ESCAVAÇÕES EM ROCHA A CÉU ABERTO

Para mais apostilas, acesse:
WWW.MEIACOLHER.COM

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUÇÃO	5
CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS	7
- Classificação do DNER	7
- Classificação com o índice RQD	8
COMPARTIMENTAÇÃO DO MACIÇO	10
- Diagramas de Projeção esférica	10
ESCAVAÇÃO MECANIZADA	13
ESCAVAÇÃO COM O USO DO EXPLOSIVO	15
- Introdução	15
- Fatores determinantes do desmonte	16
- Equipamento disponível	17
- Altura da bancada	23
- Equipamento de furação	23
- Inclinação dos furos	27
- Geologia do maciço	29

- Geometria do projeto de escavação 29

TIPOS DE EXPLOSIVOS 30
- Introdução 30
- Características 31
- Utilização da energia 32
- Tipos de explosivos 33
- Acessórios iniciadores 35

MALHA DE FURAÇÃO E RAZÃO DE CARGA 39
- Determinação empírica 39
- Determinação analítica 41
- cálculo dos parametros de desmonte 50
- Seqüência de detonação 53
- Resultados do desmonte 54
  - Efeitos desejados 54
  - Efeitos indesejados 55

FOGO CONTROLADO DO CONTORNO 60

RETIRADA DO ENTULHO 62

ESCAVAÇÕES EM ROCHA

Parte 1 - ESCAVAÇÕES A CÉU ABERTO

- INTRODUÇÃO

A técnica do desmonte de rocha progrediu muito rapidamente, devido ao contínuo aumento do vulto das obras, passando da fase empírica do "cabo de fogo" a um alto nível de engenharia aplicada. A intervenção do engenheiro e do geólogo em fase de projeto é de importância fundamental para determinar o grau de fraturamento e de alteração da rocha e as suas características geológicas, fatores determinantes sobre a qualidade e a economia do desmonte. Alguns parâmetros do maciço são indispensáveis para definir o tipo de desmonte (mecanizado ou a fogo) e para o seu correto dimensionamento. Os métodos de escavação a céu aberto ou em

subterrâneo são processos empregados para fragmentar e remover rocha com duas diferentes finalidades:

- Lavra de minerais
- Abertura de espaços

A lavra de minerais envolve grandes volumes por tempo longo, tendo menor importância a qualidade da rocha remanescente. A abertura de espaços envolve escavações menores em tempo menor. Neste último caso, objeto das presentes apostilas, a qualidade da rocha remanescente é de importância fundamental. Como exemplo citamos a escavação de centrais hidroelétricas, cortes e túneis de rodovias, ferrovias e metrôs, garagens subterrâneas, reservatórios de água, eclusas e canais de navegação, fundações, aprofundamento de portos e inúmeras outras obras civis. Para todas as finalidades (obras civis + minerações) utiliza-se no Brasil uma média anual de 50 a 70 mil toneladas de explosivo, correspondendo aproximadamente a um desmonte de 50 -70 milhões de m^3 de rocha, a um custo médio total de 3,5 a 7 bilhões de Reais ou 1 a 2 bilhões de US dólares (janeiro 2003).

Entre as maiores escavações civis já realizadas citamos:

- Usina Hidroelétrica de Itaipu, com 34,7 milhões de m^3 em basalto, taludes de até 80 m de altura, 1 km de túneis e 400 m de poços de pesquisas
- Usina Hidroelétrica de Estreito, com 7 milhões de m^3 em meta-arenito, taludes de até 60 m de altura (4 milhões escarificados e 3 milhões a fogo)
- Usina Hidroelétrica de Paulo Afonso IV, com Casa de Força subterrânea em granito num volume de 230 mil m^3, 54 m de altura, 222 m de comprimento, 25 m de largura, total de escavações 510 mil m^3

- Ferrovia Roca Sales - Passo Fundo, com um total de 38 túneis em basalto com comprimento total de aproximadamente 30 km, o maior dos quais com 2 km de extensão.
- Ferrovia do Aço, com um total de cerca de 100 túneis em metassedimentos, migmatito e gnaisse, com aproximadamente 50 km de túneis, o maior dos quais com 8 km de extensão.
- Túnel reservatório de água potável Santos - São Vicente, o maior do mundo em seu gênero, em gnaisse granítico, com 1,2 km de comprimento e 250 m^2 de área.

CLASSIFICAÇÕES DOS MACIÇOS

Indicamos a seguir as classificações dos maciços rochosos a céu aberto mais comunemente usadas no Brasil.

– Classificação do DNER

A classificação mais simples dos maciços é de acordo com a definição do DNER (ex-Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), pela qual existem diversas categorias de material que requerem diferentes tipos de escavação:

Material de primeira categoria. Este material é composto de solo, alteração de rocha, aluviões e coluviões, materiais heterogêneos com blocos de até 1 m^3 e pode ser removido diretamente por equipamentos de escavação de porte variável (Escavação comum).

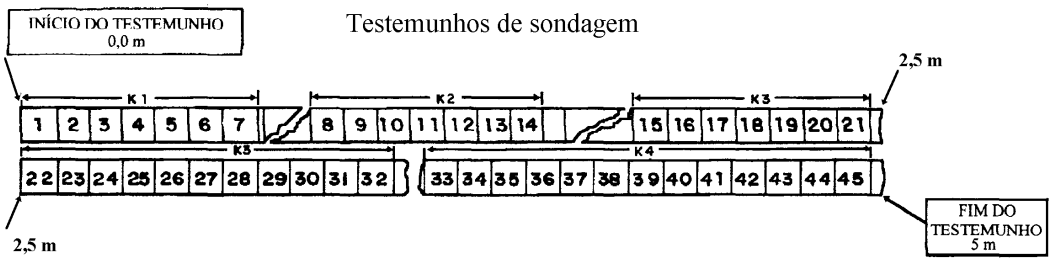
Material de segunda categoria. Este material é composto de rochas mais ou menos rígidas, estratificadas, de diferentes graus de alteração, que devem ser desmontadas e desagregadas por equipamentos de diversos portes (tratores com escarificadores, rompedores, etc.) ou mesmo com emprego descontínuo de explosivos de baixa potência para posterior carregamento e remoção (Escavação de rocha por desagregação).

Material de terceira categoria. Este material é composto de rocha sã ou pouco alterada que não pode ser escavada por os dois métodos anteriores (Escavação de rocha por explosivos).

– Classificação com o índice RQD

A mais simples classificação, utilizada especialmente a céu aberto, e proposta pelo geólogo americano Don Deere, amplamente utilizada em todo o mundo, é o índice RQD (Rock Quality Designation), aplicável a testemunhos de sondagem.

L.Redaelli



Cada algarismo representa 10cm

EXEMPLO:

ACIMA ESTÃO REPRESENTADOS OS TESTEMUNHOS EM SUA CAIXA. AS FRATURAS ESTÃO MARCADOS EM TRAÇO DUPLO
O COMPRIMETO DO TESTEMUNHO A SER MEDIDO É (K_1, K_2, K_3, K_4)
ISTO DA:

Lc = 5,00 m

Le = $K_1 + K_2 + K_3 + K_4$ = 4,5 m

(SOMA DE TODOS OS CORPOS DE PROVA POSSIVEIS : 1 a 45)

$$RQD = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + K_4}{L_c} = \frac{4,5}{5,0} = 0,90$$

RQD	QUALIDADE DA ROCHA
0 - 0,25	Muito pobre
0,25 - 0,50	Pobre
0,50 - 0,75	Regular
0,75 - 0,90	Boa
0,90 - 1,00	Muito boa

RQD (Rock Quality Designation)

Leva em consideração as peças de rocha sã de comprimento superior a 10 cm, estabelecendo a relação entre o comprimento acumulado delas e a extensão total de perfuração num determinado trecho, conforme figura acima; o índice varia entre zero e a unidade.

A principal limitação do índice consiste no fato de não levar em consideração a influência de orientação, continuidade e material de preenchimento de diáclases e descontinuidades em geral.

Na apostila “Escavações em subterrâneo” serão indicadas outras classificações mais detalhadas usadas atualmente e válidas principalmente para escavações subterrâneas.

COMPARTIMENTAÇÃO DO MACIÇO

Um maciço rochoso apresenta descontinuidades dos mais diversos tipos. Fraturas, juntas, planos de acamamento, formam frequentemente um ou mais sistemas que deverão ser mapeados para definir de antemão a possível estabilidade dos taludes finais. Basicamente, pode-se distinguir dois grandes grupos de descontinuidades:

• Famílias e sistemas de diáclases apresentando a mesma orientação, inclinação e intensidade de ocorrência, tendo, em geral, extensão limitada. Eventuais rupturas poderão envolver trechos do maciço isentos de descontinuidades, mobilizando a resistência da própria rocha intacta.

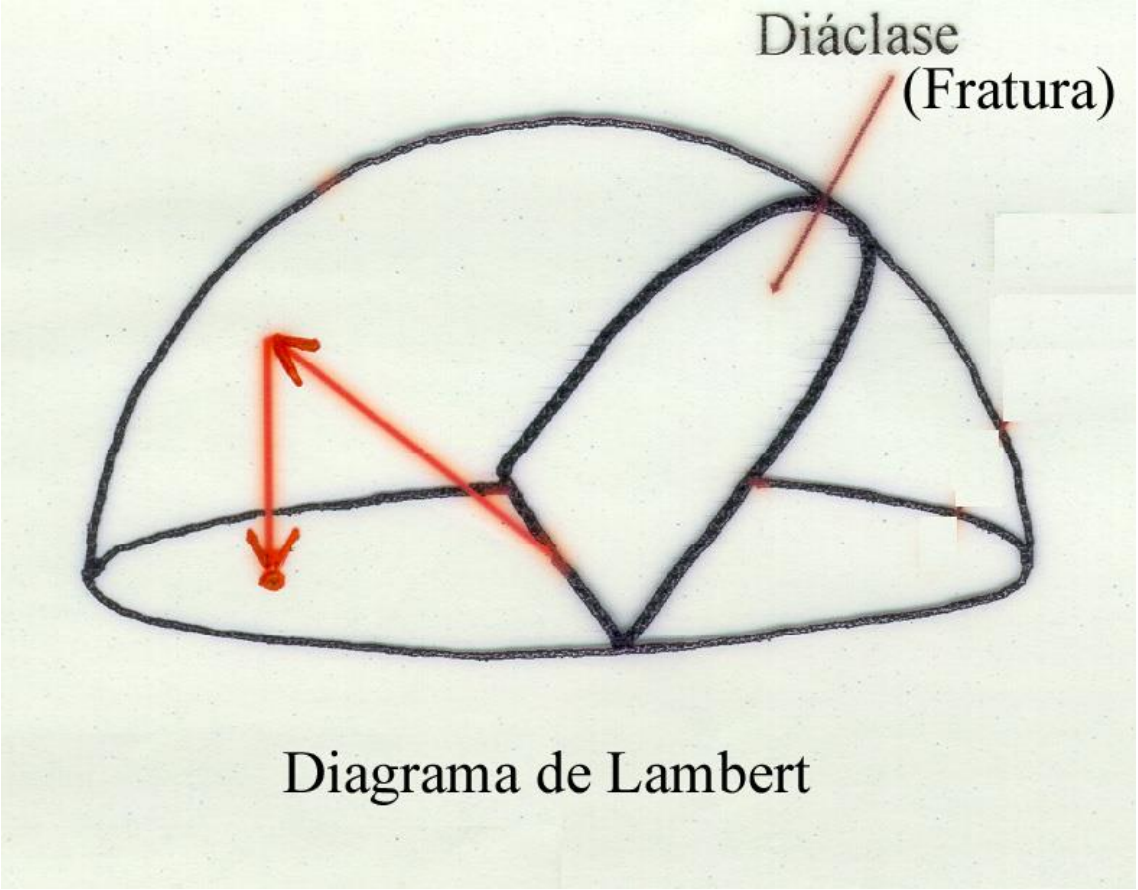
• descontinuidades aleatórias de distribuição irregular, chamadas fraturas.

Todas essas descontinuidades deverão ser mapeadas num levantamento estatístico com bússola para a orientação.

