

Sessão — dia 01/08/77

“MECÂNICA DE ROCHAS PRÁTICA”

Prof. Dr.
CARLOS DINIZ DA GAMA

Parte 1

ESCAVAÇÃO EM ROCHAS — PERFURAÇÃO

INTRODUÇÃO

Embora considerada por muitos a ciência básica da mineração moderna, a Mecânica das Rochas não tem tido a aplicação prática compatível com suas potencialidades.

Existe um nítido divórcio entre Mecânica Teórica e as suas possíveis aplicações na resolução de problemas de mineração, sendo evidente que ambos os domínios beneficiariam com um maior entrosamento de conceitos. Será necessário, para o interesse geral, que o mistério criado pelos teóricos de Mecânica de Rochas em torno de seus desenvolvimentos analíticos, assim como o desprezo com os práticos encaram essas complexas análises teóricas, desapareçam progressivamente, com o advento de uma era em que todos falem linguagem comum.

Nossa experiência tem demonstrado que muitas vezes o divórcio acima referido resume-se a um simples problema de semântica, mantido por pessoas que não estão interessadas no diálogo franco e aberto sobre questões tecnológicas.

É portanto com a intenção de quebrar essa barreira, que iniciamos esta série de artigos, visando à divulgação dos conceitos subjacentes ao progresso científico e tecnológico verificado recentemente em Mecânica das Rochas.

Dado que nas aplicações se pode dividir a atividade da Mecânica das Rochas em dois campos principais (o de fragmentar as rochas em suas jazidas naturais para a abertura de escavações, e o de manter o controle sobre as rochas situadas na vizinhança dessas escavações) orientaremos esta apresentação, em termos resumidos, nos seguintes itens:

- a) Escavações em rochas: Perfuração.
- b) Escavações em rochas: Desmonte com explosivos.
- c) Estabilização: de escavações a céu aberto.
- d) Estabilização de escavações subterrâneas.

Procuraremos tratar os temas em linguagem acessível, de forma a orientar a exposição no sentido de contribuir para a resolução dos pro-

blemas práticos de Mecânica das Rochas que são originados na indústria mineira.

A PERFURAÇÃO EM ROCHAS E SEUS MECANISMOS

A perfuração de rochas consiste fundamentalmente na sua fragmentação localizada, por meio de uma broca que entra em contato com a rocha do fundo do furo, a qual promove a abertura de um volume geralmente cilíndrico, de pequeno diâmetro comparado com a respectiva altura. Faz ainda parte da perfuração, a limpeza e remoção dos fragmentos, por meio da circulação de um fluido, que também diminui a temperatura das brocas.

A eficiência dessa fragmentação depende de vários fatores, entre os quais se salientam as propriedades mecânicas da rocha, o tipo de perfuratriz empregada, as pressões que atuam à profundidade do fundo do furo e as propriedades do fluido circulante.

Regra geral, quanto mais profundo é o furo maior é a energia necessária para fragmentar a rocha, devido às maiores pressões de confinamento em torno do fundo do furo, que provocam aumento na resistência e plasticidade da rocha.



Fig. 1

Os dois parâmetros mais importantes na perfuração são a velocidade de avanço (ou de penetração) e a energia específica. A primeira é diretamente proporcional ao volume da rocha fragmentado por unidade de tempo, e inversamente proporcional à área do furo.

Quanto à energia específica, ela pode-se definir pelo trabalho dispendido por unidade de volume de rocha perfurada, sendo tanto maior quanto menor for a área do furo. Por outro lado, a energia específica

aumenta com o torque atuante na broca e com a velocidade de rotação da mesma broca.

A fim de caracterizarmos melhor os parâmetros fundamentais da perfuração, faremos referência aos tipos de perfuratrizes mais usualmente empregadas na prática. Assim, podem-se definir 3 grupos distintos:

- a) Perfuratrizes por percussão.
- b) Perfuratrizes rotativas, com dentes de corte.
- c) Perfuratrizes rotativas de rolos tricônicas.

Complementarmente, podem-se citar as perfuratrizes de coroa de diamante e as modernas perfuratrizes vibro-rotativas, de comando hidráulico.

Na Fig. 1 encontram-se representados os mecanismos típicos da atuação das brocas, dessas perfuratrizes sobre a rocha.

As perfuratrizes percussivas, que ainda são as mais utilizadas, especialmente para a abertura de furos de pequeno diâmetro usados nos esquemas de fogo para a escavação de túneis, provocam nas rochas fraturas radiais que se propagam até à superfície do fundo do furo, originando pequenas escamas, conforme se representa na figura. Depois de cada impacto, a broca sofre uma rotação (geralmente de 30°) e atinge a rocha com nova percussão.

Ao número de impactos por unidade de tempo dá-se o nome de frequência, sendo que quando ela aumenta, faz aumentar linearmente a velocidade de penetração da broca. Analogamente esta velocidade é diretamente proporcional ao volume de rocha fragmentado por cada impacto.

A experiência confirma que a velocidade de avanço das perfuratrizes percussivas é proporcional à potência mecânica fornecida à perfuratriz, enquanto que o volume de rocha fragmentado na perfuração é proporcional à energia do sistema de perfuração.

No que se refere às perfuratrizes rotativas que possuem dentes de corte (geralmente utilizadas em rochas brandas e solos), sabe-se que a sua velocidade de penetração é diretamente proporcional ao número de dentes e à profundidade de corte de cada um deles. Também se constatou que para aumentar essa velocidade deve-se atuar na velocidade de rotação da broca e no torque aplicado, pois estes parâmetros são aproximadamente proporcionais aquela velocidade.

Frequentemente, as perfuratrizes rotativas com rolos cônicos, habitualmente usadas em rochas semi-duras e duras para abrir furos de diâmetros superiores a 6" (15 cm), possuem velocidades de penetração diretamente

proporcionais ao volume da rocha fragmentada pelo contacto de cada rolo, e ao número de contactos por revolução de perfuratriz.

Um fator importante na perfuração é o peso exercido pela coluna da perfuração sobre a broca de rolos cônicos, sabendo-se que a velocidade de penetração aumenta com o quadrado do peso da coluna dividido pelo diâmetro do furo. Há também evidência que essa velocidade é inversamente proporcional ao quadrado da resistência na rocha.

Embora a velocidade de penetração seja um bom índice para avaliar a eficiência de uma perfuração em rocha, existem outros índices também utilizados para esse fim, como sejam a energia consumida, o desgaste das brocas e o custo. Este último é influenciado pelos 3 anteriores, sendo normalmente exigido um equilíbrio entre estes para que se alcance um custo mínimo de perfuração.

DUREZA, ABRASÃO E PERFURABILIDADE DAS ROCHAS

Após uma descrição resumida das correlações existentes entre os parâmetros fundamentais da perfuração e as características mecânicas do sistema (energia, potência, tipo de broca, etc.) faremos referência às propriedades das rochas que se admite influenciarem mais diretamente o fenômeno.

Atendendo ao fato de ser frequente haver confusões relativamente ao significado daqueles conceitos, será conveniente proceder de início à sua definição. Assim, considera-se *dureza* de uma rocha como a resistência por ela oferecida à penetração de qualquer ferramenta, enquanto que a *abrasão* se refere à resistência das rochas às ações de desgaste, seja em contato com metais ou com quaisquer outros materiais, inclusive a própria rocha.

Estas duas propriedades, assim como a perfurabilidade (que se pode definir como a resistência que a rocha oferece à penetração de uma broca em condições padrão), dependem da natureza e distribuição dos componentes minerais das rochas, e também do tipo de ligações intergranulares.

Existem numerosos testes para a determinação destas propriedades, os quais variam com o organismo que os estabeleceram pela primeira vez, havendo até no mesmo país organismos diferentes propondo testes distintos para determinação das mesmas propriedades.

Em vista dessa diversidade de padronização, a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, elaborou recentemente, através da sua Comissão de Testes Laboratoriais, uma norma para a determinação da dureza, abrasividade e perfurabilidade das rochas.

Nesse documento após um exame descritivo dos vários métodos conhecidos, são propostos os seguintes equipamentos para a avaliação dessas propriedades:

Dureza: Martelo de impacto tipo Schmidt e Escleroscópico Shore, tipo C.2
Abrasividade: Teste Los Angeles

Perfurabilidade (por percussão): Aparelho para o ensaio de impacto em agregados, tipo Protodyakonov modificado.

