemente em todas as direções, mas isso não ocorre devido a dinâmica das propriedades da rocha.

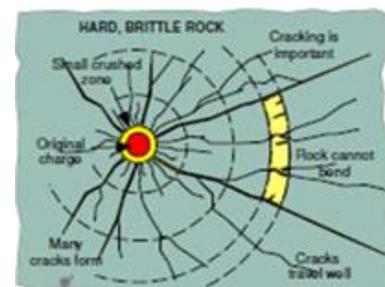
Uma outra característica da rocha que interfere nesse processo é a sua dureza, principalmente a sua resistência a compressão, assim que em rochas duras a primeira etapa, que é a zona de trituração da rocha ela tende a ser menor, mas ela tem uma zona de fissuramento maior, devido a sua menor elasticidade, assim que a maior parte da parcela dessa energia inicial, é utilizada para criar e estender as fissuras radiais.

Já em rochas brandas e porosas, que tem baixa resistência a compressão, teremos um grande trituraamento ao redor das paredes dos furos, enquanto que teremos uma menor geração de fissuras em seguida, devido a maior elasticidade da rocha, o que faz com que grande parte dessa energia inicial seja gasta para deformar e alargar as paredes do furo.

Aqui ao lado temos uma figura que ilustra bem isso, onde na parte de cima vemos uma rocha branda, que sofre um grande alargamento das paredes do furo, devido a sua maior elasticidade, enquanto que na parte de baixo vemos uma rocha dura, que sofre muitas fraturas radiais, que vão ser muito intensas próximas ao furo e vão diminuindo à medida que se afastam dele.



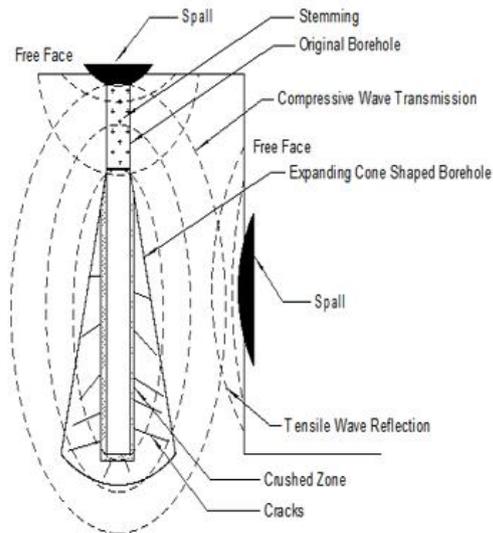
Mais na frente veremos, que nas rochas duras os gases gerados vão penetrar nessas fraturas, e em qualquer outra descontinuidade que tenha presente na rocha, e vão forçar para que essas fraturas se estendam, aumentando o nível de fragmentação. Assim que quanto maior for a quantidade de fraturas geradas inicialmente, maior será o nível de fragmentação final gerado nesse processo, influenciando principalmente a parcela de fragmentos intermediários do nosso material.



A primeira zona de fragmentação, da região que circunda o furo, é a responsável pela maioria do material fino produzindo pela detonação, mas ela representa uma parcela muito pequena da rocha, por isso quando o objetivo da fragmentação é buscar uma maior quantidade de finos, é necessário maximizar ao máximo essa zona durante a detonação, buscando explosivos que gerem uma onda de choque inicial maior, e também utilizando uma quantidade maior de furos.

Consideramos que a primeira fase termina, quando essa onda de choque inicial perde a sua intensidade, até valores menores do que o limite elástico de deformação da rocha, ou seja, menores do que a sua resistência a compressão, pois assim essa onda já não consegue mais fragmentar a rocha.

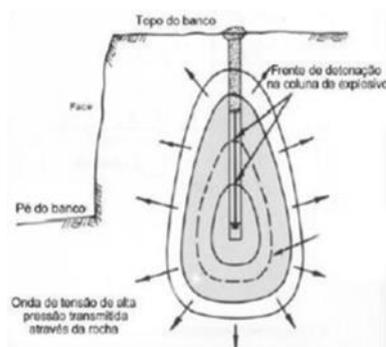
Mesmo sem conseguir fragmentar a onda de choque continuar a percorrer a rocha, e quando encontra alguma fratura ou descontinuidade, ela criar tensões tangenciais que podem criar novas fissuras.