-Diagramas de Projeção esférica

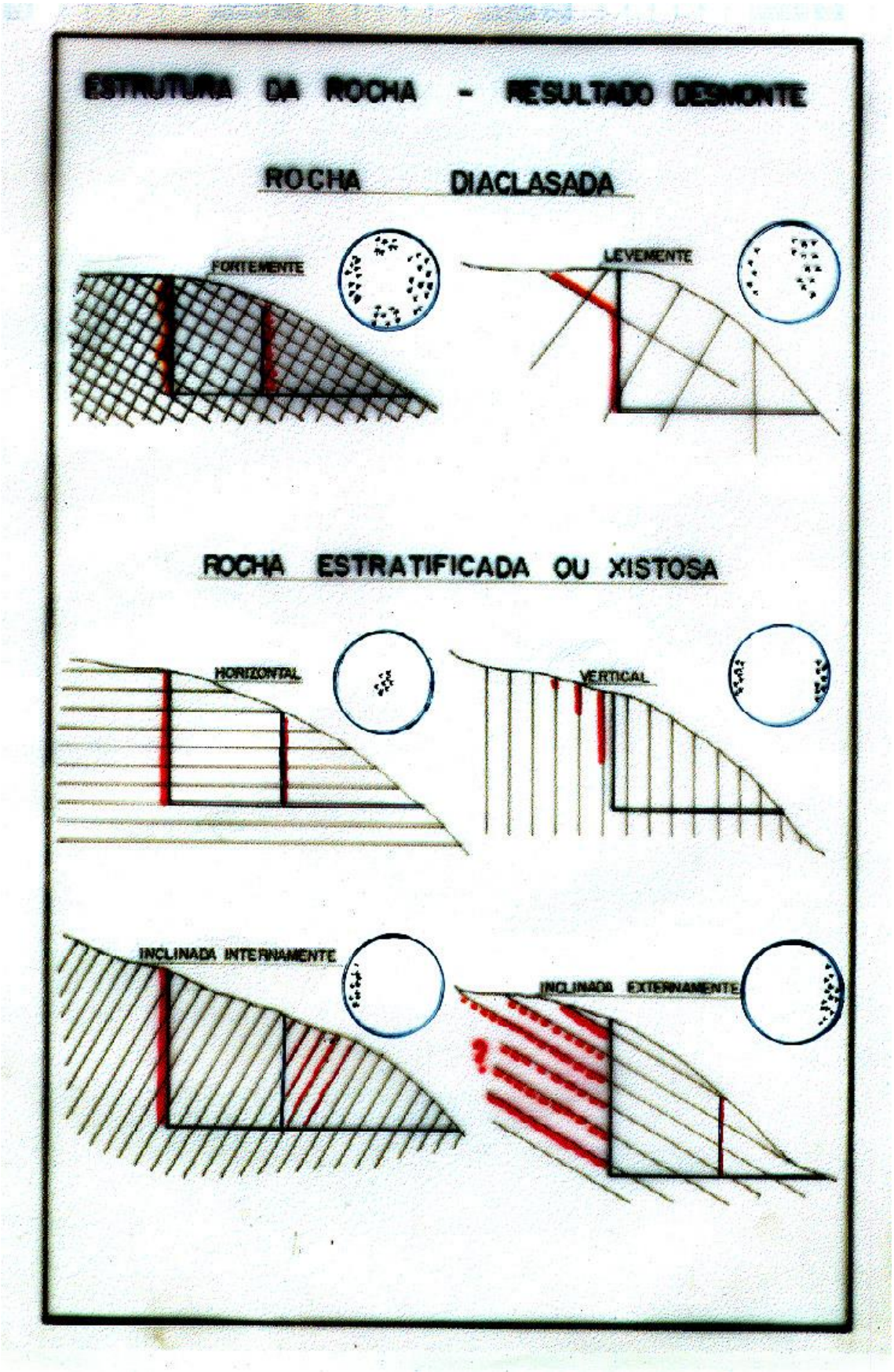
O diagrama de projeção esférica constitui o meio de representação mais utilizado A projeção esférica permite o estudo de um problema de três dimensões em gráficos a duas dimensões. A projeção esférica conhecida como projeção de Schmidt-Lambert é o método mais comumente utilizado. Consiste em se projetar um hemisfério superior, com paralelos e meridianos, num plano horizontal que contenha os dois pólos, norte e sul. Nesta projeção (Hoek e Bray, 91), os planos geológicos (fraturas, juntas etc.) são representados através de seus dois elementos básicos, direção e mergulho, e para isso se utiliza traços de intercepção desses planos na esfera de referência.

O principio de representação de um plano pode ser visualizado na figura. Dado um plano qualquer no talude (fratura, foliação etc.) faz-se que o mesmo plano seja translado pelo centro do hemisfério. Traçando uma normal N ao plano, saindo do centro O da esfera, esta normal fura o hemisfério num ponto N. A partir deste ponto é baixado um segmento normal ao plano equatorial. Este segmento de reta intercepta o plano equatorial no ponto P.



Este ponto é chamado pólo do plano e representa direção e mergulho da descontinuidade no maciço, permitindo uma visualização direta da posição de planos no interior de um talude que esteja sendo observado de baixo para cima.

A figura a seguir indica a importância do conhecimento prévio da geologia de um futuro talude de um corte estradal. As linhas vermelhas indicam os possíveis locais de instabilidade. O diagrama de Lambert correspondente é indicado ao lado do corte.


ESTRUTURA DA ROCHA - RESULTADO DESMONTE
ROCHA DIACLASADA
FORTEMENTE
LEVEMENTE
ROCHA ESTRATIFICADA OU XISTOSA
HORIZONTAL
VERTICAL
INCLINADA INTERNAMENTE
INCLINADA EXTERNAMENTE

ESCAVAÇÃO MECANIZADA

Escarificação

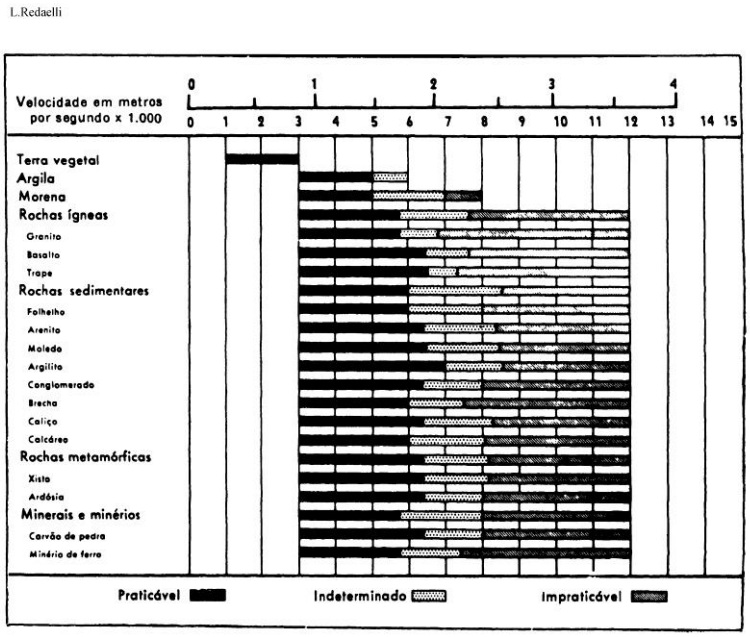
A escarificação apresenta muitas vantagens ante o desmonte a fogo com explosivos, nos materiais de 2ª categoria que não podem ser escavados por tratores de lâmina, escavadeiras, scrapers ou pás carregadeiras, como o material de 1ª categoria. A escarificabilidade depende, principalmente, da presença e orientação de juntas, acamamento ou xistosidade da rocha, que impõem direções preferenciais. A escarificabilidade de um maciço depende também do grau de umidade do maciço. Um estudo prévio geológico e sísmico permite determinar a escarificabilidade da rocha. Conforme diagramas de desempenho elaborados pela Caterpillar, para velocidades de propagação das ondas sísmicas inferiores a 2000 m/s, as rochas geralmente são escarificáveis (fig. na pág. a seguir). O equipamento de escarificação consiste num trator de esteiras de grande potência (mín. 250 H.P.), equipado com:

Dentes, que em número de 1 a 5 penetram na rocha e executam o trabalho de escarificação. Freqüentemente são composto de dois metais de dureza diferente e são auto-afiantes.
Viga porta-dente, onde se fixam os dentes.
Armação articulada para levantar ou baixar o conjunto, pode ser triangular (rodando ao redor de um eixo) ou em paralelogramo, onde ângulo dente/rocha permanece constante)
Um conjunto típico de escarificação é indicado na Figura.

Listamos a seguir os principais fatores que influem no resultado da escarificação:

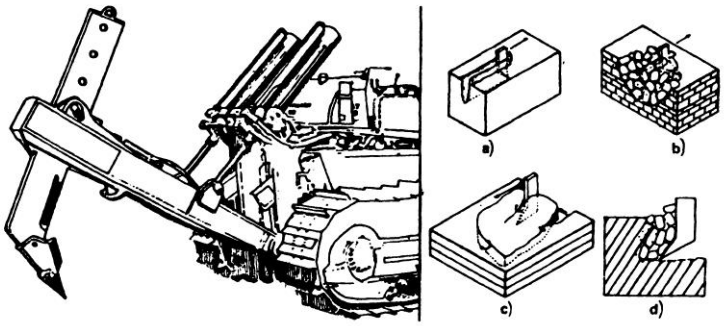
- a velocidade de escarificação não deverá ser superior a 2,5 - 3 km/h, para evitar excessivo desgaste do material

- o plano de escarificação deverá ser descendente ou no máximo horizontal, mas nunca ascendente
- deverão ser evitadas curvas para evitar excessivas solicitações da barra
- o espaçamento entre as linhas deverá ser imposto pelas características da rocha, de 1 a 1,5 m para rochas mais duras e até 2,5 m para rochas mais brandas



Critérios de escarificabilidade em função da velocidade sísn

Em rochas de dureza média pode-se obter produções de escarificação da ordem de 100 a 150 m³/h. Em rochas brandas a produção pode alcançar 400 ou mais m³/h.



a) em rocha branda
b) em rocha fortemente fraturada
c) em rocha estratificada horizontalmente
d) em rocha com estratificação inclinada na direção de trabalho

Escarificador monodente

ESCAVAÇÃO COM O USO DE EXPLOSIVO

- Introdução

Antes do início da escavação em rocha, normalmente deve-se proceder a remoção do solo e rocha alterada da superfície para se chegar à rocha sã (decapeamento). Freqüentemente a camada superficial de solo com resíduos vegetais é estocada a parte para posterior recobrimento das escavações ou das áreas de disposição, visando sua reabilitação. As árvores são previamente cortadas e removidas, sendo o local destoucado com uso de tratores ou eventualmente explosivos. Na remoção de solos com até 20 m de espessura para decapeamento, três métodos são usualmente indicadas:

Escavação com uso de tratores, geralmente sobre esteiras, associados a implementos especiais (lâmina fixa ou angulável, escarificador, etc.). O material de primeira e eventualmente de segunda categoria é desagregado e deslocado a uma distância conveniente.

Escavação com uso de carregadeiras frontais e transporte com caminhões de diferentes capacidades.

Escavação e transporte com uso dos "moto-scrapers", equipamentos fora de estrada movidos a diesel que escavam, transportam e descarregam o material a distâncias de médio porte com grande rapidez e eficiência. Os maiores scrapers atingem potência de até 950 Hp e transportando um volume de 60 m^3 de material, efetuando a remoção do solo em camadas de aproximadamente 35 cm.

Completado o decapeamento, basicamente desmontar rocha com explosivo significa introduzir no maciço, por meio de furos, uma quantidade pré-

determinada de um gerador de energia (explosivo) que permita criar na rocha novas superfícies e assim obter a granulometria desejada.

Os símbolos usados neste capítulo são os adotados internacionalmente:

E Espaçamento = distância entre furos da mesma linha, m
V Afastamento = distância entre linhas de furos, m
K Altura da bancada, m
H Profundidade de furação, m
h_b Altura da carga do fundo, m
h_c Altura da carga da coluna, m
h_s Altura do tampão, m
Q Carga total, kg
Q_b Carga do fundo, kg
Q_c Carga da coluna, kg
l Razão linear de carga, kg/m de furo
I_b Razão linear de carga do fundo, kg/m de furo
l_c Razão linear de carga da coluna, kg/m de furo
Vd Velocidade de detonação, m/s
c Velocidade de propagação da onda de choque, m/s
T Período de um onda de choque, ms
f Freqüência de uma onda de choque, Hz
V_p Velocidade de oscilação de partícula, mm/s

- Fatores determinantes do desmonte

O desmonte de rocha a fogo é normalmente executado em bancadas. Ver figura "Definições". O plano de fogo, que define o desmonte, é determinado pelos seguintes fatores:

	Item
Equipamento disponível	3.3
Altura da Bancada	3.4
Tipos de Explosivo	1.41
Acessórios iniciadores	1.42
Malha de furação e Razão de carga	1.51
Seqüência de detonação	1.52
Resultados do desmonte	1.53
Fogo controlado do contorno	1.61

- Equipamento disponível

Perfurabilidade da rocha

As características da rocha são importantes na escolha das ferramentas mais adequadas e no custo de furação. As características principais da rocha são as seguintes:

Abrasividade. É a propriedade da rocha em desgastar o material de perfuração, sendo dependente da composição, granulometria, forma e direção dos cristais. Rochas com sílica são muito abrasivas.