As respectivas especificações constam de documentos publicados para a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas.

Assinalemos que a dureza Schmidt e os dados de abrasividade medidos através do processo Taber modificado, permitiram desenvolver um índice de rochas que se correlacionam muito bem com a "cavabilidade" dos maciços rochosos, ou seja, com a utilização de máquinas rotativas do tipo "Shield" para a escavação de túneis e poços. Tal índice, que Tarkoy designou por *dureza total*, é igual ao produto da dureza medida pelo processo Schmidt, pela raiz quadrada do valor da abrasividade determinada pelo aparelho de Taber. Além de ser possível classificar os maciços rochosos segundo valores da dureza total (como refere Merrit), verifica-se que esta propriedade varia inversamente com a velocidade de penetração ou de avanço de túneis escavados por máquinas "Shield".

Estas tentativas de correlação entre os parâmetros que caracterizam a natureza mecânica das rochas e as especificações dos equipamentos de perfuração são as contribuições mais diretas da Mecânica de Rochas para a otimização dos trabalhos de perfuração.

INTERAÇÃO ENTRE AS BROCAS E A ROCHA

As relações qualitativas a que referimos anteriormente, estabelecem as variações típicas entre as propriedades da rocha e as características dos equipamentos de perfuração. A fim de estudar a influência de umas e outras na eficiência das operações de perfuração, numerosas pesquisas têm sido realizadas para conhecer melhor o problema da interação entre rocha e broca. Em certos ensaios laboratoriais, a ferramenta de perfuração é simulada por meio de cunhas metálicas exercendo esforços de impacto ou de rotação com características padronizadas, de modo que se obtêm correlações importantes com grande interesse prático.

Uma dessas correlações é estabelecida na perfuração por percussão, entre a força normal exercida sobre a rocha e a penetração da boca (ver fig. 2).

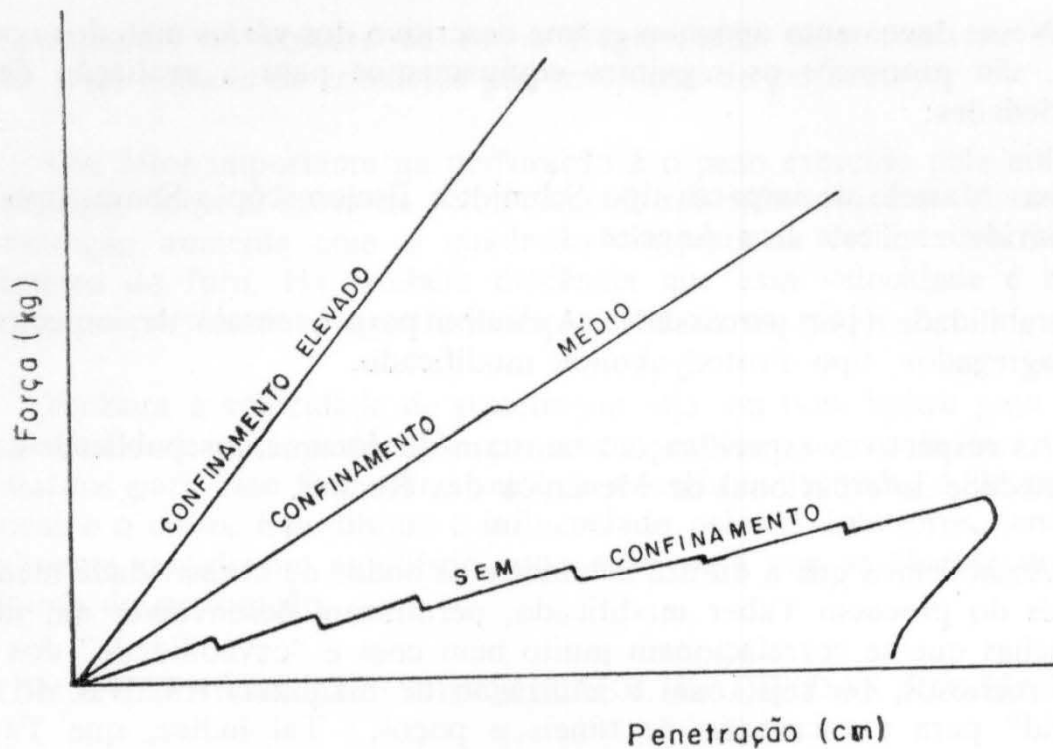


Fig. 2

Pode observar-se neste diagrama (devido a GNIRK e CHEATHAM) que quando o fundo do furo não se encontra confinado, ou a pressão nele atuante é aproximadamente igual à pressão atmosférica (caso dos furos pouco profundos) a rocha rompe em regime frágil, dando origem a uma curva irregular em virtude das discontinuidades que aparecem quando cada fragmento é destacado. Quando a pressão do fundo aumentar, as irregularidades na curva diminuem, embora aconteçam pequenas discontinuidades na força aplicada. Em regime de altas pressões de confinamento (grandes profundidades) a rotura da rocha tem lugar em regime plástico, sem formação de fragmentos ou escamas que se destacam, dando origem a uma característica força-penetração aproximadamente linear, a qual revela, contudo, que são necessárias forças de penetração mais elevadas para conseguir-se os mesmos avanços da broca que nas situações de baixo confinamento.

Um dos fatores principais nessa interação é a composição e densidade do fluido de circulação. O peso da coluna de fluido exerce-se sobre o fundo do furo, modificando o regime de rotura da rocha de acordo com o esquema da figura 2.

Uma importante conclusão prática daí resultante, é a que é sempre conveniente perfurar com injeção de ar, a fim de melhorar os rendimentos de perfuração, embora muitas vezes essa prática seja prejudicada pela produção de grande quantidade de poeiras, especialmente nos ambientes subterrâneos, onde é muitas vezes proibida.

É fato conhecido por todos que as velocidades de perfuração diminuem com a profundidade, mesmo sem considerar o desgaste das brocas. Tal ecrécimo pode ainda ser explicado (além da já mencionada subida da pressão de confinamento) pelo aumento que sofrem as resistências das rochas quando submetidas a confinamentos crescentes. Este problema foi estudado em detalhe por Murray e Cunningham, com os ensaios de laboratório executados com uma perfuratriz dotada de uma broca de 3,2 cm de diâmetro, que exercia um peso de 500 kg sobre o fundo do furo e rodando com a velocidade de 50 r.p.m.

Os resultados dessa pesquisa encontram-se representados na Fig. 3, para três tipos de correntes de rochas.

Verifica-se portanto que a velocidade de penetração aumenta com a diminuição da resistência à compressão das rochas, mas decresce, para

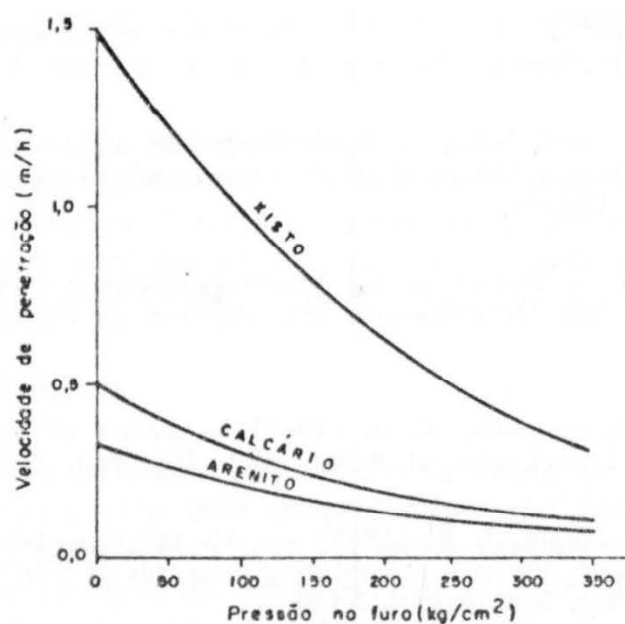


Fig. 3

cada tipo de rocha, com a pressão de confinamento exercida sobre a base do furo.