Quando a onda de choque chega a face livre, ela é refletida nessa superfície, retornando para o interior da rocha, e agora fazendo um esforço contrario de pressão, frente as ondas que seguem comprimindo a rocha, ela gera forças de tração e cisalhamento na rocha, que normalmente tem uma resistência a esse tipo de esforço bem menor, e assim começamos a nossa segunda fase do processo de fragmentação.

## **FASE 02 – PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CHOQUE NA ROCHA**

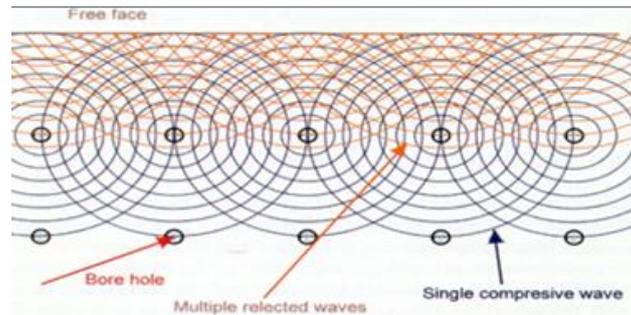
Considera-se que o início da segunda fase se dá com a propagação da onda de choque ao longo da rocha, que agora já não supera a resistência a compressão da rocha, mas segue comprimindo ela até encontrar a face livre, onde temos uma interface terra-ar, e assim ela é refletida nessa superfície retornando na direção contraria, o que faz com que ela crie uma pressão oposta, gerando um esforço de tração, que criar fissuras a medida que passa, e ainda alargando os planos de debilidade naturais da rocha.



Isso acontece, porque a resistência a tração da rocha é muito menor do que a sua resistência a compressão, assim que a onda que não tinha força para romper a rocha por compressão, ao ser refletida, consegue voltar rompendo a rocha novamente por um esforço de tração.

Como vemos aqui na ilustração abaixo, as ondas azuis representam as ondas de choque saindo do furo, e que causam o esforço de compressão, mas a medida que elas são refletidas na face

livre, que aqui temos elas em vermelho, elas volta se opondo as ondas de compressão, causando assim um esforço de tração que é capaz de seguir fragmentando a rocha.

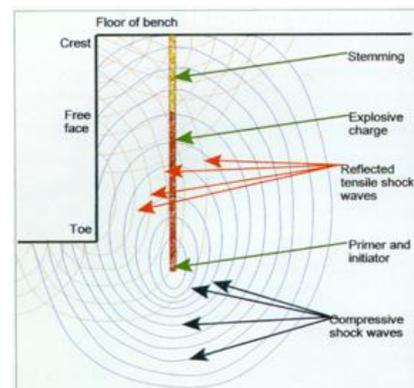


Normalmente se considera que nessa segunda fase nós temos o maior percentual de fraturamento da rocha, e que juntamente com o esforço gerado pela expansão dos gases, são responsáveis pela maior parcela de fragmentação da rocha.

Por isso, sempre falamos na importância da face livre e da geração de alívio ao longo da detonação, pois eles são responsáveis pela reflexão das ondas que atuam na maior parcela de fragmentação da nossa rocha, e isso ocorre com todo tipo de detonação, tanto em open pit ou underground.

Essa segunda fase, é baseada principalmente na teoria de reflexão das ondas, que foi uma das primeiras teorias propostas, para explicar como a rocha se quebra quando detonamos um furo próximo a uma face livre.

Essa teoria indica que à medida que as ondas de compressão se propagam elas vão perdendo forças, e assim precisam de uma face livre para que elas possam ser refletidas de volta, e assim consigam gerar um esforço contrário as ondas de compressão, tracionando a rocha e dando continuidade ao processo de fragmentação.



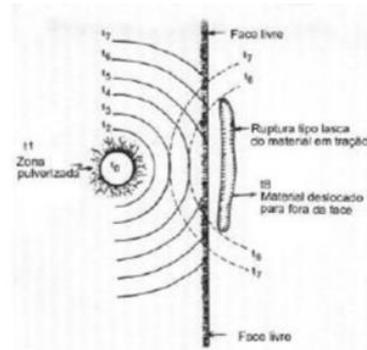
Considerasse que de forma aproximada a resistência a tração das rochas é de 10 a 15 vezes menor do que a sua resistência a compressão, e por isso o esforço gerado pelas ondas refletidas, conseguem provocar um fraturamento muito mais intenso do que o gerado pelas ondas inicialmente.