Perfurabilidade ou IVP. É um índice que expressa a velocidade de perfuração de uma ferramenta. Pode ser medida em campo ou estimada em laboratório por ensaios, através do chamado Índice de Friabilidade (ensaio sueco de friabilidade) e do índice J (ensaio de Siewers). O IVP classifica a perfurabilidade em 7 categorias, desde extremamente lenta a extremamente rápida. No granito padrão, a velocidade de perfuração é de 90 cm/min.

Índice de Desgaste de Bits - IDB: indica a o desgaste sofridos pelos bits em diversos tipos de rocha, relacionando-se com a vida útil da ferramenta. É determinado em ensaios de laboratório a partir do valor de abrasão VA, associado ao índice IVP.

Dureza Superficial: medido pelo retorno de martelos padronizados ao golpearem superfícies de amostras de rochas com faces preparadas

(polidas, lixadas ou aplainadas): os ensaios mais tradicionais são os de dureza Shore (laboratório) e Dureza Schmit (laboratório e campo).

A direção de estruturas e acamamentos com relação à direção do furo é importante, principalmente se ocorrem grandes contrastes de material macio/compacto, o que é causa de grandes desvios dos furos.

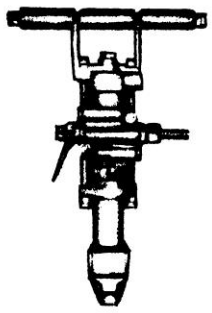
Escolha de equipamento

O equipamento de furacão atualmente no mercado consiste em marteletes manuais para serviços pequenos e leves e carretas de furação sobre pneus ou esteiras para serviços de vulto e pesados, ver figura. A escolha do equipamento depende do volume a ser desmontado num prazo determinado. Podendo-se escolher, priorita-se o maior equipamento possível, porém sempre mantendo pelo menos uma unidade de reserva. Como base para a escolha do equipamento podemos usar os valores indicativos da Tabela 1.

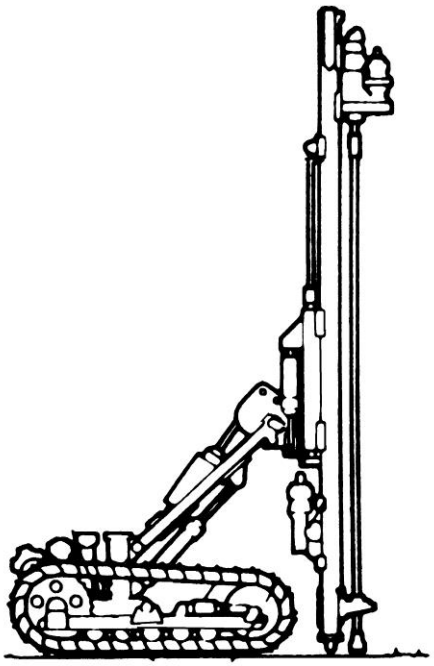
Os marteletes manuais utilizam brocas integrais de aço sextavado de 7/8" ou de 1" de diâmetro e ponta com pastilha de metal duro (carbureto de tungstênio sinterizado com cobalto como ligante), de diâmetro decrescente entre 41 e 39 mm dependendo do aumento de comprimento da broca. Os comprimentos das brocas integrais variam como múltiplos de 0,8 m, até 4,8 m.

As carretas de furação usam equipamento de extensão composto de punho (inserido na bucha da perfuratriz), luvas rosqueadas, hastes de diâmetro 1¼", 1½", 1¾" ou 2" dependendo do tamanho da perfuratriz. O comprimento padrão das hastes é de 3 m. As coroas podem ser com pastilhas em X ou com botões de metal duro. Ver figura.

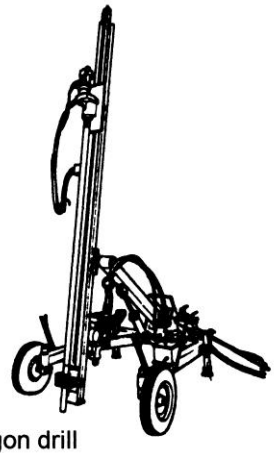
L.Redaelli



martelete manual



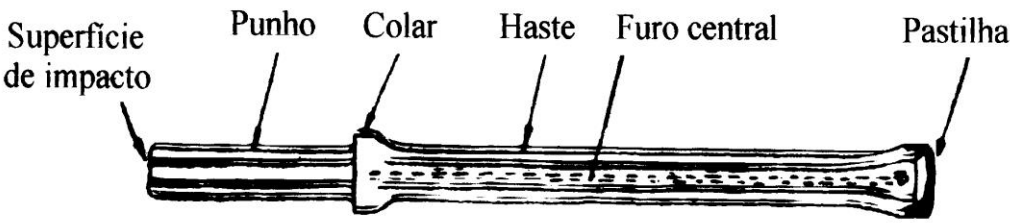
air track

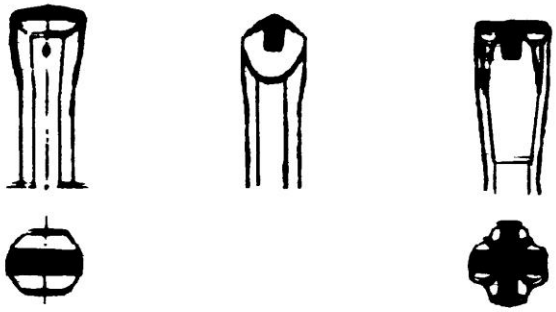


wagon drill

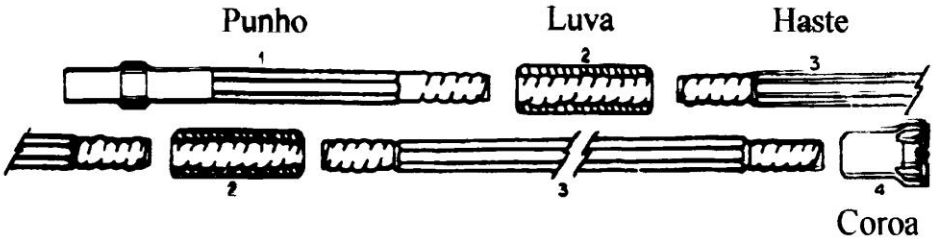
Equipamento de furação

L.Redaelli

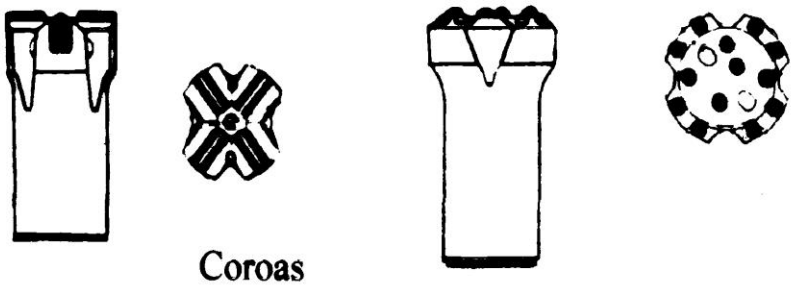




Broca integral



Equipamento de extensão



Coroas

TABELA 1

TIPOS	Peso do martelo kg	Diâmetro do furo mm	Produção de furação m/h	Produção de desmonte m³/h
Marteletes manuais				
leves	<18	40- 36	4	3
médios	18 - 24	36	5	4
pesados	24 - 34	40- 36	6	5
Carretas de furação				
leves(sobre pneus)	35 - 45	73 (3”)	8	40
médias	45 - 60	88 (3½”)	10	70
pesadas	60 - 70	102 (4”)	15	100
super	> 70	>102 (> 4”)	20	>150

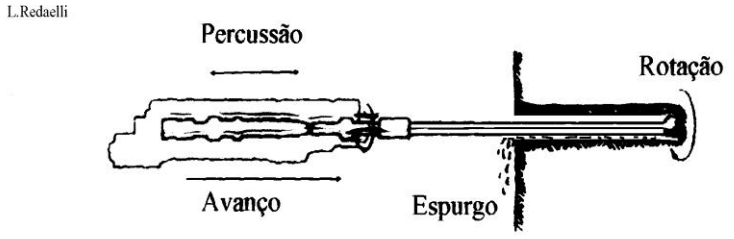
Funcionamento das perfuratrizes

As perfuratrizes constam das seguintes partes (Figura a seguir) :

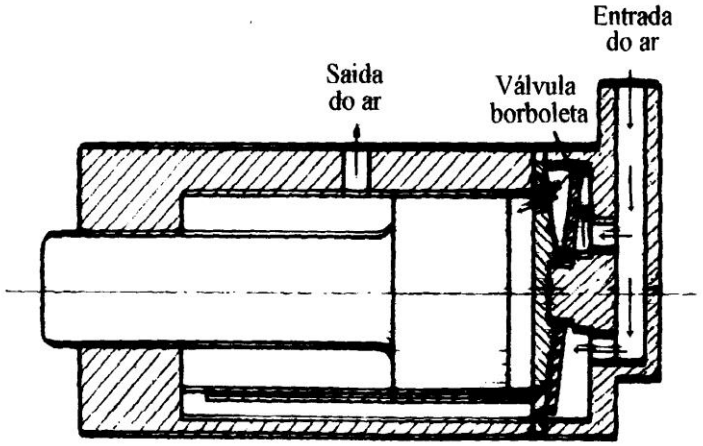
Sistema de percussão. Consta de um pistão que bate sobre a superfície de impacto da broca. A alternância do movimento é propiciada por uma válvula a borboleta.

Sistema de rotação. O pistão, quando em movimento descendente, utiliza toda a sua energia no impacto na superfície da broca. Na sua fase ascendente, roda ao redor de um eixo de catracas.

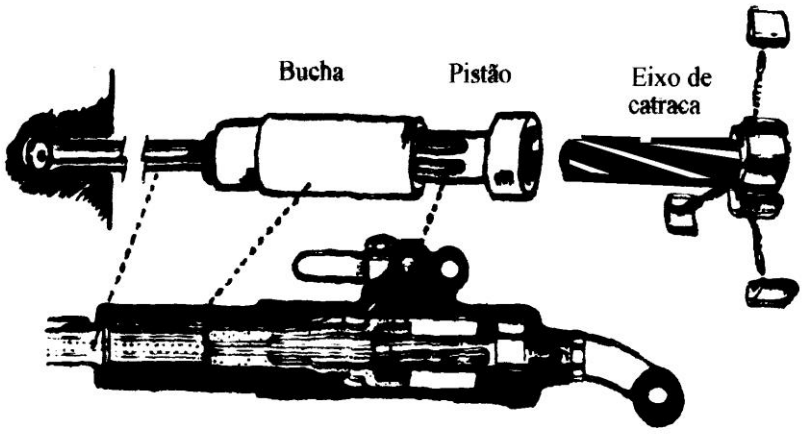
Sistema de limpeza. Um furo de sopro atravessa toda a perfuratriz e as brocas ou hastes. O espurgo se realiza lateralmente às pastilhas da broca.