Estas constatações permitem deduzir quais serão as características mecânicas mais aconselháveis para a perfuratriz que se pretenda utilizar em determinado tipo de rocha e para certas condições de profundidade (ou confinamento) dos furos. Tal contribuição de mecânica das Rochas para a otimização dos trabalhos de perfuração é de grande valia no planejamento desses trabalhos, assim como para a adaptação dos parâmetros

mecânicos às variabilidades do material rochoso e às condições reais de perfuração. O conhecimento, ainda que qualitativo, das correlações entre umas e outras possibilita a tomada consciente de decisões e estimula a pesquisa constante das circunstâncias que conduzem à melhor eficiência das operações de perfuração em rochas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fairhurst, C.* (1961) Wave Mechanics of Percussive Drilling. Mine & Quarry Engineering, March 1961.
- Maurer, W. C.* (1967) — The State of Rock Mechanics Knowledge in Drilling. 8 th Symposium on Rock Mechanics Ed. Aime, New York.
- Schmidt, R. L.* (1972) — Drillability Studies: Percussive Drilling in the Field U. S. Bureau of Mines. Report of Investigations 7684. Washington.
- Selim, A. A. and Bruce, W. E.* (1970) — Prediction of Penetration Rate for Percussive Drilling. In "Surface Mining". Ed. E. P. Pfeleider AIME. New York.
- Tarkoy, P. J.* (1973) — A Study of Rock Properties and Tunnel Boring Machine Advance Rate in two MICA SCHIST Formation. 15 th Symposium on Rock Mechanics. South Dakota.
- Merrit, A. H.* (1974) — Tunnel Boring Machines-Geologic Control. Panel Contribution to Theme VII. II Congresso Internacional de Geologia de Engenharia. São Paulo.
- Murray, A. S. and Cunningham, R. A.* (1965) — Effect of mud column pressure on drilling rate. Transactions of AIME. Vol. 204, pág. 196-203.
- Gnirk, P. F. and Cheatham, J. B.* (1965) — An experimental study of single bit tooth penetration into dry rock at confining pressures of 0 to 5,000 p.s.i. Transactions of AIME, vol. 234, pág. 117-130.

RESUMO

Na segunda parte desta série de artigos sobre Mecânica de Rochas Prática abordaremos a operação mais importante da escavação em rocha: O desmonte com explosivos.

Embora no estado atual dos conhecimentos seja possível projetar cientificamente trabalhos de desmonte, a verdade é que se faz reduzida aplicação prática da teoria dos mecanismos de atuação dos explosivos no interior das rochas, sendo a maioria dos desmontes estabelecida por métodos empíricos.

Visando a divulgação dos conceitos de Mecânica de Rochas aplicáveis aos desmontes com explosivos (capítulo hoje designado por Dinâmica de Rochas) procuraremos ilustrar os aspectos fundamentais que surgem na atividade do engenheiro preocupado com a resolução de problemas práticos neste domínio, oferecendo assim contribuições para a perspectiva otimização.

I — INTRODUÇÃO

Os trabalhos de escavação em rocha visam geralmente o aproveitamento do espaço aberto pela própria escavação (caso de túneis, canais, poços, etc. . .), e/ou a utilização da rocha fragmentada para fins construtivos, ou para a extração de minérios. Em qualquer dos casos, a escavação pode ser considerada essencialmente como uma operação de fragmentação de rochas, localizadas na posição da sua jazida natural, operação essa que é normalmente complementada por etapas de carregamento e transporte do material fraturado, e eventualmente por britagem e moagem do mesmo.

Os processos tecnológicos disponíveis para realizar a fragmentação das rochas em trabalhos de escavação são variados e dependentes de numerosos fatores.

Como é evidente, o fator mais importante é a natureza mecânica do próprio terreno que se pretende escavar. Ainda não se encontram cientificamente estabelecidos quais os parâmetros que influenciam mais diretamente a resistência dos terrenos às ações de penetração de ferramentas

e a maior ou menor dificuldade de escavação. Sabe-se que tal resistência aumenta com o módulo de elasticidade do terreno, com a sua resistência à compressão uniaxial, a sua densidade, coesão e ângulo de atrito interno.

Uma maneira expedita de incluir os efeitos dessas várias grandezas consiste em medir a velocidade de propagação das ondas sísmicas através do terreno em questão, havendo hoje numerosos ábacos e diagramas que caracterizam o intervalo de valores em que determinado tipo de equipamento pode atuar adequadamente na escavação mecânica.

De um modo geral, admitem-se os seguintes intervalos de velocidades sísmicas:

Até 500m/s — métodos manuais ou mecânicos de desmonte

De 500m/s a 2.000m/s — terreno escarificável

Superior a 2.000m/s — terreno não escarificável

No terceiro destes grupos inclui-se a maioria das rochas e maciços perfuração e explosivos, ou métodos especiais de escavação, que recebem o nome genérico de métodos exóticos de desmonte.

Na Tecnologia atual, não existe ainda substituto economicamente viável para os explosivos no desmonte de rochas duras, não obstante variados métodos tenham sido testados e continuem a ser aperfeiçoados. A utilização de máquinas rotativas para a escavação de túneis circulares em rocha branda e medianamente dura é já competitiva com os processos convencionais de desmonte, mas ainda não se reconhece tal competição para rochas duras.

Um recente estudo do U.S. Bureau of Mines (1) revela os diferentes métodos que têm sido extensivamente pesquisados para o desmonte de rochas duras (em especial nos trabalhos de abertura de túneis). Tais métodos são classificados em dois grupos:

- 1 — Técnicas novas ou exóticas: térmica, hidráulica, combinação de ambas ou impacto de projéteis.
- 2 — Aplicações inovadoras de fontes convencionais de energia: explosivos e energia mecânica.

Essa pesquisa, que foi complementada pelo estudo de novos processos de carregamento e movimentação dos escombros resultantes dos desmontes, permitiu concluir que, no estado atual da tecnologia, o tópico 2 continua a merecer maior interesse prático do que 1.

Também na Suécia o problema tem sido cuidadosamente analisado, mostrando Johansson e Persson (2) que enquanto os custos de escavação,

com explosivos, de rochas duras, pouco se alteram com o aumento da resistência mecânica das rochas, eles sobem consideravelmente quando se empregam máquinas perfuratrizes de grande diâmetro. Estas últimas são também muito mais sensíveis em relação à abrasividade das rochas, do que os custos do desmonte com explosivos.

Comparando a escavação de túneis em rocha dura pelos dois métodos, os referidos autores realçam mais outras vantagens apresentadas pelos explosivos: consumos de energia na relação 1/12,5, velocidades médias de avanço na relação 10/7,5 e custos de escavação por m³ cerca de 10 vezes menores.

Essa comparação torna-se ainda mais favorável aos métodos convencionais quando se trata de escavações a céu aberto, onde o custo de desmonte por m³ é em média 10 vezes menor do que em subterrâneo, para o mesmo tipo de rocha.

Por estes motivos, as técnicas de desmonte de rochas com perfuração e uso de explosivos continuarão provavelmente por grande número de anos a dominar o panorama das escavações em rocha dura. Consequentemente, é vantajoso que sejam melhor conhecidos os mecanismos da fragmentação das rochas submetidas à atuação dos explosivos, pois só dessa forma serão melhorados os rendimentos de utilização dos explosivos industriais e minimizados os custos operacionais de escavação.

II — REGRAS FUNDAMENTAIS PARA O PROJETO DE DESMONTES DE ROCHA COM EXPLOSIVO

A conjugação de estudos teóricos ⁽³⁾ com a atividade prática permite-nos estabelecer uma sequência de fases principais para o projeto racional de desmontes de rocha.

Tais fases são listadas em seguida, passando-se depois em revista os aspectos mais importantes de cada uma delas, e referindo-se especialmente os tópicos relacionados com Mecânica de Rochas Prática:

1 — Estabelecimento da produção e da fragmentação pretendidas, nomeadamente do tamanho máximo dos blocos a obter após o desmonte.

2 — Fixação preliminar dos parâmetros geométricos do esquema de fogo, atendendo às propriedades mecânicas da rocha e à compartimentação do maciço rochoso.

3 — Escolha criteriosa do tipo de explosivo e do diâmetro das cargas.

4 — Seleção dos equipamentos de perfuração, carregamento e transporte para satisfação dos requisitos de produção, ou ajustamento destes (e da fragmentação) aos equipamentos existentes.

5 — Definição do método de escorvamento e da ordem da iniciação das cargas.

6 — Ajustamento dos parâmetros do esquema de fogo em função de fatores ambientais (vibrações, lançamento, sopro, sobrefaturação e estabilidade da rocha remanescente).

7 — Análise econômica do sistema, visando a minimização de custos globais e procedendo a ajustamentos complementares.