Um outro detalhe importante é a velocidade de detonação dos explosivos, pois quando maior essa velocidade, mais intensa e mais rápidas são as ondas, e assim elas se propagam e se refletem de forma mais intensa, aumentando a interação entre as diversas ondas, o que faz com que tenhamos um aumento da fragmentação nessa segunda fase do processo.

Além do processo de interação entra as ondas, temos um outro fenômeno que ocorre durante a reflexão das ondas na face livre, que é justamente causado pelo resultado das ondas refletidas e refratadas na face livre, que chamamos de descascamento da face ou "spalling".

Como vemos aqui nas nossas ilustrações, à medida que as ondas de choque encontram a face livre, gerasse uma tensão nesse ponto, que justamente é a ação entre a reflexão e a refração das ondas, causando o deslocamento de parcelas da rocha.

Esse fenômeno é ainda mais intenso quando temos um afastamento menor que o ideal e razão de carga mais alta, pois teremos um grande acumulo de ondas, com maiores intensidades, na interface rocha-ar.

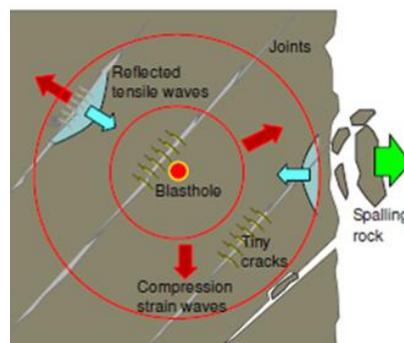


Assim que percebemos que o afastamento também tem um papel fundamental no processo de fragmentação, e por isso ele precisa ser bem dimensionado, pois quando temos um afastamento menor do que o ideal, podemos ter duas situações que vão interferir no processo de fragmentação, onde a primeira é que com um afastamento muito pequeno as próprias ondas de compressão podem ter força excedente para já iniciar a movimentação da rocha, sem que tenha finalizado o processo de fragmentação, e segundo, que o processo de deslocamento, ou “spalling”, aumenta consideravelmente, principalmente em rochas mais fraturadas, ou que tenham danos na face livre.

Quando temos o caso inverso, com um afastamento muito maior que o ideal, as ondas de choque vão ter que percorrer um longo caminho até encontrar a face livre, perdendo intensidade, e assim quando são refletidas, terão uma força muito baixa, diminuindo a fragmentação.

Por isso, podemos dizer que o afastamento ideal, vai impedir que a rocha seja movimentada antes do tempo, diminuir o efeito de “spalling”, e fazer com que as ondas reflitam, assim que elas terminarem o seu efeito de rompimento por compressão, retornando da forma mais intensa possível, como ondas de tração.

Outra observação importante, é que durante a propagação das ondas de choque na rocha, elas podem encontrar descontinuidades e estruturas abertas na rocha, que vão agir como uma pequena face livre, e assim parte das ondas serão refletidas e refratadas nessa superfície, e ainda que com menor intensidade, esse feito também vai gerar ondas de tração, que neste caso, vão principalmente alargar essas estruturas, abrindo-as de uma forma mais intensa.



Isso tem dois lados, no primeiro, contribuir para a aplicação das fraturas e criação de novas fraturas, ajudando no processo de fragmentação, mas por outro lado, se essas fraturas forem muito representativas e com grandes extensões, muitas ondas serão refletidas nelas, abrindo-as, e isso pode fazer com que os gases, que estão começando penetrar nas fraturas encontrem saídas da rocha, perdendo intensidade.

Por isso que quando olhamos a reflexão das ondas, um dos fatores mais importantes é a presença de “faces livres”, pois elas vão interferir diretamente no resultado final do processo de fragmentação da rocha. Assim que boa parte da nossa fragmentação será determinada em função da quantidade de “face livre existentes”, da sua natureza, orientação, distancia da carga explosiva, e das suas diversas propriedades.

Precisamos entender que as “faces livres”, ou as interfaces existentes na rocha, vão determinar a direção e a interação entre as ondas, podendo contribuir de uma forma significativa para o processo, ou dificultar o processo, dependendo das suas características. Assim que por isso, o processo de fragmentação de rochas com um intenso fraturamento é muito mais complexo, porque as diversas descontinuidades vão interferir na interação entre as ondas, e ainda vão contribuir para a disseminação e perda de intensidade da expansão gasosa.