Funções do martelete



Percussão



Rotação

Perfuratriz a percussão

- Altura da bancada

A altura da bancada depende basicamente dos seguintes fatores:

- equipamento de furação
- inclinação dos furos
- geologia do maciço
- geometria do projeto de escavação

- Equipamento de furação

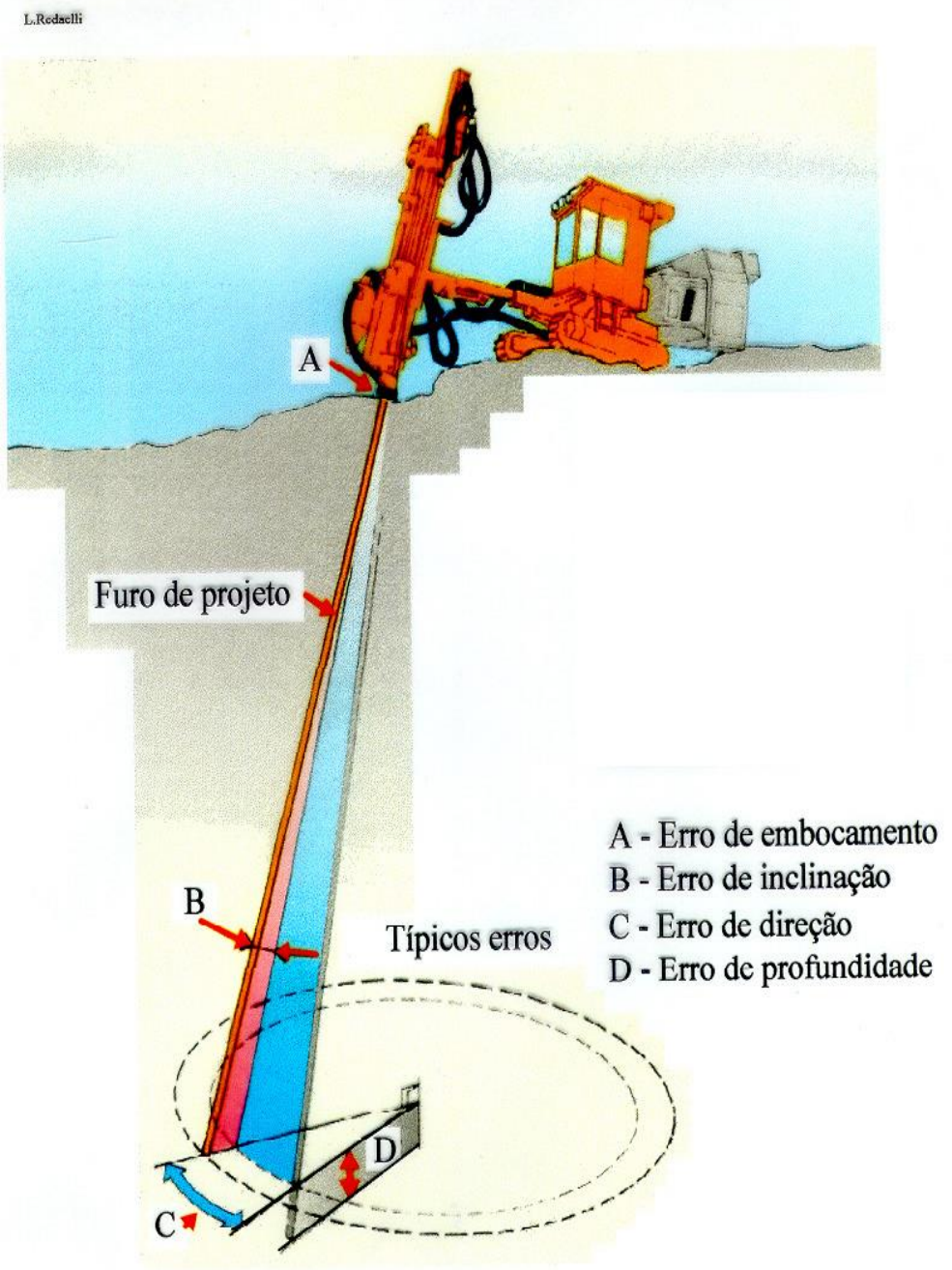
Cada equipamento apresenta os melhores resultados de furação com um diâmetro bem determinado de furo. A deflexão dos furos após uma certa profundidade é a soma dos seguintes fatores:

erro de embocamento
erro de alinhamento
desvio da broca devido a descontinuidades na rocha
desvio da coroa devido a flexão das hastes no furo

A deflexão aumenta rapidamente e erraticamente com a profundidade do furo, sendo maior para diâmetros menores. Além de certos limites de deflexão (em média 10% do afastamento) fica praticamente impossível desmontar uniforme- e economicamente o maciço. Neste caso teremos quatro alternativas:

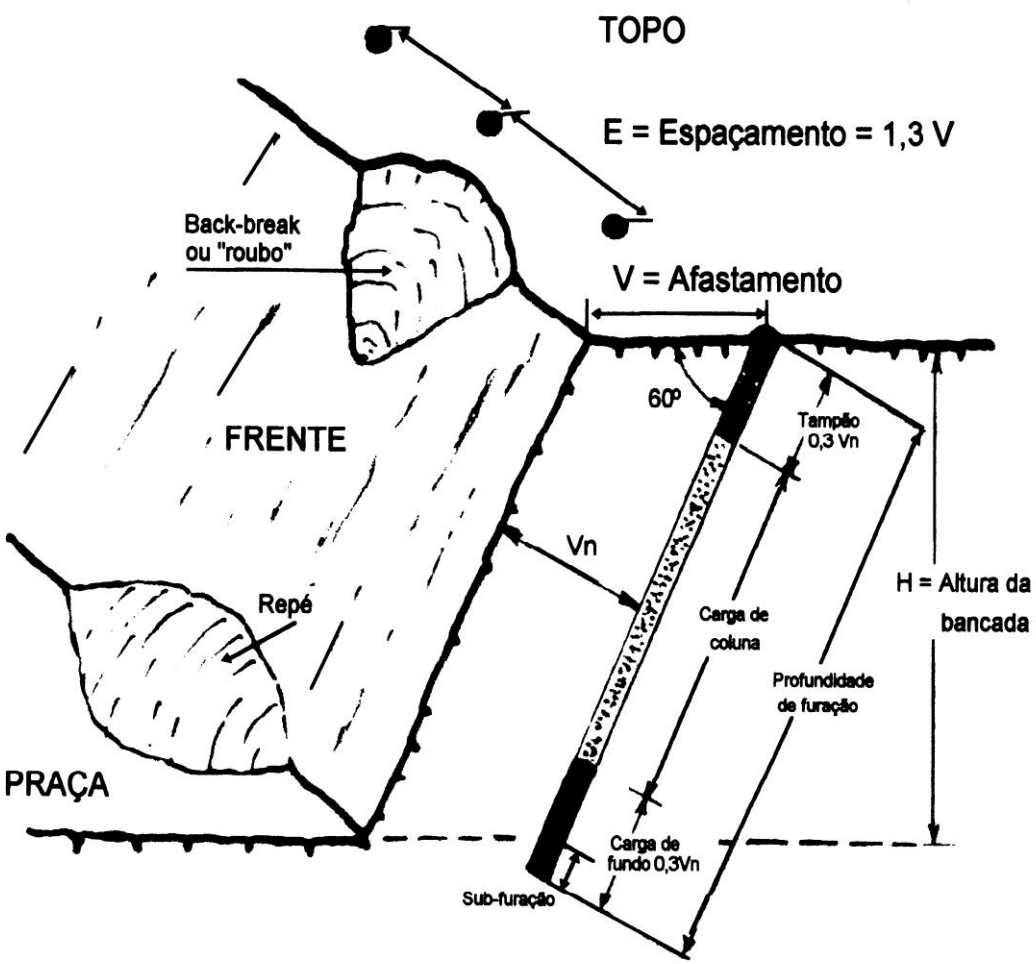
aceitar a formação de repé, que após a limpeza do entulho será retirado com dispendiosos e perigosos fogos de levante
reduzir o afastamento e o espaçamento
reduzir a altura da bancada

mudar de equipamento



TÍPICOS ERROS DE FURAÇÃO

L.Redaelli



Termos e definições de uma bancada

Na prática, temos os seguintes valores limites da altura de bancada como função do equipamento e portanto do diâmetro do furo:

Equipamento de furação	Diâmetro médio do furo	Altura máx. aprox.
Marteletes manuais	1½" - 38 mm	4 m
Carretas sobre pneus	2 a 2½" - 51 a 64 mm	9 a 12 m
Carretas sobre esteiras	3 a 10" - 76 a 250 mm	15 a 20 m

- Inclinação dos furos

Uma frente de bancada inclinada é evidentemente muito mais segura, do ponto de vista da estabilidade estática e dinâmica, que uma frente vertical. Ademais, o engastamento do pé dos furos verticais é bastante desfavorável não somente do ponto de vista da possível altura da bancada, como também do ponto de vista do consumo de explosivo, da fragmentação e das vibrações do maciço. Detonando uma carga padrão, na medida em que aumenta a inclinação dos furos pode-se obter uma sensível redução do consumo de explosivo, do comprimento da sub-furação e, para uma distancia determinada, também diminuir a velocidade de oscilação de partícula. A tabela a seguir indica o valor da redução:

Inclinação do furo	Velocidade de partícula, mm/s	Economia de explosivo
Vertical	500	0
10:1	400	5%
3:1	150	10%
2:1	100	15%
1:1	90	20%

Geralmente os furos de desmonte são inclinados de 60º do piano horizontal. Sendo por definição o afastamento real entre os furos igual à distância vertical entre as fileiras. teremos um afastamento aparente na superfície da rocha igual a V / sin 60º.

Note-se que no caso da utilização de marteletes manuais, os furos inclinados são muito mais difíceis de serem executados com precisão. Mesmo usando carretas. o paralelismo dos planos dos furos inclinados é difícil de ser obtido sem o uso de aparelhagem especial de orientação, tipo DIT ou similares.

- Geologia do maciço

A altura da bancada depende também dos condicionantes geológicos do maciço e da geometria da escavação. A geologia determina a altura da bancada pela estabilidade das faces. Determina ainda a orientação da bancada, preferencialmente paralela aos planos do principal sistema de juntas, acamamento, xistosidade, e outras estruturas. A Figura da Pag. 12 mostra a influência das descontinuidades sobre a estabilidade de um maciço.
As juntas representam superfícies de fraqueza que podem permitir um melhor corte numa dada direção. Planos de acamamento e juntas horizontais facilitam a obtenção de praças sem repés .
Diáclases subverticais mergulhando para o interior do maciço resultam em faces de bancadas regulares, com melhor estabilidade, facilitando uma maior fragmentação.
Juntas e camadas com mergulho em sentido à face dificultam a escavação, resultando em faces irregulares e repés.

A alternância de material pouco consolidado ou alterado com outras mais competentes pode impedir a escavação mecanizada e ao mesmo tempo dificultar o desmonte por explosivos, sendo muitas vezes necessário

concentrar-se o explosivo nos furos apenas nas passagens mais resistentes, isolando-se as camadas mais frágeis com material inerte, evitando-se com isso a perda de energia nessas regiões.
Junta e falhas horizontais típicas de basaltos podem provocar instabilidades em cristas de bancadas.

- Geometria do projeto de escavação

Freqüentemente nas obras civis (mais raramente nas minerações) a altura da bancada é definida pela geometria do projeto de escavação. Neste caso as bancadas têm altura pré-determinada. Cabe lembrar que o afastamento deve ser pelo menos 0,7 a 0,8 vezes menor do que a altura da bancada. É também recomendável lembrar que o comprimento padrão das hastes do equipamento secionado é de 3 m e portanto a altura da bancada poderá ser um múltiplo de 3, facilitando o serviço do operador da carreta.