8 — Criação e manutenção de condições de segurança para a execução do trabalho.

II-1 — PRODUÇÃO E FRAGMENTAÇÃO PRETENDIDAS

Qualquer trabalho de desmonte de rocha deve possuir especificações bem definidas, com metas estabelecidas dentro de determinados prazos de execução.

Compete ao projetista averiguar primeiramente da realidade dessas metas e em seguida desenvolver os estudos necessários à satisfação de tais objetivos.

Em geral, estes objetivos são expresos sob a forma de uma certa produção (diária ou mensal) a atingir, e ainda de especificações sobre a fragmentação pretendida, de modo a garantir que a granulometria da rocha desmontada possa obedecer adequadamente ao propósito da escavação.

Com respeito à produção desejada, deverão prever-se desmontes em quantidade suficiente para exceder (em pelo menos 10%) os requisitos mínimos de produção, a fim de compensar-se quaisquer irregularidade ou paralizações acidentais dos trabalhos. Por exemplo, em mineração a céu aberto é usual estabelecer-se uma produção com avanço de 30 dias em relação às necessidades, o que equivale a manter um estoque de material correspondente à produção mensal da mina.

Os quantitativos de produção influenciam diretamente as dimensões dos esquemas de fogo, ou seja, no caso mais comum dos desmontes em bancadas, o tamanho das três arestas principais do sólido que constitui o volume de rocha a desmontar (altura, comprimento e espessura da bancada).

Como a altura desta é geralmente constante, sendo estabelecida em função dos equipamentos de perfuração e de carregamento e da forma como é espalhado o produto desmontado, resta ao projetista atuar sobre as outras duas dimensões do volume da bancada. A espessura não deve ser inferior a um dado valor, a fim não provocar problemas aos equipamentos de carregamento, limpeza e transporte, e deve também ser limitada para que não origine taludes finais da escavação pouco inclinados, que na mineração a céu aberto são responsáveis por elevadas relações estéril/minério.

Por estas razões, o comprimento da frente da bancada possui maior grau de liberdade quanto à sua dimensão, sendo habitualmente o parâmetro escolhido para garantir um volume de rocha fraturada de acordo com as especificações.

Em certos casos, todavia, quando os desmontes não são feitos em bancadas sobrepostas, a altura da única bancada em lavra pode ser variável, de maneira a satisfazer os requisitos de produção sem ser necessário aumentar exageradamente as dimensões da área a desmontar.

O outro ítem a estabelecer "a priori" nas escavações de rocha com explosivo, é o grau de fragmentação desejado para o material desmontado.

Com efeito, o grau de fragmentação dos blocos de rocha desmontada interfere na eficiência (e no custo) das operações subsequentes do des-

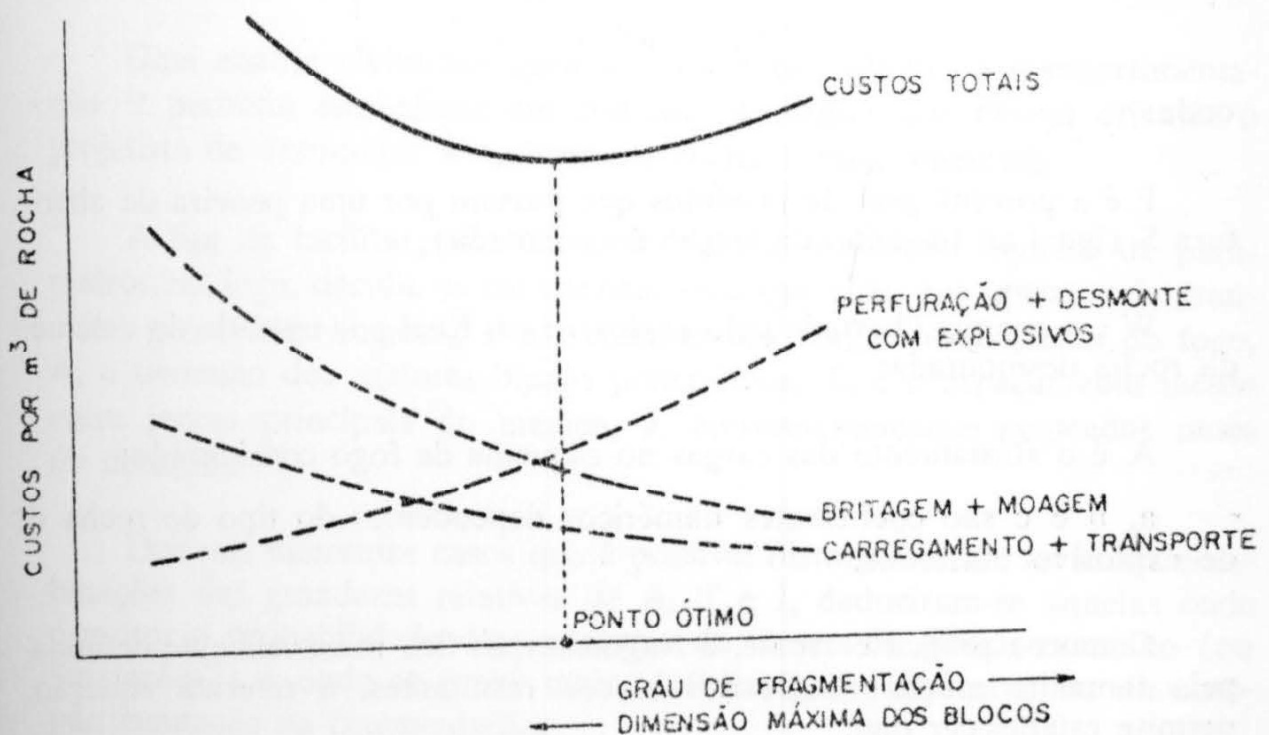


Fig. 1

monte, assim como é diretamente afetado pela malha de perfuração e pela quantidade de explosivo consumido. Daí o considerar-se muito ilustrativo expressar o critério de otimização do desmonte (ou seja, de minimização de custos totais) em função do grau de fragmentação, conforme se representa na figura 1.

Conhecido em cada caso o grau de fragmentação ótimo (ou o máximo tamanho dos blocos) correspondente ao custo total mínimo, deve-se planejar o esquema de fogo de modo a tentar obtê-lo com certa margem de certeza.

Este aspecto ainda se encontra mal definido na tecnologia atual, dados os numerosos fatores que influenciam a distribuição de tamanhos dos blocos resultantes de um esquema de fogo.

Poderemos dividir esses fatores em dois grupos distintos: os resultantes da distribuição das cargas explosivas no interior do volume e desmontar (incluindo as influências do tipo de rocha e de explosivo, assim como a sequência dos disparos) e os provenientes do estado de compartimentação o maciço rochoso.

Sobre o primeiro grupo, variados estudos laboratoriais e de desmontes industriais ⁽³⁾ levaram a admitir que a curva granulométrica dos fragmentos resultantes de um desmonte pode ser representada aproximadamente pela equação geral:

$$P_s = \alpha W^b \left(\frac{S}{A} \right)^c$$

onde:

P é a porcentagem de produtos que passam por uma peneira de abertura S (igual ao tamanho da fração fragmentada);

W é a energia libertada pelo explosivo em Kcal por unidade de volume da rocha desmontada;

A é o afastamento das cargas no esquema de fogo considerado;

a, b e c são coeficientes numéricos dependentes do tipo de rocha e de explosivo utilizados.

Como na prática corrente, a fragmentação fica razoavelmente definida pelo tamanho máximo S_{max} , dos blocos resultantes, a referida equação permite estabelecer que:

$$S_{max} = \frac{A}{a^{1/c} W^{b/c}}$$

Para aplicação destas relações torna-se necessário avaliar as constantes a , b e c , realizando previamente desmontes experimentais no mesmo tipo de rocha e com idêntico explosivo, onde se procede a determinações granulométricas após a fragmentação.

Em seguida, compete ao projetista estudar a melhor disposição das cargas explosivas no interior do volume de rocha a desmontar, de forma que a energia W libertada pela detonação satisfaça à condição interior.

Como é evidente, a metodologia acabada de anunciar aplica-se a desmontes executados sobre rochas homogêneas e contínuas, visto que não foi ainda considerada a influência da compartimentação geológica.