### **FASE 03 – EXPANSÃO DOS GASES DA DETONAÇÃO**

Quando o explosivo detona, além de liberar a onda de choque, ele inicia em conjunto, a decomposição dos seus componentes, e a sua transformação em uma grande quantidade de gases, assim que temos praticamente em simultâneo com as fases anteriores, o início da fase 3, onde o seu efeito sobre a rocha, ocorre com um retardo de alguns milissegundos com relação as fases anteriores, mas na sua continuidade ocorrem de forma complementar.

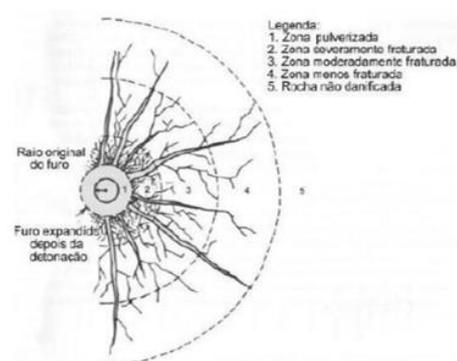
Na fase 3, os gases em expansão penetram nas fissuras criadas pelas ondas de choque, ampliando essas fissuras, e criando novas fissuras, produzindo assim a fragmentação efetiva da rocha.

Esse processo, apesar de ocorrer em sequência, sua ação é simultânea, pois enquanto as fraturas estão sendo criadas, os gases já estão expandindo e penetrando nessas fraturas, alargando-as e criando novas fraturas, o que faz com que ação das ondas de choque e a expansão dos gases, sejam os principais responsáveis pela determinação da fragmentação final da rocha.

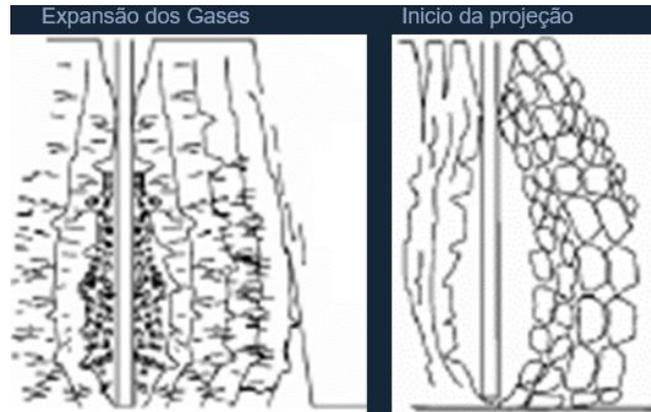
Durante esse processo, os gases seguem expandindo, aumentando a pressão gerada por essa expansão, forçando a rocha em direção a face livre, até que eles atingem sua expansão máxima, e assim causando uma grande flexão na rocha, e ao superar o seu limite, os gases rompem a rocha por completo, e são dispersos na atmosfera.

Um ponto de atenção nessa terceira fase, é que existe muita contestação e conflito entre os diversos conceitos e teorias propostas, principalmente ao que se refere ao processo de fragmentação durante essa fase.

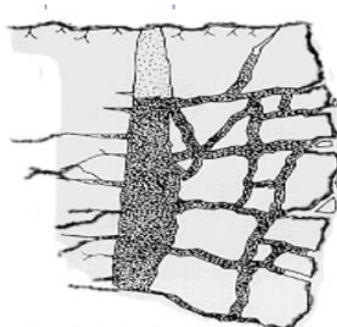
Algumas teorias vão indicar que a rede de fraturas já foi toda criada pelas interações das ondas de choque, e que os gases apenas vão fazer o alargamento dessas fraturas e o lançamento do material. Já no lado oposto, temos aqueles que indicam que as ondas de choque apenas tritura a rocha ao redor do furo, e geram apenas algumas debilidades na rocha a medida que passa, assim seria os gases o responsável por realizar a intensa fragmentação da rocha, e esse processo iniciaria de forma efetiva nessa terceira fase. Mas eliminando-se esses dois extremos, ainda que haja muita divergência de como ocorre e do que realmente ocorre nessa terceira



fase, a maioria das teorias vão indicar um processo complementar entre a ação das ondas de choque e a expansão de gases, sendo esses dois os principais responsáveis pela geração da fragmentação da rocha.