TIPOS DE EXPLOSIVO

- Introdução

Um explosivo é um produto químico composto de um combustível e um oxidante. Uma explosão pode ocorrer em duas formas diferentes: deflagração e detonação. A primeira é uma combustão (oxidação) muito rápida com velocidade crescente. Na segunda, a oxidação procede com velocidade muito alta e constante, liberando o máximo da energia do explosivo. A detonação do explosivo é iniciada, já em alta velocidade, no interior do furo por meio de acessórios iniciadores especiais, tais quais espoletas ou cordel detonante. A pressão inicial de detonação, com valor ~100 t/cm², se desenvolve durante 3 a 5 ms e tem o valor da expressão:

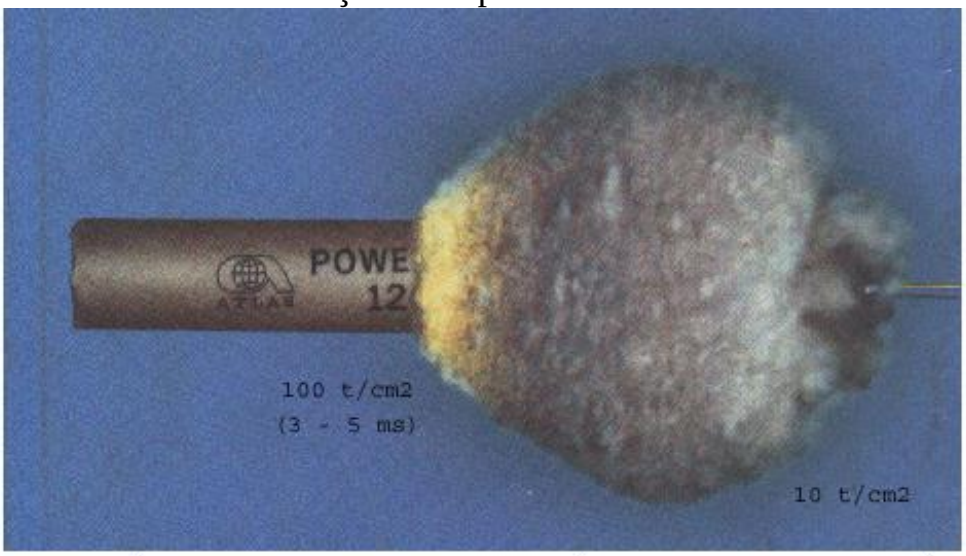
$$p_d = 1/6\ \rho\ v^2$$

Onde:

p_d Pressão de detonação

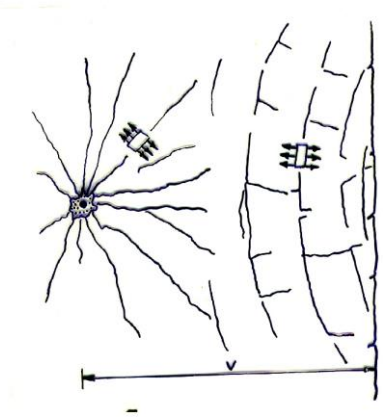
ρ Densidade do explosivo

v Velocidade de detonação do explosivo



Detonação de uma carga explosiva – região amarela: frente da reação química (detonação), parte posterior: gases produzidos.

Durante a detonação cria-se ao redor do furo, por compressão, uma seqüência de trincas radiais de 15 a 20 cm de comprimento. A onda de compressão que se propaga elasticamente no maciço, é refletida pela superfície livre da rocha e cria novas trincas normais à esta última. As trincas normais juntam-se com as trincas radiais fragmentando o maciço.



Os gases da detonação, com alta pressão (~10 t/cm²) e temperatura formam aproximadamente 1 m³ de gás por kg de explosivo a 2 - 3.000º C e penetram nas trincas afastando os blocos, lançando o entulho na frente da bancada. Durante o deslocamento os blocos se entrechocam, aumentando a fragmentação.

- Características dos explosivos

Indicamos a seguir as principais características que definem um explosivo:

Força, indicada em %. Conforme alguns fabricantes é a quantidade em peso de nitroglicerina (NG). Conforme outros fabricantes é o volume detonado num bloco de chumbo (bloco de Trautzl) comparado com o volume obtido com a mesma quantidade de NG. Tem outros método de medir a força de um explosivo (morteiro balístico etc.). A força de um explosivo não é uma medida padronizada e portanto é pouco útil como termo comparativo entre diferentes fabricantes.

Energia especifica desenvolvida pelo explosivo em MJ/kg, medida e indicada pelo fornecedor.

Densidade. Pode variar entre 0,9 e 1,7 g/cm³.

Velocidade de detonação. Pode variar entre 2.500 e 7.000 m/s.

Gases desenvolvidos pela detonação, especialmente CO, CO_2, N_2 e H_2.

Toxicidade, os explosivos são divididos nos seguintes tipos:
CLASSE 1 - Gases não tóxicos, pode ser usado em subterrâneo
CLASSE 2 - Gases moderadamente tóxicos
CLASSE 3 - Gases tóxicos, para uso exclusivo a céu aberto

Resistência à água

Sensibilidade ao impacto, sensibilidade à indução (flash over).

Estabilidade em função do diâmetro. Por exemplo os explosivos amoniacais perdem estabilidade em diâmetros muito pequenos(< 50 mm).

Impedança (velocidade de detonação x densidade). Deverá ser o mais possível compatível com a impedança da rocha (velocidade de propagação das ondas sísmicas x densidade) para se obter um melhor resultado de desmonte.

- Utilização da energia

Quando iniciados na sua velocidade característica de detonação e com uma correta malha de furação, a energia desenvolvida pelos explosivos fica assim distribuída:

Fragmentação da rocha	15%
Deslocamento do entulho	5%

Vibrações sísmicas no maciço 40%
Ondas de choque no ar 40%

- Tipos de explosivos

Existem no mercado os seguintes tipos principais de explosivo:

Deflagrantes, para pequenos serviços como corte de pedras etc.

Pólvoras negras, diversos explosivos baseados em KNO_3 e $NaNO_3$

Detonantes, para todos os grandes serviços de desmonte. Os principais explosivos detonantes são listados a seguir:

Dinamites
São encartuchadas em papel plastificado, com diversos ∅
Composição geral: Nitroglicerina NG (%) + Geradores de O_2 (Nitrato de amônia, percloreto de K ou Na) + Serragem (absorvente de NG) + Elevadores de temperatura (pó de Al ou Mg)
A Tabela indica os tipos de dinamites mais comuns:

Tipo	Força %	Veloc. m/s	Densi-dade	Classe gases	Sensibi-lidade	Uso geral
Comum	30-60	alta	1,2 - 1,4	3	alta	João de barro, valas, desmonte subaquático
Especial	15-60	menor	1,2	1 - 2	menor	Rocha de dureza média, seca
Gelatina	30-90	alta	1,2	1 - 2	média	Rocha dura ou úmida escav. subterrâneas

Nitrato de Amônia ou ANFO (amonium nitrate + fuel oil, FO)
Composição: 54,3% nitrato de amônia (NA) + 5,7% óleo diesel (FO). É um explosivo em pó, muito barato, sensível à água, não indicado para ∅ < 50 mm. Velocidade de detonação 2.500 a 5.000 m/s, conforme ∅ crescente. Iniciado com aprox. 10% de dinamite como booster (ou primer), distribuída ao longo do furo, para manter constante a velocidade de detonação. Freqüentemente usado como explosivo de coluna.

Lamas explosivas (slurries)
Composição geral: água 15%, NA, TNT, Al em pó 18%
Força: 1,4 a 2,5 x ANFO, densidade: 1,4 a 1,5 g/cm³, velocidade de detonação 4.000 a 7.000 m/s. São explosivos semilíquidos, baratos, insensíveis à água, não indicados para ∅ < 50. Necessitam de booster. Freqüentemente usados como explosivo de fundo.

Emulsões
Composição geral: gotas de solução saturada de NA, ligadas por FO + cera, esferas de vidro ∅ 0,1 mm. São explosivos semilíquidos, resistem à água e são seguros no manuseio. Velocidade de detonação 5.000 m/s. Necessitam de booster. Apresentam-se encartuchado ou em contenidores. Fácil carga pneumática.

Os explosivos são utilizados encartuchados em papel plastificado, como a maioria das dinamites, em tubos rígidos (ANFO) ou em tubos flexíveis (lamas e emulsões)

- Acessórios iniciadores

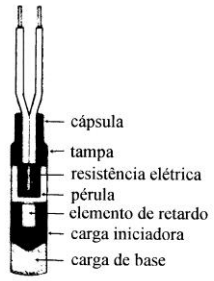
Basicamente existem no mercado os seguintes tipos de acessórios iniciadores:

a - espoletas comuns
b - espoletas elétricas, não usada a céu aberto, mais usada em subterrâneo
c - espoletas não elétricas, mais usadas em subterrâneo, substituindo as espoletas elétricas
d - cordel detonante, usado principalmente a céu aberto

a - Espoletas comuns

Uma espoleta comum é composta de estopim e cápsula. O estopim consta de um núcleo de pólvora negra, acondicionado em capa de fibra têxtil e plástico. A velocidade normal de queima do estopim é de 120 s/m (± 10%). A capsula é de alumínio, fechada numa extremidade e preenchida com explosivo de base (tetranitrato de penta-eritrol) e explosivo iniciador (azido de chumbo). O estopim é introduzido na extremidade da capsula e fixado com alicate especial. São muito usadas em fogachos e em serviços pequenos.

b - Espoletas elétricas



Espoleta elétrica de tempo

Número de esperas e intervalos entre esperas

Mantmili

Número	Intervalo entre esperas (ms)
1	25
2	50
3	75
4	100
5	125
6	150
7	175
8	200
9	250
10	300
11	350
12	400
13	450
14	500
15	600
16	700
17	800
18	900
19	1000

Mantempo

Número	Intervalo entre esperas (s)
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5
6	3,0
7	3,5
8	4,0
9	4,5
10	5,0

Fig. 1.16 - Espoletas elétricas

São detonadas por uma corrente elétrica de uma intensidade mínima de 1,5 Amperes (CC) ou 3 Amperes (CA). As espoletas elétricas de detonação instantânea consistem dos seguintes elementos:

Uma capsula de alumínio, similar à capsula das espoletas comuns
Um par de fios de comprimento compatível com a profundidade do furo e vedados com borracha na boca da capsula
Uma resistência elétrica que se torna incandescente à passagem da corrente elétrica

Uma carga primária de alta sensibilidade (em geral azida de chumbo) que detona quando a resistência se torna incandescente

Uma carga base (em geral tetril) que detona por efeito da carga primaria e inicia a detonação do explosivo

As espoletas elétricas de tempo diferem das instantâneas por possuir um elemento de retardo entre a resistência e a carga primária, propiciando um intervalo de tempo (espera ou retardo) entre espoletas de número diferente. Nas espoleta Mantmile tem um intervalo de 25 ms entre esperas de número 1 a 8, entre os números 9 e 14 o intervalo é de 50 ms e do número 15 para cima o intervalo é de 100 ms. Nas espoletas Mantempo o intervalo é de 500 ms entre as esperas. As espoletas elétricas são interligadas em série, mantendo assim a amperagem constante em todas elas. Quando o circuito de espoletas é muito grande, pode ser subdividido em duas series iguais, interligadas em paralelo. Em todos casos deve-se sempre verificar que todas as espoletas recebam pelo menos 3 A de intensidade de corrente. A corrente elétrica é obtida diretamente da rede ou por meio de equipamento especial de geração (detonadores de gerador ou de descarga de condensador). As espoletas elétricas são sensíveis a eventuais cargas induzidas por descargas atmosféricas, transmissões de rádios de alta potência, correntes estranhas no subsolo etc. O seu uso nas obras deve sempre ser acompanhado por detetores de eletricidade atmosférica que avisam a aproximação de trovoadas com sinais acústicos e luminosos.

c - Espoletas não elétricas

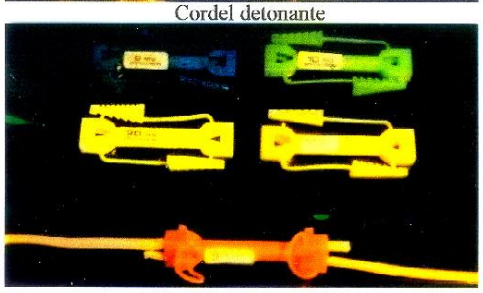
O fio das espoletas não elétricas é composto de um tubo oco de plástico flexível, de ∅ interno de 1,5 mm e externo de 3 mm, cuja parede interna é revestida por uma fina camada de material pirotécnico. Iniciado por meio de uma pequena cápsula explosiva, detonada por uma pistola especial, este material produz um plasma gasoso que percorre o interior do tubo a 1.000 m/s, iniciando outras espoletas interligadas e o elemento de retardo de todas elas. Na cápsula estas espoletas são idênticas as espoletas elétricas. As

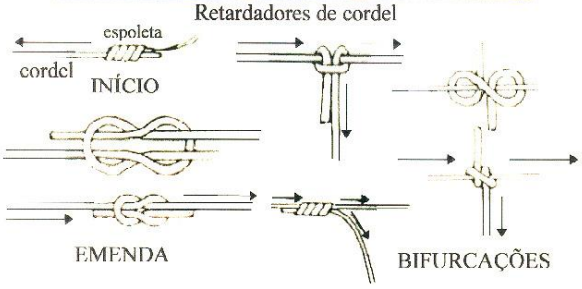
espoletas não elétricas estão rapidamente substituindo as espoletas elétricas, especialmente em subterrâneo, graça à sua maior segurança.

d - Cordel detonante

O cordel detonante tem o aspecto externo de um cabo elétrico e consta de um núcleo explosivo (nitropenta) de alta velocidade (7000 m/s) coberto por fibras têxteis e PVC. Pode ter diversos diâmetros (de 3,3 a 4,8 mm) e diversos pesos de explosivo por m de cordel (de 3 a 10 g/m). Sua iniciação é feita com uma espoleta, comum ou elétrica, amarrada à sua extremidade inicial. O tronco principal de cordel, onde inicia a detonação, pode ser interligado a diversas derivações por meio de nós, firmemente amarrados. A detonação do cordel é suficiente para iniciar as cargas explosivas com que estiver em contato dentro do furo. Em cargas de coluna muito compridas o cordel garante a detonação integral de toda a coluna na velocidade máxima do explosivo. Para propiciar os intervalos necessários para detonar múltiplas fileiras pode-se utilizar retardadores de cordel intercalados na linha tronco ou nas derivações. Os retardadores consistem em capsulas de aprox. 10 cm de comprimento com um elemento de retardo de 5, 10, 20, 30 e 50 ms. Em ambas as extremidades do retardador existem pedaços de cordel de alguns cm de

Cordel detonante


Retardadores de cordel



comprimento para interligação com as derivações. É um método seguro para desmonte a céu aberto, isentando o uso de eletricidade e o risco de detonação por indução durante tempestades com descargas elétricas. O risco de roubo no topo da bancada (back break) e o alto nível de ruído na detonação do próprio cordel são os maiores (e únicos) inconvenientes.