Quando esta existe (e isso acontece na maioria dos casos) é indispensável introduzir a sua presença na previsão da fragmentação, em virtude de as descontinuidades dos maciços rochosos serem responsáveis por distribuições irregulares da energia explosiva, quer absorvendo ou dispersando as ondas compressivas, resultantes da detonação, quer deixando escapar os gases da explosão através de fendas pré-existentes na vizinhança dos furos.

Nessas circunstâncias, pode acontecer que a compartimentação do maciço seja nalguns casos mais influente para a fragmentação, do que a própria ação do explosivo.

Uma análise elaborada para atender a este efeito da compartimentação ⁽⁴⁾ permitiu estabelecer um conjunto de regras que devem orientar o projetista de desmontes a realizar em rocha compartimentada.

A fim de facilitar tal análise, reduzindo o elevado número de parâmetros em jogo, decidiu-se caracterizar essa operação por apenas três grandezas geométricas lineares: o afastamento das cargas no esquema de fogo, A , o tamanho dos maiores blocos pretendidos, T , e o espaçamento médio entre juntas principais do maciço, J , convenientemente mapeadas antes do desmonte.

Dos seis diferentes casos que é possível distinguir entre as várias combinações das grandezas relativas de A , T e J , deduziram-se aquelas onde é menor a probabilidade de ocorrência de blocos de grande tamanho (ou "matacões") e onde se prevê maior influência do explosivo ou da compartimentação na fragmentação.

A tabela seguinte resume tais casos.

N.º	Valores relativos de A, T e J			Quantidade de matações (blocos > T)	Influência do explosivo	Influência da Compartimentação
	Maior	Inter-médio	Menor			
1	A	T	J	pequena	pouca	muita
2	A	J	T	grande	pouca	muita
3	T	A	J	pequena	pouca	muita
4	T	J	A	pequena	muita	pouca
5	J	A	T	média	muita	pouca
6	J	T	A	pequena	muita	pouca

Verifica-se que o primeiro caso é o mais favorável, porque o maciço apresenta fraturamento importante, com um espaçamento médio entre juntas que é menor do que o tamanho máximo dos blocos desejados. Tal situação conduz a uma decisiva influência da compartimentação sobre a fragmentação, o que dá origem a baixos consumos específicos de explosivo.

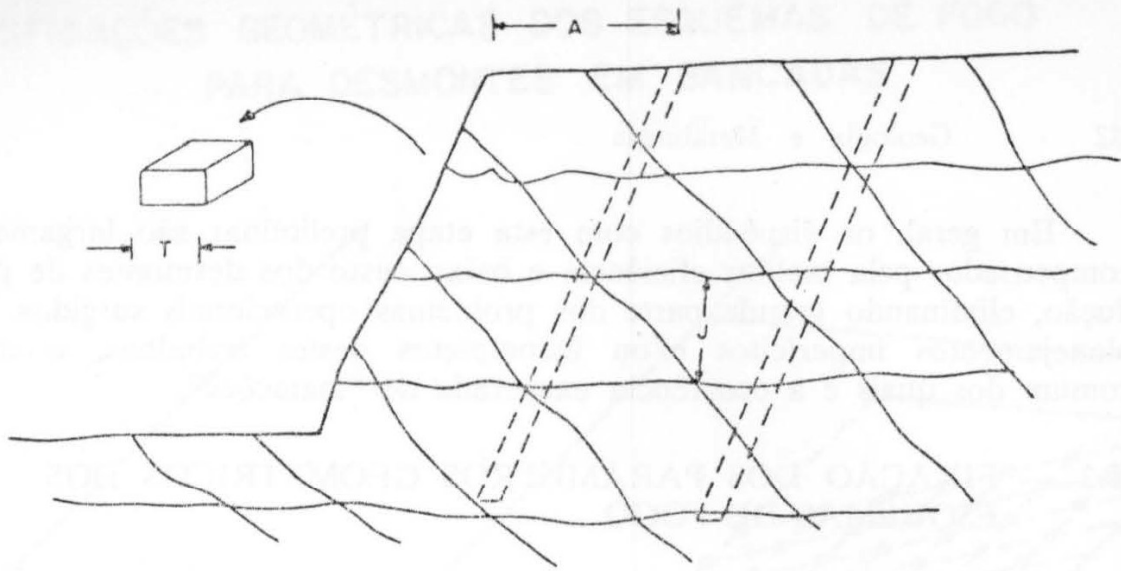
Todavia, nem sempre acontece essa circunstância feliz, em virtude de o espaçamento J ser uma grandeza não controlável no desmonte. Os restantes cinco casos traduzem essa variabilidade de situações, levando a concluir que o efeito da compartimentação é preponderante sobre a fragmentação quando $A > J$, acontecendo o contrário (isto é, efeito preponderante do explosivo) sempre que $A < J$.

A apreciação das diversas hipóteses possíveis, que aliás resultou do estudo analítico de numerosos desmontes reais ⁽⁵⁾ levou ao desenvolvimento de um fluxograma com a metodologia sugerida para o projeto desta operação, o qual se apresenta na Figura 2.

Pode portanto concluir-se que a fase de planeamento de um desmonte, tendo em vista a obtenção de uma fragmentação pré-estabelecida, é uma tarefa complexa, necessitando de uma metodologia própria, baseada no levantamento de dados de natureza diversa (geológicos, técnicos e económicos) que são conseguidos de preferência numa série de desmontes experimentais.

Especificamente, são objetivos concretos da fase de desmontes experimentais, os seguintes:

- Escolha criteriosa do explosivo.
- Estabelecimento dos parâmetros do esquema de fogo.
- Ajustamento dos esquemas à litologia.
- Previsão da fragmentação a obter no desmonte real.



A - Afastamento das cargas
 T - Tamanho dos maiores blocos pretendidos
 J - Espaçamento médio entre juntas abertas

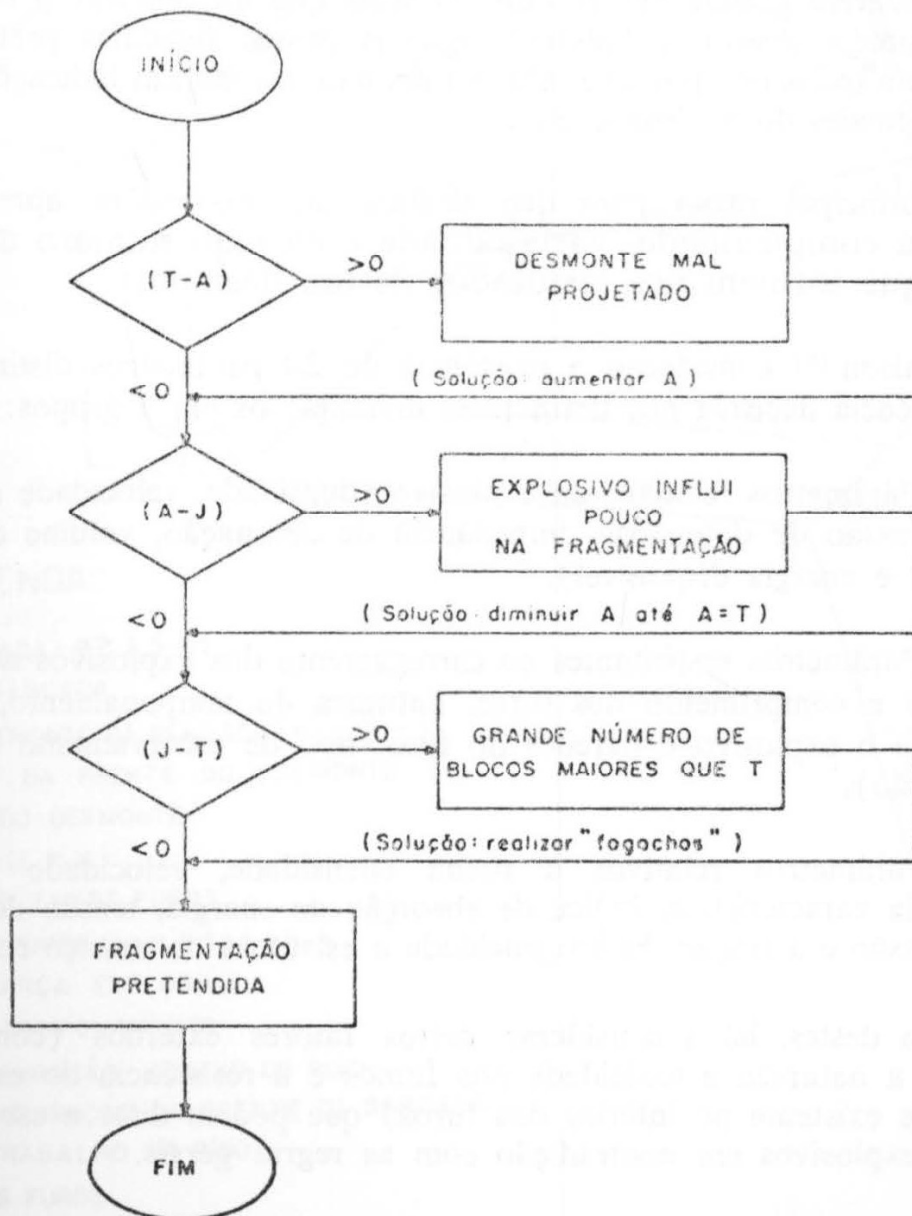


Fig. 2

Em geral, os dispêndios com esta etapa preliminar são largamente compensados pela melhor eficiência e baixo custo dos desmontes de produção, eliminando grande parte dos problemas operacionais surgidos por planejamentos imperfeitos e/ou incompletos destes trabalhos, o mais comum dos quais é a ocorrência exagerada de "matações".