Seguindo esse raciocínio, temos que o efeito causado pelos gases na rocha, é gerado pela pressão que os gases exercem nas paredes do furo durante a detonação dos explosivos, e essa pressão gerada pelos gases estará relacionada com o volume total de gases e o grande aumento da temperatura desses gases.



Um ponto importante a se ter em mente, é que a pressão gerada pelos gases na rocha, não é a mesma pressão gerada pela onda de choque do explosivo, pois a pressão dos explosivos gera um pico pontual, enquanto que a pressão dos gases é contínua, durante a sua expansão, aumentando sua intensidade, até que rompa a rocha ou encontre um ponto de escape. Essa pressão gerada pelos gases, terá uma intensidade menor, que o pico gerado pela onda do choque, mas ainda tem um efeito fundamental sobre o processo de fragmentação da rocha.

Normalmente chamamos a pressão da onda de choque, de pressão de detonação, enquanto que a pressão causada pela expansão dos gases, chamamos de pressão de explosão ou pressão no furo.

É importante termos em mente, que tudo isso ocorre num intervalo de tempo muito curto, e se os parâmetros do nosso blast plan estiverem corretamente dimensionados, e forem bem executados, os gases além de trabalharem junto com as ondas de choque na fragmentação da rocha, vão expandir ao ponto de romperem a rocha, após o seu intenso fraturamento, lançando ela em direção a face livre

De forma resumida, para entendermos o processo de ação dos gases, podemos seguir os seguintes passos:

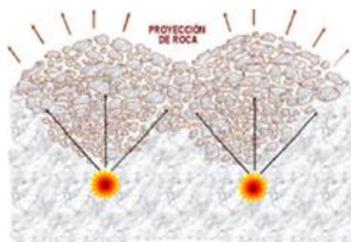
- Primeiramente, quando o explosivo inicia a sua detonação, o volume do furo que estava preenchido por explosivo, será rapidamente preenchido por um grande volume de gases, em grande expansão e em uma altíssima temperatura.
- Assim que os gases preenchem completamente o furo, eles continuam expandindo, preenchendo as fissuras, que foram criadas pela onda de choque, e ao continuar expandindo, eles geram pressão abrindo mais essas fissuras e gerando novas fissuras.
- À medida que os gases seguem expandindo, eles exercem uma pressão muito grande na rocha, na parede do furo e das fissuras, fazendo com que toda a rocha se flexione, se expanda, e assim seja lançada em direção a face livre, como podemos ver o exemplo desse momento, na foto aqui no canto inferior direito.
- Durante esse movimento da rocha, as diferentes pressões sofridas em cada ponto, a diferença de movimento da rocha e de velocidade, faz com que ela sofra um cisalhamento em alguns pontos, o que também contribui com uma pequena parcela de fragmentação nesse momento.
- Por fim, à medida que os fragmentos de rocha são lançados, eles colidem no ar, e também colidem ao caírem no chão, sendo essa a ultima fase do nosso processo de fragmentação.



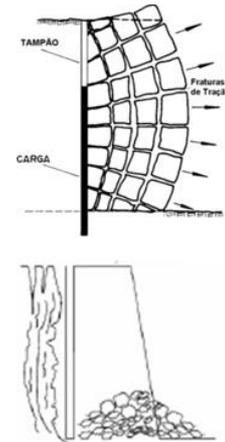
#### **FASE 04 – DESLOCAMENTO DO MATERIAL**

Na fase final do processo de fragmentação, a maior parcela de fragmentação da rocha já terá sido definida, e nesse momento, temos a atuação final dos gases, rompendo a rocha e lançando ela em direção a face livre.

Na fase 4, se o afastamento estiver corretamente calculado, as ondas de choque já criaram o máximo de fissuras possíveis, os gases já expandiram essas fissuras e flexionaram a rocha ao máximo, até o ponto que a massa rochosa rompe, e nesse momento, temos o uso da força residual dos gases para movimentar a rocha para frente, até que os gases se dispersão, e os fragmentos de rocha vão cair devido a força da gravidade.