Malha de Furação e Razão de Carga

Depende do diâmetro do furo (por sua vez função do equipamento disponível), da qualidade da rocha (dureza, fraturamento natural), da razão de carga e das características do explosivo. A malha de furação é definida pelo afastamento V e pelo espaçamento E . O afastamento V, é a distancia normal entre uma fileira de furos e a face da bancada ou entre as fileiras. O espaçamento E é a distância entre furos da mesma fileira. (Ver figura da pág. 26). A malha pode ser determinada empiricamente ou analiticamente. O primeiro método pode ser utilizado em pequenos desmontes ou quando os parâmetros da rocha são desconhecidos ou de difícil estimativa. O método analítico é recomendável para desmontes de grandes volumes.

Determinação empírica da malha

- Malha de furação

Como valor inicial dos parâmetros do desmonte assume-se:

$$V\ (cm) = 40 \times \text{diâmetro do furo (cm)}$$

ou mais rapidamente:

$$V\ (m) = d\ (pol.)$$

Este primeiro valor aproximado deve ser reajustado com testes práticos na obra, observando as condições de arrancamento e fragmentação. Para o espaçamento, para obter as melhores condições de fragmentação foi determinada experimentalmente a seguinte relação:

$$E = 1{,}3\ V$$

Mantendo constante o valor da área EV e aumentando o afastamento, diminuirá a fragmentação e vice-versa. Em bancadas com face vertical será necessária uma certa furação abaixo do nível da praça (sub-furação), determinada experimentalmente em U = 0,3V) para evitar a formação de repé que requer dispendiosos furos de levante. A sub-furação não será necessária em bancadas com face inclinadas até 60º do plano horizontal. Estas bancadas apresentam também maior estabilidade, menores roubos no topo e menores abalos sísmicos. Todavia a furação é muito mais difícil. Particularmente difícil é manter o paralelismo dos furos.

- Razão de carga

Devido ao seu engastamento, os furos no pé da bancada requerem maior energia do explosivo. Portanto o fundo deverá ter uma carga superior por metro de furo que a carga por metro de coluna.
Valem as seguintes relações experimentais:

Razão de carga linear do fundo, l_f	d^2 (mm) / 1000	kg/m
Comprimento da carga do fundo, h_f	1,3 V	m
Carga do fundo, $l_f . h_f$	1,3 V d^2 / 1000	kg

A razão de carga linear da coluna l_c deverá ser 40% da razão de carga do fundo. A menor concentração da carga de coluna pode ser obtida usando

espaçadores de madeira o utilizando explosivos de força menor. Entre o topo da bancada e a carga da coluna costuma-se preencher o furo com um tampão de material fino como barro, saibro, areia etc. O comprimento do tampão, determinado experimentalmente, será igual a V.

Determinação analítica da malha

- Transferência de energia para a rocha

A energia total de um explosivo, desenvolvida durante a detonação. depende da composição do explosivo, dos produtos da reação e da temperatura de detonação. O valor da energia é geralmente medido pelo fornecedor e indicado em unidades mecânicas (MJ/kg). Para calcular a razão de carga é necessário em primeiro lugar, estimar quanta parte da energia do explosivo é efetivamente transferida para a rocha. O rendimento da transferência depende principalmente de dois fatores:

impedança da rocha e do explosivo.
defasagem entre o diâmetro do furo e o da carga

A impedança da rocha I_r é definida como o produto da sua densidade com a velocidade de propagação das ondas sísmicas.

A impedança do explosivo I_e é o produto da densidade com a velocidade de detonação. O rendimento da detonação η_1, em função das impedanças, é dado pela relação:

$$\eta_1 = \frac{(I_e - I_r)}{(I_e + I_r)}$$

Note-se que quanto mais I_e e I_r tendem para o mesmo valor, tanto mais aumenta o rendimento (η_1 tende a 1) e quanto mais I_e e I_r discordam, tanto mais diminui o rendimento. Na transferencia de energia é

também de grande importância a defasagem entre o diâmetro do furo D_f e o diâmetro da carga D_c. O rendimento da detonação em função da defasagem dos diâmetros foi determinado experimentalmente conforme a relação:

$$\eta_2 = \frac{1}{e^{Df / Dc} - (e - 1)}$$

A prática confirma que quando os furos são completamente carregados, ou seja quando a relação entre os diâmetros se aproxima à unidade, a pressão de detonação sobre as paredes dos furos é máxima e o rendimento do desmonte melhor. Ao contrário, querendo evitar que a detonação solicite excessivamente a rocha, como no caso do pré-fissuramento, pode-se aumentar a defasagem entre os diâmetros utilizando cargas de diâmetro substancialmente menor do diâmetro dos furos.

Concluindo, o explosivo pode transferir para a rocha só uma parte E_t da energia E disponível, conforme a relação:

$$E_t = \eta_1 . \eta_2 . E \qquad (MJ/kg)$$

- Comportamento de um furo carregado (mina)

A detonação de uma mina resulta em diferentes efeitos, alguns dos quais desejados e outros colaterais e indesejados, mas lamentavelmente inevitáveis.

Os efeitos desejados são:

Separação do maciço de um volume predeterminado de rocha
Fragmentação da rocha em blocos em dimensões predeterminadas

Deslocamento do entulho a uma certa distancia da posição inicial

Os efeitos colaterais indesejados são:

Superfragmentação de parte da rocha desmontada
Projeção acidental de fragmentos de rocha além do deslocamento desejado
Fraturas e "roubos" na rocha remanescente
Abalos sísmicos
Ondas de choque no ar (air blast)

Analisamos a seguir os diferentes consumos de energia dos fenômenos acima.

Efeitos desejados

Separação do maciço de um volume predeterminado de rocha.

A separação do maciço de um volume predeterminado de rocha requer uma quantidade mínima de energia quando comparada com o total de energia fornecido à rocha.

A energia E_a necessária para separar do maciço um volume de rocha A_r, com resistência à tração R_{tr} e módulo de elasticidade J pode ser quantificada com a expressão:

$$E_a = A_r \cdot \frac{R_{tr}^2}{J} \qquad (MJ)$$

Note-se que E_a é uma quantidade de energia insignificante, representando somente de 0.100 a 0.103 % da energia do explosivo transferida à rocha.

Fragmentação da rocha

A fragmentação da rocha é provocada sucessivamente pelos seguintes fenômenos:

- frente de tração, causada pela reflexão da onda de compressão sobre a frente da bancada

- solicitação de tração induzida na rocha pela pressão dos gases sobre as paredes do furo

- impactos entre os blocos projetados ou entre os blocos e a superfície do maciço

O cálculo da energia E_b absorvida no processo de fragmentação pode ser orientado pela hipótese de Rittinger sobre a proporcionalidade entre o consumo de energia e a formação de novas superfícies s (m^2/m^3), referidas ao volume unitário. Conforme Rittinger vale a seguinte relação:

$$E_b = A_r \cdot s \cdot E_{ss} \qquad (MJ)$$

Onde:

s Novas superfícies criadas com a detonação, (m^2/m^3)

Conforme o valor estatístico de curvas granulométricas do entulho de rochas sãs, pouco fraturadas, desmontadas com explosivos, vale a relação: $s = 64/D_{máx}$ sendo $D_{máx}$ a dimensão máxima dos blocos de entulho.

E_{ss} Energia específica de fragmentação da rocha.

Valor obtido do consumo energético de britadores primários. Os consumos energéticos das rochas mais comuns são indicados na Tabela a seguir.

Resolvendo a relação de Rittinger para rochas homogêneas e compactas pode-se constatar que a energia usada para a fragmentação representa aproximadamente 15% da energia da detonação transferida à rocha.

Rocha	Densidade (kg/cm^2)	Velocidade sísmica (m/s)	Energia de fragmentação ($10^{-3} MJ/m^2$)
Calcário	2.600	4.000	1,47
Dolomita	2.650	4.000	1,54
Gesso	2.300	2.500	1,10
Salgema	2.200	3.500	1,10
Granito	2.700	5.000	1,68
Basalto	2.900	5.400	1,65
Quartzito	2.650	4.500	1,63
Arenito	2.250	2.750	1,18
Rocha mineralizada	Variável	3 - 5.000	0,8 - 1,8

N O T A - Os valores da energia de fragmentação da tabela acima são válidos para rochas sãs e compactas. Com o aumento do grau de fraturamento da rocha diminui o valor da energia necessária para a obtenção da granulometria desejada.

Deslocamento do entulho

A energia E_c necessária para o deslocamento de 1 metro do baricentro de um volume A_r de rocha com densidade P_r é expressa pela relação:

$$E_c = A_r \cdot P_r \cdot g \cdot u \cdot l \cdot 1^{-6} \qquad (MJ)$$

Onde:

g aceleração da gravidade, m/s^2

u coeficiente de atrito, u = 1

Resolvendo a relação acima pode-se constatar que a energia necessária para o deslocamento do entulho situa-se ao redor de 5 a 6% da energia transmitida à rocha.

Efeitos indesejados

Examinamos agora os consumos de energia dos outros efeitos, indesejados mas lamentavelmente inevitáveis.

Superfragmentação de parte da rocha desmontada

A superfragmentação ou pulverização da rocha afeta exclusivamente o imediato contorno do furo e se estende aproximadamente até uma distancia igual ao diâmetro do furo. A energia E_d gasta nesta pulverização pode ser considerada como uma energia gasta no esmagamento de uma rocha com resistência à compressão R_{cr}. Tal energia pode ser calculada com a expressão:

$$E_d = (H - B) \cdot 3{,}14 \cdot D_f \cdot h \cdot R_{cr} \qquad (MJ)$$

Onde:

H Altura da bancada, m

B Comprimento do tampão, m

D_f Diâmetro do furo

h Dilatação do furo, m (normalmente cerca de 5 mm)

R_{cr} Resistência à compressão da rocha, MPa

Resolvendo a expressão acima para rochas compactas ou homogêneos pode-se constatar que a energia gasta na pulverização situa-se ao redor de 1,5 a 2% da energia total transmitida à rocha.

Projeção acidental

O fenômeno da projeção acidental de fragmentos de rocha a grande distância durante as detonações é um fenômeno inevitável no desmonte de rocha com explosivos. O lançamento é causado pela rapidíssima passagem dos gases, no início da detonação, através das fraturas incipientes. Um eventual fragmento de rocha, capturado nestas fraturas, é lançado muito longe. As vezes até algumas centenas de metros. Todavia, o lançamento acidental requer uma fração insignificante da energia da explosão transmitida à rocha.

Deformação da rocha remanescente

Este fenômeno verifica-se atrás dos furos detonados até uma distância maior do que o afastamento, já que a pressão dos gases age em todas as direções. A rocha "in situ" é sujeita a deformações e fraturas até uma distância da carga igual a 2 - 3 vezes o afastamento. A partir desta distância a frente de impacto da detonação se transforma numa normal vibração elástica do maciço. A energia E_f gasta para a deformação da rocha remanescente pode ser calculada com a expressão:

$$E_f = A_n \frac{R_{tr}2}{J} \quad \text{(MJ)}$$

Onde:

A_n Volume de rocha afetada = 2 - 3 . A_r

A_r Volume de rocha desmontada, m³

R_{tr} Resistência à tração da rocha, MPa

J Módulo de elasticidade da rocha, MPa

Resolvendo a expressão acima com valores válidos para rochas, pode-se constatar que a energia gasta na deformação da rocha remanescente é

desprezível e situa-se ao redor de 0,05 a 0,1% da energia total transmitida á rocha.