II-2 — FIXAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DOS ESQUEMAS DE FOGO

O dimensionamento dos esquemas de fogo tem sido elaborado por diversas fórmulas envolvendo os respectivos parâmetros geométricos, algumas com certo fundamento científico, mas quase todas baseadas em relações empíricas.

Existem também ábacos e até réguas de cálculo construídos para o mesmo fim, mas quase todos estes métodos apresentam o inconveniente de desprezarem grande número de variáveis que influenciam o fenômeno de desmonte. Assim, é habitual algumas dessas fórmulas pretenderem aplicar-se a todos os tipos de rocha, outras não introduzem indicações sobre as propriedades do explosivo, etc..

A principal razão para que existam tais expressões aproximadas deve-se à complexidade, variabilidade e elevado número de parâmetros que influem nos resultados de um desmonte.

Atchison ⁽⁶⁾ considerou a existência de 20 parâmetros distintos que tem influência decisiva nos desmontes, dividindo-os em 3 grupos:

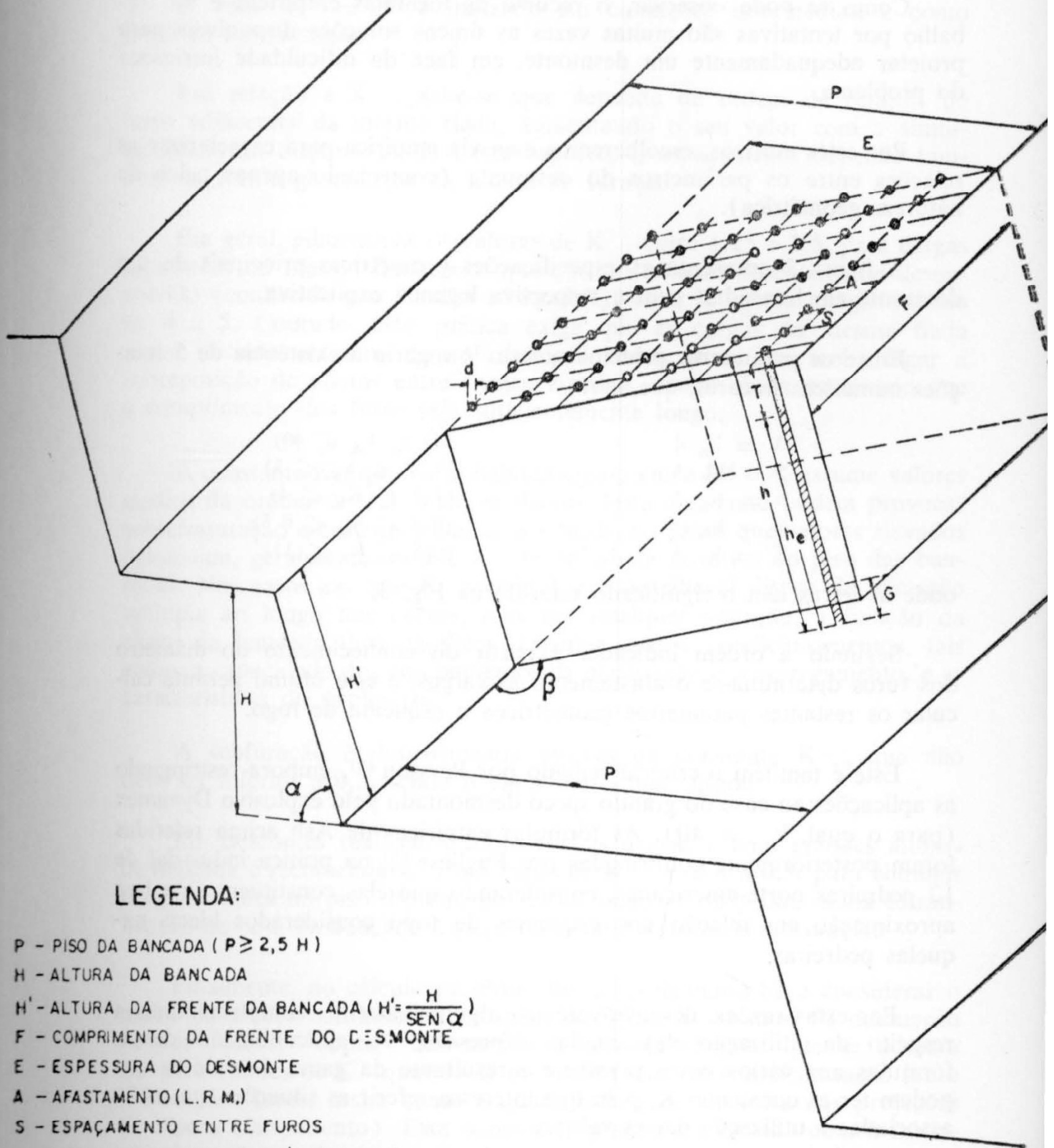
a) Parâmetros relativos ao explosivo (densidade, velocidade de detonação, pressão de detonação, impedância de detonação, volume de gases libertados e energia disponível).

b) Parâmetros respeitantes ao carregamento dos explosivos nos furos (diâmetro e comprimento dos furos, natureza do tamponamento, espaço livre entre o explosivo e paredes do furo, tipo de escorvamento e ponto de iniciação).

c) Parâmetros relativos à rocha (densidade, velocidade sísmica, impedância característica, índice de absorção de energia, tensão de rotura à compressão e à tração, heterogeneidade e estrutura do maciço rochoso).

Além destes, há a considerar certos fatores externos (como por exemplo, a natureza e toxicidade dos fumos e a resistência do explosivo à umidade existente no interior dos furos) que podem ditar a escolha de tipos de explosivos em contradição com as regras gerais.

ESPECIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS ESQUEMAS DE FOGO PARA DESMONTES EM BANCADAS



LEGENDA:

- P - PISO DA BANCADA ($P \geq 2,5 H$)
- H - ALTURA DA BANCADA
- H' - ALTURA DA FRENTE DA BANCADA ($H' = \frac{H}{\text{SEN } \alpha}$)
- F - COMPRIMENTO DA FRENTE DO DESMONTE
- E - ESPESSURA DO DESMONTE
- A - AFASTAMENTO (L.R.M.)
- S - ESPAÇAMENTO ENTRE FUROS
- h - ALTURA DOS FUROS ($h = H' + G = A + H_e$)
- h_e - ALTURA DA CARGA EXPLOSIVA
- T - ALTURA DE TAMPONAMENTO
- G - ALTURA DE FURAÇÃO ABAIXO DO PISO
- α - ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA FRENTE DA BANCADA
- β - ÂNGULO DE TRABALHO NO PISO
- d - DIÂMETRO DOS FUROS

Fig. 3

Como se pode observar, o recurso às fórmulas empíricas e ao trabalho por tentativas são muitas vezes as únicas soluções disponíveis para projetar adequadamente um desmonte, em face da dificuldade intrínseca do problema.

Por estes motivos, escolheremos essa via empírica para caracterizar as relações entre os parâmetros do desmonte (começando apenas pelos de natureza geométrica).

A figura 3 apresenta as especificações geométricas principais de um desmonte em bancadas, com a respectiva legenda explicativa.