Durante esse processo, o complemento da fragmentação se dá de três formas, onde primeiramente a diferença de pressão em cada ponto da rocha e a diferença do momento de rompimento entre os diversos pontos, faz com que se gere um cisalhamento entre as diversas porções da rocha, aumentando a sua fragmentação. Depois a medida que são lançados, os fragmentos se colidem ainda no ar, provocando mais uma parcela de fragmentação, e por fim, ao caírem, os fragmentos colidem com o solo e com os demais, e assim finalizamos o processo de fragmentação na fase 4, que realmente representa uma pequena parcela, e tem um efeito maior sobre os fragmentos de tamanho maior.



Praticamente essa é a única etapa que ocorre sozinha, e ela inicia depois que as outras finalizam, apesar de que, se tivermos pontos de debilidade na rocha, possa ser que parte dela já entre nesta fase, enquanto que outras partes ainda estarão sofrendo o efeito das fases anteriores, mas quando temos um bom desenvolvimento do processo, ela iniciará com a finalização das etapas anteriores do processo.

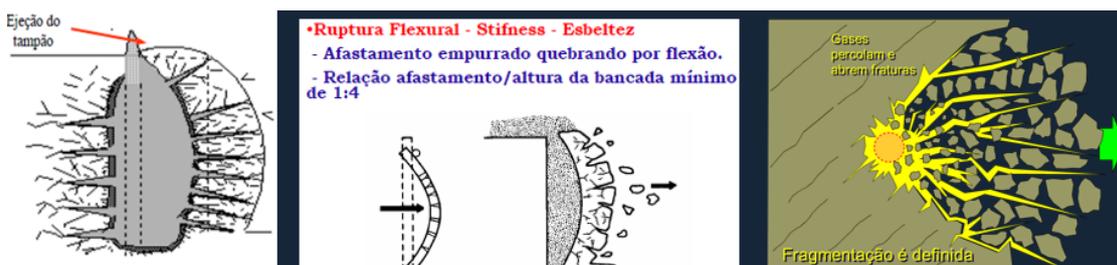
Um ponto importante, é que é o grau de confinamento do explosivo, dentro do furo, quem vai definir o tempo das outras etapas, até chegarmos nessa etapa final. Assim que, quanto mais os gases ficarem confinados dentro da rocha, mas eles atuarão nas etapas anteriores, aumentando a pressão e o grau de fragmentação sobre a rocha, antes dele iniciar o processo de rompimento e lançamento do material, em direção a face livre.

Aqui os parâmetros do plano de fogo tem um efeito fundamental, principalmente o tampão, a configuração de carga e o afastamento, pois são os que vão interferir mais no confinamento, durante o processo de detonação.

À medida que os gases escapam, eles começam a projetar os fragmentos que estão em contato com eles, e que já estão soltos, diminuindo assim a pressão exercida sobre o resto da massa rochosa.

Quando os gases encontram um ponto de fuga, temos dois efeitos contrários, primeiro o risco de lançarmos de fragmentos soltos, a grandes distancias, devido a maior pressão dos gases, e assim temos o risco de eventos de flyrocks, ou o escape dos gases, vai causar a diminuição da pressão exercida sobre a rocha, diminuindo o efeito sobre a fragmentação e sobre o lançamento do material.

Assim, para que todas as fases atuem de forma a entregar o melhor resultado, é necessário que os parâmetros do plano de fogo estejam bem dimensionados, e que a rocha, seja o mais compacta possível, sem pontos de fraqueza, que venha interferir durante o processo.



Pois é isso pessoal, é importante entendermos cada processo e a interrelação que eles tem entre sim, mas por hoje vamos parando por aqui e no nosso próximo artigo seguiremos comentando sobre os principais pontos que podem impactar no processo de fragmentação e assim no resultado final do nosso desmonte.

Como sempre, pedimos que por favor comentem e compartilhem, para que tenhamos detonações cada vez mais seguras e de qualidade!!!

A Blasting Treinamentos deseja ajudar você a moldar o mundo com segurança e qualidade.

**Cursos de Desmonte de Rochas com Explosivos:**

Português -> <https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/curso-completo-de-desmonte-de-rochas-com-explosivo-2022/B61107994S>

English -> <https://hotmart.com/en/marketplace/products/blastingtraining/U66086910H>

[www.blastingtreinamentos.com](http://www.blastingtreinamentos.com)

[blastingtreinamentos@gmail.com](mailto:blastingtreinamentos@gmail.com)