Efeitos sísmicos

O efeito sísmico dura um tempo bem maior do que a duração dos efeitos de separação, fragmentação, lançamento etc. e aumenta com o aumento da distância. O efeito estende-se a um volume de rocha maior de alguns ordens de grandeza do volume de desmonte. A energia E_g absorvida pelo efeito sísmico pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$E_g = 4.\ 3{,}14^3 - R^2 - P_r - C - a^2.\ f^2 - t_v - 10^{-6} \qquad (Mj)$$

Onde:

R Distância entre a detonação e o ponto de registro, m
P_r Densidade da rocha, kg/m³
C Velocidade de propagação das ondas sísmicas, m/s
a Amplitude da vibração, m
f Freqüência da vibração s^{-1}
t_v Duração da vibração, s

Para rochas compactas e homogêneas, como o gnaisse ou o granito, a uma distância de 10 m do ponto de detonação, valem os seguintes valores médios:

- freqüência f 100 Hz
- amplitude média a 0,28 mm = $2{,}8.\ 10^{-6}$
- duração da vibração t_v 0,l s

Resolvendo com estes valores a expressão acima pode-se constatar que a energia gasta nas vibrações elásticas do maciço situa-se ao redor de 40% da energia do explosivo.

Ondas de choque no ar

Uma considerável parcela da energia de um explosivo é dispersada no ar em forma de ondas de diferentes comprimentos, audíveis ou não (ultra- e infra-sons). O período varia muito de acordo com o tipo de explosivo e com o seu confinamento, mas normalmente é da ordem de grandeza de alguns milisegundos. A frente de onda transmite a energia como uma carga dinâmica que pode alcançar valores de algumas atmosferas perto do local da detonação. As perdas na atmosfera da energia do explosivo transmitida à rocha podem ser estimadas (por diferença) ao redor de 37 - 38%.

- Balanço energético total

Resumindo o comportamento de um furo detonado deduzimos que a parcela de energia do explosivo transmitida à rocha distribui-se com boa aproximação conforme a listagem seguinte:

Efeitos desejados:

separação	<1 %
fragmentação	15 %
deslocamento	5-6%

Efeitos indesejados

super-fragmentação	1,5-2%
lançamento acidental	<1 %
deformação do maciço	<1 %
vibrações no maciço	40 %
perdas na atmosfera	37-38%

Frisamos novamente que a distribuição de energia listada acima refere-se exclusivamente à parcela de energia transmitida à rocha e não à energia total desenvolvida pelo explosivo.

Cálculo dos parâmetros do desmonte

- Razão de carregamento

Entre todos os efeitos desejados, a fragmentação é o mais importante em relação ao resultado do desmonte.

Para calcular a energia que deve ser transferida à rocha com a finalidade de produzir um certo efeito de fragmentação, é suficiente escrever (tendo em vista que a fragmentação absorve aproximadamente 15% da energia disponível):

$$E_t = \frac{Eb}{0,15} \quad \text{(MJ)}$$

Onde:

E_t Energia transferida à rocha

E_b Energia absorvida pela fragmentação

A formula geral para o dimensionamento dos parâmetros do desmonte pode portanto ser enunciada conforme a seguinte relação:

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot 0,15 \cdot E \cdot Q = A_r \cdot s \cdot E_{ss}$$

A razão de carga será:

$$c = \frac{Q}{A_r} = \frac{s \times E_{ss}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot 0,15 \cdot E} \quad \text{(kg/m3)}$$

Onde:

c Razão de carregamento, kg de explosivo/m³ de rocha

Q Carga de explosivo, kg

A_r Volume de rocha a ser desmontado, m³

s Novas superfícies criadas com a detonação, m²/m³

Valor estatístico: $s = 64/D_{max}$ sendo D_{max} a dimensão máxima aceitável dos blocos de entulho.

E_{ss} Energia especifica de fragmentação, valor obtido do consumo energético de britadores primários. E_{ss} varia entre 0,8 e $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ Mj/m2

η_1 Rendimento do explosivo em função da relação entre as impedanças do explosivo e da rocha:

$$\eta_1 = 1 - \frac{(I_e - I_r)^2}{(I_e + I_r)^2}$$

η_2 Rendimento do explosivo em função da defasagem entre o diâmetro do furo e o diâmetro do cartucho:

$$\eta_2 = \frac{1}{e^{Df/Dc} - (e - 1)}$$

0,15 Parcela da energia transmitida à rocha e utilizada na fragmentação

E Energia específica do explosivo, MJ/kg (Valor indicado pelo fornecedor)

A formula acima leva em consideração as características geomecânicas da rocha, as propriedades físicas do explosivo e a granulometria desejada no desmonte. De fato, o valor da razão de carregamento calculado acima é definido em função dos seguintes parâmetros:

características explosivo/rocha (η_l)

características geométricas da carga (η_2)

rendimento da detonação	(0, 15)
características do explosivo	(E)
características da rocha	(E_{ss})
grau de fragmentação desejado	(s)

Cálculo do afastamento x espaçamento

Referindo-se a uma carga de comprimento unitário, com cartuchos de diâmetro D_c e explosivo de densidade P_e, e prevendo uma furação com malha quadrada (que garante uma melhor homogeneidade de distribuição do explosivo e portanto uma granulometria mais uniforme do entulho), a razão de carregamento calculada com a fórmula do sub-item anterior pode ser expressa da seguinte forma:

$$c = \frac{Q}{A_r} = \frac{(D_c / 2)^2 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot P_e}{1 \cdot V^2} \quad (kg/m^3)$$

Consequentemente:

$$\mathbf{V = D_c \cdot \frac{(3{,}14 \cdot P_e)^{0,5}}{(4 \cdot c)^{0,5}}} \quad (m)$$

Evidentemente a relação afastamento V e espaçamento E pode ser variada, desde que o produto V x E seja sempre igual ao valor de V^2 calculado acima.

- Subfuração

Em todos os fogos com perfuração vertical, os furos terão um comprimento de 1/3 V abaixo do nível da praça (subfuração) para compensar o

engastamento e manter o plano da praça sempre no mesmo nível horizontal. Nos fogos com perfuração inclinada, a subfuração poderá ser proporcionalmente reduzida. Furos a 45º dispensam subfuração.

- Conclusões

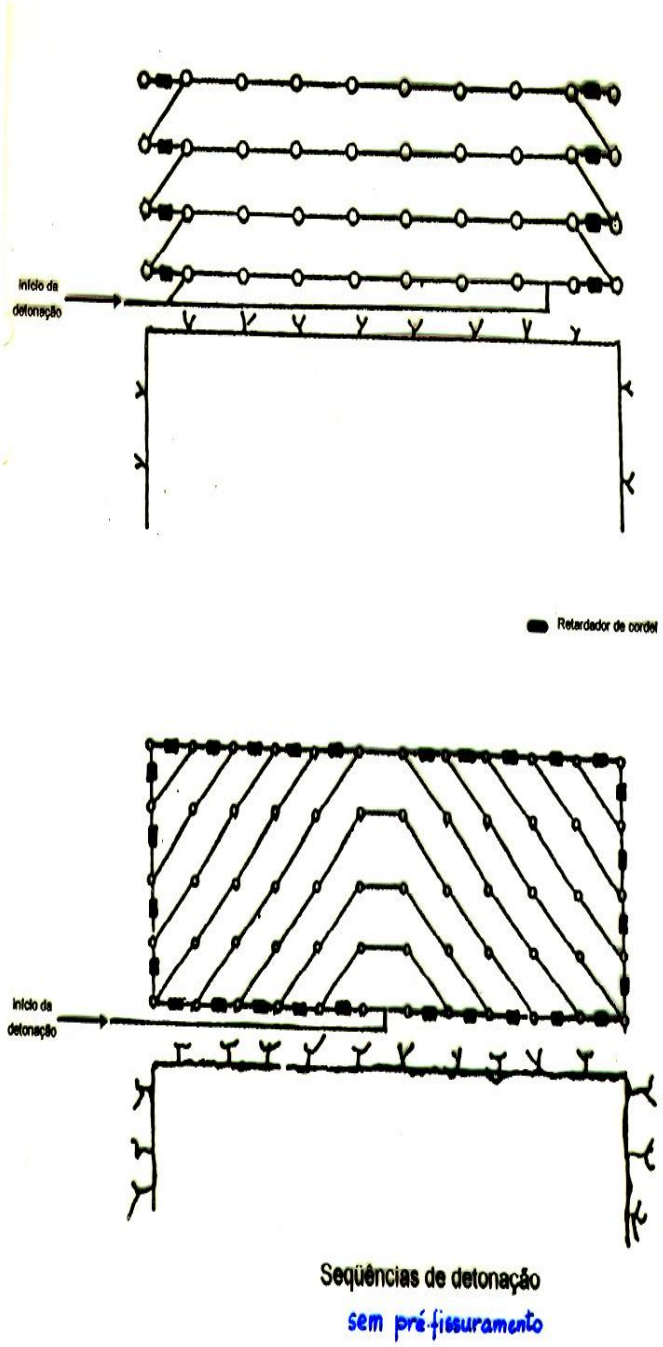
Como temos visto nos itens anteriores, os principais parâmetros de um desmonte em bancadas podem ser calculados com notável precisão a partir das propriedades físicas do explosivo e das características geológicas da rocha. O roteiro de cálculo acima indicado é facilmente programável num simples PC, por exemplo com programa Excell ou similar. Pode-se assim, em função de certas características geológicas, simular mudança do tipo de explosivo ou da malha de furação ou do diâmetro do furo até otimizar o resultado e a economia do desmonte.

Seqüência de detonação

Todos os furos da mesma fileira, com exceção dos furos laterais, podem ser detonados na mesma espera e os furos laterais na espera seguinte, para garantir a livre saída do entulho (Figura da página seguinte, desenho A). Querendo limitar o espalhamento do entulho poderá ser usado o esquema indicado na Figura da página seguinte, desenho B que dirige o entulho no sentido do centro da bancada.

Resultados do desmonte

Os resultados do desmonte podem ser modificados conforme as diferentes necessidades das obras, interferindo, quando possível, nos fatores indicados a seguir.



Seqüências de detonação

sem pré-fissuramento

Efeitos desejados

- Fragmentação

A fragmentação inevitavelmente aumenta na medida que aumenta o grau de diaclasamento da rocha. Também pode aumentar aumentando a razão de carga e/ou a força do explosivo. Indicativamente tem-se obtido os seguintes resultados em gnaisse compacto:

Razão de carga, kg/m³	0,20	0,30	0,40
Fragmentação, m³	1,0	0,25	0,10

Também, mantendo inalterada a área VE, a fragmentação diminuirá diminuindo o afastamento. Assim será possível obter blocos de grande

volume para obras especiais (pires de portos, por exemplo), diaclasamento permitindo. Nos fogos comuns de desmonte, obtém-se freqüentemente uma maior fragmentação no fundo dos furos (por causa da carga de fundo) e uma menor na parte superior (por causa do tampão). O empolamento ou o aumento do volume do entulho respeito ao volume detonado da rocha in situ é em média da ordem de grandeza de 45 a 50%.

- Lançamento

O lançamento do entulho é direitamente proporcional à sobrecarga de explosivo, como o grau de fragmentação. A tabela indica valores aproximados para o deslocamento do baricentro do entulho em função do excesso de carga:

Sobrecarga, kg / m³	0,05	0,10	0,15	0,20
Deslocamento, m	3,5	7,0	10	15

Efeitos indesejados

- Fogacho

Após o desmonte, os blocos maiores do entulho deverão ser ulteriormente fragmentados em função do volume da caçamba do equipamento de carregamento e do tamanho da boca do britador. Em geral, para esta operação, chamada de fogacho ou fogo secundário, os blocos são furados por 30 a 60 cm de profundidade com perfuratrizes leves. Utiliza-se ¼ a um cartucho inteiro de explosivo. Muito comum é também o "João de barro", colocando simplesmente alguns cartuchos de explosivo acima do bloco e cobrindo-os com barro. Atualmente utiliza-se rompedores hidráulicos de alta freqüência e de peso superior a 200 kg, montados na

extremidade da lança de equipamentos móveis tipo escavadeiras. A quantidade de fogacho deve ser reduzida ao mínimo, sendo o fogacho uma operação demorada, dispendiosa e freqüentemente perigosa, devido ao lançamento de fragmentos a grande distância. Este redução pode ser conseguida melhorando a precisão de furação, ou aumentando a razão de carga ou reduzindo a malha de furacão.