Entre os parâmetros principais, Ash ⁽⁷⁾ sugeriu a existência de 5 relações numéricas lineares, que são:

$$\begin{array}{ll} A = k_A \cdot d & (25 \leq k_A \leq 40) \\ S = K_S \cdot A & (1.25 \leq k_S \leq 5) \\ h = K_h \cdot A & (1.5 \leq K_h \leq 4) \\ G = k_G \cdot A & (0.2 \leq k_G \leq 0.5) \\ T = k_T \cdot A & (0.5 \leq k_T \leq 1) \end{array}$$

onde as letras têm o significado referido na Fig. 3.

Segundo a ordem indicada, a partir do conhecimento do diâmetro dos furos determina-se o afastamento as cargas, e este último permite calcular os restantes parâmetros geométricos o esquema de fogo.

Este é também o critério seguido por Persson ⁽²⁾, embora restringindo as aplicações ao caso do granito suéco desmontado pelo explosivo Dynamex (para o qual, $k = 40$). As fórmulas empíricas de Ash acima referidas foram posteriormente confirmadas por Pugliese ⁽⁸⁾ na prática industrial de 12 pedreiras norte-americanas, considerando que elas constituem uma boa aproximação em relação aos esquemas de fogo considerados ideais naquelas pedreiras.

Por estas razões, desenvolveremos alguns conceitos complementares a respeito da utilização das citadas expressão. A aplicabilidade dessas fórmulas aos vários casos possíveis é resultante da gama de valores que podem ter as constantes K, pelo que interessa referir as situações que estão associadas à utilização desses valores.

Começando por K, verifica-se, na prática, que ele aumenta com a diminuição da densidade da rocha (e vice-versa), possuindo no caso dos desmontes de rocha com densidade em torno de 2,7 t/m³ os valores $k = 25$, quando o explosivo é de baixa densidade (ANFO), até $k = 40$ para explosivos muito densos.

O valor $K = 30$ é utilizado em condições intermédias, e como primeira aproximação.

Em relação a K , sabe-se que depende de ordem de retardo de furos adjacentes da mesma fiada, aumentando o seu valor com a simultaneidade do disparo. Além desse aspecto, o espaçamento depende também da forma geométrica da malha de furação.

Em geral, admitem-se os valores de K entre 1,25 e 1,5, para cargas retardadas na mesma fiada, em oposição ao método recentemente desenvolvido (conhecido por "malha alongada"), onde K pode atingir valores de 4 a 5. Contudo, esta prática exige que as cargas da mesma fiada sejam iniciadas exatamente no mesmo instante, para que tenha lugar a sobreposição de efeitos entre cargas vizinhas, sendo ainda necessário que o comprimento dos furos seja suficientemente longo.

A constante K_h , que varia habitualmente entre 1,5 e 4, assume valores médios da ordem de 2,5. Valores baixos desta constante podem provocar sobrefragmentação e crateras isoladas nos furos, ao passo que valores elevados ocasionam, geralmente, problemas de desmonte ao nível do piso das bancadas. Nos casos em que K_h excede 4 é aconselhável dispor de iniciação múltipla ao longo das cargas, mas em qualquer situação, a fixação da altura da bancada deve também respeitar outros condicionamentos, tais como, a capacidade dos equipamentos de perfuração e o carregamento, e as características do explosivo.

A subfuração é dimensionada através da constante K , que não deve ser inferior a 0,2, sendo o valor 0,3 o mais usado.

Em descontos realizados sobre rochas densas e com grandes alturas de bancada é recomendável a utilização de $K = 0,4$ a $0,5$, para eliminar irregularidades no piso. Porém, nos casos onde exista pronunciada estratificação na base da bancada é dispensada muitas vezes a subfuração.

Finalmente, no cálculo da altura de tamponamento há a considerar o maior ou menor confinamento exigido aos gases resultantes da detonação (e conseqüente "sopro" transmitido à atmosfera) pelo que se adotam elevados valores de K quando se pretende reduzir a sobrefragmentação junto à boca dos furos, assim como a quantidade e importância das projeções de blocos (lançamento). Esta ocorrência pode ser atenuada com a iniciação das cargas pelas bases dos furos.

Em rocha muito dura e densa recomenda-se valores altos de K para se evitarem sobrefragmentações e formação de crateras no topo das bancadas, ao mesmo tempo que se aconselha a prática de um bom tamponamento, a fim de que os gases realizem trabalho adicional na fragmentação.

Em conclusão, após os critérios mais ou menos empíricos que se expuseram para justificar a aplicabilidade das fórmulas de Ash, deveremos assinalar que estas expressões se baseiam em libertações de energia equilibradas entre os vários furos e indicam valores médios, não dispensando futuros ajustamentos a realizar "in situ". Em especial, devem ser introduzidos os efeitos locais de compartimentação dos maciços rochosos, modificando as grandezas A e S de forma a que os furos não intersectem juntas verticais ou fendas inclinadas.

Além deste fato, serão de considerar ainda as condições particulares de cada desmonte, que várias vezes obrigam a adoção de práticas contraditórias com as acabadas de anunciar.

II-3 — ESCOLHA DO EXPLOSIVO E DO DIÂMETRO DAS CARGAS

O processo de seleção do tipo de explosivo a utilizar em determinado desmonte deve ser coerente com o seu mecanismo de atuação após a detonação, e com a reação da rocha aos correspondentes efeitos mecânicos.

O conhecimento experimental do fenômeno indica que imediatamente após o início da detonação na coluna de explosivo, este é percorrido por uma onda de choque que se propaga radialmente para a rocha circundante, mesmo antes de os gases da explosão atingirem a sua maior temperatura e pressão.

É possível distinguir dois efeitos distintos, por ordem cronológica: uma primeira fase, dita dinâmica, em que a onda de tensão transmitida à rocha origina compressões radiais e trações tangenciais que ocasionam o aparecimento de fraturas radiais, posteriormente ampliadas pelas ondas refletidas da superfície livre da rocha, e uma segunda fase, designada por quase-estática, em que os gases da explosão penetram nas fendas radiais e provocam a fragmentação e o lançamento da rocha.

Sabe-se que a importância da fase dinâmica é tanto maior quanto maior for a velocidade de detonação do explosivo (ela não existe no caso dos explosivos deflagrantes) e também aumenta à medida que a compacidade da rocha cresce.

Dessas constatações experimentais resultou um critério de escolha do explosivo, estabelecido em função das propriedades mecânicas da rocha.

Segundo este critério, deverá procurar-se igualmente de impedâncias entre o explosivo e a rocha circundante (a impedância não é mais que o produto da massa específica dum meio pela respectiva velocidade sônica).

Esta condição garante teoricamente que a transferência de energia do explosivo para a rocha se faz com a máxima eficiência.

Certos autores, como Allsman⁽⁹⁾ adotam uma versão simplificada deste critério, sugerindo a igualdade entre a velocidade de detonação do explosivo e a velocidade sônica da rocha.

Em relação aos diâmetros das cargas explosivas, a sua escolha deve atender a diversos fatores, entre os quais salientamos:

— Tão próximo quanto possível do diâmetro dos furos, no caso de explosivos com forma geométrica fixa.

— Diâmetro nem tão pequeno que impeça o desenvolvimento completo da detonação (no caso do ANFO esse diâmetro crítico é da ordem de 4") nem tão grande que possa originar vibrações, sopros e lançamentos exagerados, ou mesmo o fenômeno da sobrefraturação da rocha remanescente.

A elevada ocorrência de matacões pode também resultar da escolha imperfeita do diâmetro das cargas (superdimensionado), refletindo-se negativamente no plano econômico.

Estas desvantagens dependem evidentemente da escala dos trabalhos de desmonte, porque o emprego de grandes diâmetros tem-se revelado apropriado quando a produção é elevada, e desde que os equipamentos de carregamento, transporte e britagem estejam dimensionados para manusear grandes blocos. Tal circunstância exige que as condições de vizinhança sejam favoráveis (longe de áreas urbanas, por exemplo), sendo hoje a tendência das grandes explorações mineiras.

Concluindo, poderemos sintetizar este tópico, afirmando que o projetista de desmontes com explosivo deve procurar utilizar sempre que possível os maiores diâmetros de perfuração (porque são estes que originam menores custos unitários de desmonte) ficando como limites restritivos as circunstâncias ambientais.