- Formação de repé

O repé é indicado na Fig. da Pág. 26. A formação do repé implica, para sua retirada, demorada e dispendiosa furação horizontal e detonação de levante. Estas operações corretivas podem ser executadas somente após a retirada completa do entulho, interrompendo o ciclo. O repé pode ser evitado melhorando a precisão de furacão, aumentando a subfuração ou diminuindo o afastamento

- Roubos

O roubo ou “back break” é também indicado na Fig. da Pág. 26. Pode ser causado por corte de furo (com risco de presença de explosivo no entulho). O roubo pode também ser causado pelo diaclasamento do maciço ou por excesso de carga na parte superior da coluna.

- Projeção acidental de fragmentos de rocha

O fenômeno da projeção acidental de fragmentos de rocha a grande distância durante as detonações é inevitável no desmonte com explosivos. Já ocorreram acidentes provocados por fragmentos de rocha projetados a 250- 300 m de distância. A projeção acidental é causada pela rapidíssima passagem dos gases, no início da detonação, através das fraturas incipientes

L.Redaelli

Tela metálica

Desmonte em Santos

Metró do Rio de Janeiro (Botafogo)

COBERTURAS DE FOGOS

no maciço rochoso. Um eventual fragmento de rocha capturado nestas fraturas é propulsionado muito longe. Em obras urbanas o fenômeno deve ser evitado a qualquer custo. Existem muitos métodos para evitar a projeção acidental. Para tal pode-se cobrir a área do fogo e a frente da bancada com tapetes feitos com cordas grossas entrelaçadas ou com tiras de pneus velhos. Podem também ser usadas toras de 2 a 3m de comprimento e com 15 a 20 cm de diâmetro, ligadas entre si por cabos de aço. Correntes de aço são também utilizadas formando cotas de malha.

- Problemas sísmicos

O desmonte de rocha em área urbana apresenta sérios problemas devido aos abalos sísmicos causados pelas detonações, sendo que

aproximadamente 40% da energia transferida do explosivo para a rocha é transformada em vibrações no maciço. Os três componentes das ondas sísmicas (longitudinal, transversal e vertical), a curta distância das detonações, se propagam quase com a mesma velocidade e a mesma freqüência, ambas propriedades características de cada tipo de rocha. Por exemplo os gnaisses ou os granitos sãos apresentam uma freqüência característica de 80 a 100 Hz e uma velocidade de propagação de ondas de 3.500 a 4.000 m/s. Como parâmetro de medida de possíveis danos às construções civis utiliza-se a velocidade de oscilação de partícula V_p. As Normas estabelecidas pela ABNT estipulam uma velocidade máxima de oscilação de partícula de 15 mm/s para evitar danos sísmicos em qualquer tipo de construção, indipendentemente da freqüência característica do maciço. Em outros países são aceitas velocidades de até 50 mm/s para maciços rochosos com altas freqüências (>80 Hz) e velocidades de 10 Hz s para maciços terrosos com baixas freqüências (<20 Hz). Note-se que as construções civis geralmente tem freqüências características baixas (<20 Hz) aumentando o risco de ressonância em maciços terrosos com baixas freqüências. V_p é uma função direta da quantidade de explosivo Q detonada numa espera e uma função inversa da distância D entre a detonação e o ponto de medida. A relação entre V_p, Q e D deve ser medida com ensaios sísmicos no local da obra, obtendo-se uma relação do tipo:

$$Q = \alpha V_p^{\beta} / D^{\gamma}$$

onde α, β e γ são constantes numéricas. Esta relação será usada em toda a obra para calcular a carga máxima permitida por espera.

Antes da execução dos ensaios sísmicos, a carga máxima que pode ser detonada por espera pode preliminarmente ser estimada com uma fórmula geral do tipo:

$$\mathbf{Q = K \cdot R^{3/2}}$$

Onde:

Q Carga máxima detonada por espera
R Distância detonação - estrutura
K Constante numérica, função de Vp

Conforme U.Langefors; "The Modern Technique of Rock Blasting".

Para Vp = 15 mm/s : (Conforme ABNT)
K ≅ 0,004

Para o desmonte a céu aberto, preliminarmente e antes da execução dos testes sísmicos, deverá ser elaborada uma Tabela carga – distância.

- Ondas de choque no ar

Em obras urbanas o ruído da detonação do cordel e das cargas é um notável inconveniente para os moradores sendo o fator psicológico muito relevante e as inúmeras queixas extremamente enervantes para os engenheiros responsáveis. Como indicado anteriormente, aproximadamente 38 % da energia do explosivo é dissipada no ar em forma de ondas de diferentes comprimentos, audíveis ou não (ultra- e infra-sons). O período varia muito de acordo com o tipo de explosivo e com o confinamento, mas é normalmente da ordem de grandeza de 2 a 4 ms. A frente de onda transporta a energia no ar como uma carga dinâmica que pode alcançar valores de algumas atmosferas perto do local da detonação. A quebra de vidros em janelas fechadas é um mal quase que inevitável quando as escavações se aproximam muito de construções civis. Como medida de precaução e de segurança, todos os moradores da vizinhança devem ser notificados para deixar as janelas abertas durante as detonações, que deverão sempre ser em horas fixas e pré-determinadas. Não existem meios para eliminar completamente a onda de choque no ar. Todavia a onda pode ser bastante reduzida recobrindo o topo da bancada, após concluídas todas as ligações do cordel, com material inerte como terra, areia ou argila.

O material é espalhado em duas camadas totalizando 0,5 m de espessura. A cobertura é estendida 1 a 1,5 m além da área dos furos. A primeira camada de 10 - 20 cm de espessura é espalhada manualmente recobrindo com muito cuidado todas as ligações dos cordéis. A segunda camada, mais espessa, é despejada com equipamento mecânico. A camada que recobre todos os cordéis, não somente evitará o lançamento acidental para cima de fragmentos de rocha, mas também reduzirá o nível de ruído no instante da detonação.

Fogo controlado do contorno

A técnica de corte das superfícies finais compreende os seguintes métodos:

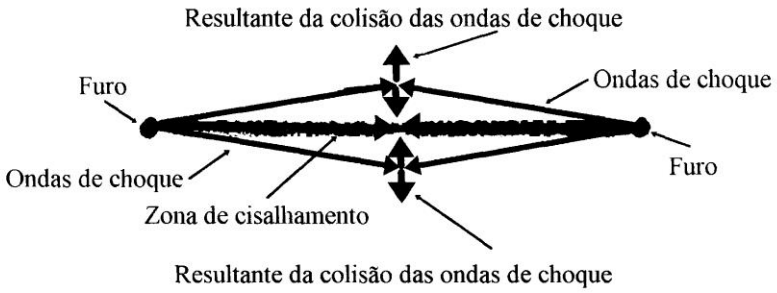
- Pré-fissuramento (presplitting)
- Fogo cuidadoso (smooth blasting)
- Perfuração em linha (line drilling)

Nas obras, os fogos cuidadosos de contorno são geralmente pagos por m² de superfície.

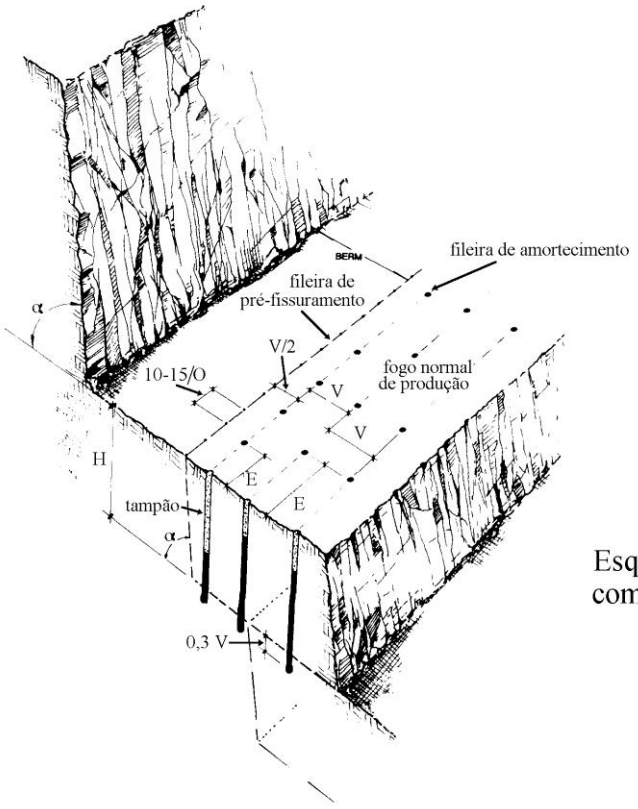
- Pré-fissuramento

O pré-fissuramento, que é o método mais comunemente utilizado para os fogos cuidadosos do contorno, consiste na criação de uma trinca plana entre os eixos dos furos que limitam a superfície final. Fig. 1.18. Esta trinca, criada pela detonação antecipada dos furos de contorno sobre o restante do fogo, não ocasiona fendas secundaria fora do seu plano. Este resultado é obtido furando com grande precisão e com um espaçamento entre os furos de 10 a 15 vezes o diâmetro dos furos. O carregamento é feito com pouco explosivo (não mais de 400 g / m² de superfície). O explosivo deverá ser regularmente distribuído ao longo dos furos com espaçadores. Todos os furos de pré-fissuramento devem ser detonado na mesma espera.

L.Redaelli



Princípio do pré-fissuramento



Esquema de desmonte
com pré-fissuramento

Pré-fissuramento

O resultado do pré-fissuramento pode ser observado somente após o fogo principal. Com o pré-fissuramento pode-se obter também uma discreta redução das ondas sísmicas.

- Fogo cuidadoso

De qualidade levemente inferior ao resultado do pré-fissuramento, o fogo cuidadoso do contorno tem as mesmas características do pré-fissuramento, com a diferença que é detonado juntamente com o fogo principal na última espera. Portanto o resultado pode ser observado no mesmo fogo. Com o fogo cuidadoso de contorno a redução das ondas sísmicas é muito pequena.

- Perfuração em linha

Consiste na perfuração de uma fileira de furos coplanares espaçados 2 a 4 vezes o diâmetro, deixados sem carga no desmonte do fogo principal. Os furos de desmonte mais próximos à fileira terão carga e afastamento 50% do normal. A fileira constitui um plano de fraqueza que o fogo principal pode quebrar. Devido à reflexão e interferência das ondas de choque nos furos, obtém-se uma boa proteção sísmica. A desvantagem do método é o número elevado de furos.

RETIRADA DO ENTULHO

A retirada do entulho a céu aberto após o desmonte da rocha, da frente da bancada até bota-fora, três equipamentos são os mais comunemente usados: Escavadeiras tipo "shovel" (pá carregadeira). São equipamentos de grande porte, de acionamento elétrico ou a diesel, com utilização de caçambas com capacidade para até 40 jd^3 e produtividade de até 5000 t/h. O acionamento da caçamba para escavação e descarga é feito por cabos. Esses equipamentos escavam o material situados à frente e acima de seu nível de base (piso ou praça), efetuando o carregamento do entulho em caminhões fora de estrada. São equipamentos muito pesados, montados sobre lagartas, e podem efetuar carregamentos de cerca de 5 a 7% de seu peso na

caçamba. Possuem capacidade de locomoção limitada, e alto custo de aquisição, compensado por sua longa vida útil.

Escavadeiras hidráulicas. São equipamentos similares às “shovel”, porém com acionamento da caçamba via sistemas hidráulicos, sem uso de cabos. Carregam de 8 a 11% de seu peso na caçamba, possuem custo de aquisição menor e mobilidade maior, mas apresentam vida útil inferior das escavadeiras tipo shovel.

L.Redaelli

Pá carregadeira

Escavadeira

Carregadeiras frontais sobre pneus. São equipamentos de grande mobilidade, de tamanhos e capacidade de carga variável. Apresentam custo de aquisição e vida útil inferior aos dois equipamentos supracitados.

Equipamentos de limpeza