II-4 — SELEÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO, CARREGAMENTO E TRANSPORTE

No parágrafo anterior referimos os aspectos mais relevantes que podem interferir na escolha dos diâmetros das cargas explosivas a utilizar em determinado desmonte, os quais evidentemente se aplicam à seleção do equipamento de perfuração.

Ora, como o custo de perfuração por unidade de volume de rocha removida decresce com o aumento do diâmetro (Persson afirma que passando de 1 para 10 polegadas, o custo unitário de perfuração se reduz para 1/10) haverá sempre vantagem em utilizar grandes diâmetros. Limitações a esta tendência residem na proteção ambiental (vibrações, lançamentos, sopro e sobrefraturação) e também no ajustamento que deverá existir entre a capacidade de produção e o porte dos equipamentos, e suas relações com as dimensões das bancadas.

Um parâmetro com interesse para avaliação do desempenho dos sistemas de perfuração é a chamada perfuração específica, que nos desmontes a céu aberto toma valores médios compreendidos entre 0,5 e 1 dm³ de furo, por cada m³ de rocha escavada.

A operação de carregamento, ou limpeza, que é habitualmente executada por pás-carregadeiras ("shovels") deve ser compatível com o volume de material desmontado, sendo que a sua eficiência depende do grau de fragmentação obtido. Geralmente a velocidade de carregamento aumenta (e por consequência o respectivo custo diminui) quando o tamanho médio dos blocos decresce. Por esse fato, a escolha do equipamento de carregamento (assim como o de transporte) deve atender prioritariamente à previsão do grau de fragmentação a atingir no desmonte, e ainda à altura e disposição da pilha de rocha detonada.

A esse respeito, Ash ⁽⁷⁾ sugere que a altura máxima de carregamento do "Shovel" deve igualar a altura da pilha de material desmontado, sendo que esta última está relacionada com a altura das bancadas e com o empolamento da rocha.

Sobre a seleção dos equipamentos de transporte, outros fatores devem ser considerados, tais como a flexibilidade operatória, que depende do próprio esquema de fogo e do estado do piso após o desmonte. Assim, é aconselhável a utilização de caminhões quando a colocação em pilha é irregular e quando os esquemas de fogo apresentam grande número de fileiras de furos paralelos à frente. O emprego de trens ou de correias transportadoras circunscreve-se após casos de grandes produções com características constantes no tempo em esquemas de fogo com poucas fileiras paralelas à frente e por consequência, grandes comprimentos das bancadas submetidas a cada detonação.

Uma outra fase que também merece atenção é a descarga dos caminhões, cuja maior ou menor incidência depende da quantidade de matacões originando engasgamento nos britadores. É usual associar essa fase à operação de britagem segundo o critério de dimensionar esta última a partir da fragmentação obtida no desmonte, e admitindo que o "fogacho" deve ser minimizado sempre que possível.

II-5 — MÉTODOS DE ESCORVAMENTO E ORDEM DE INICIAÇÃO DAS CARGAS

Uma vez definidos os parâmetros essenciais do esquema de fogo (tipo de explosivo, diâmetro dos furos, dimensões da bancada e produção desejada) segue-se a etapa de estabelecimento do esquema de fogo mais aconselhável. Até este ponto do projeto, apenas se dimensionou a carga explosiva considerada individualmente, sendo agora necessário definir as posições relativas das cargas incluídas no mesmo esquema, assim como as respectivas ordens de iniciação (pelo topo, pela base, intermediário ou múltiplo).

Certos fatores são determinantes na seleção destas especificações para a iniciação das cargas, de acordo com os objetivos fundamentais do desmonte, salientando-se dentre eles, os seguintes:

- Posição onde se pretende localizar a pilha de rocha após o desmonte.
- Estabelecimento da melhor geometria para a área desmontada, em planta.
- Evitar ou reduzir a incidência de sobrefraturações, vibrações, lançamentos, sopro, etc.

Na fig. 4 encontram-se esquematizadas plantas de fogo aplicáveis ao desmonte com duas faces livres confinados) e na fig. 5 esquemas alterna-

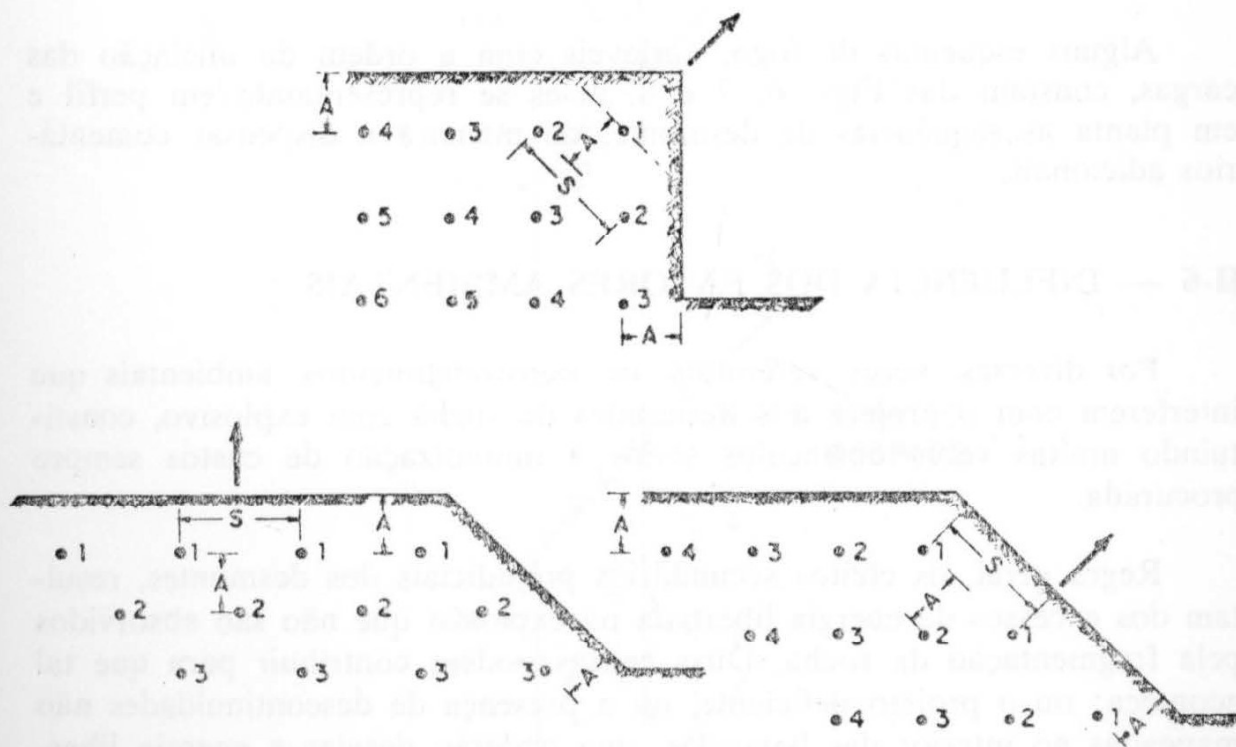


Fig. 4

tivos para desmontes com três faces livres (cantos livres), com uma fileira e com fileiras múltiplas.

No primeiro caso, o desmonte poderá ser executado em diagonal ou paralelamente à frente, porém sempre em forma de V.

Nos exemplos da Fig. 5, a terceira face livre permite maiores eficiências, e dentre eles o corte com ângulos obtusos é mais favorável que

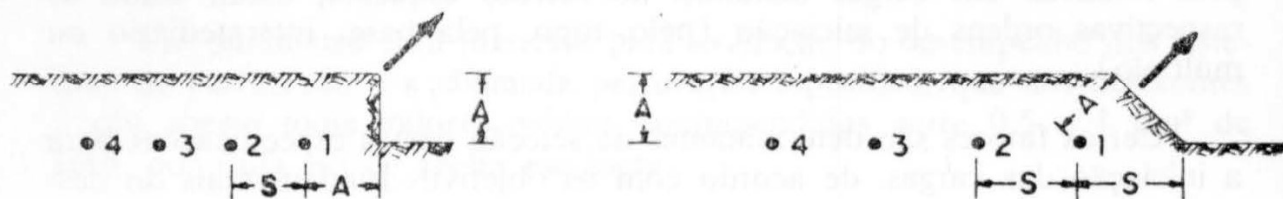


Fig. 5

o de ângulos retos. A sequência de retardos é a indicada nas figuras, representando-se por meio de uma seta o deslocamento do material após o desmonte. As diferentes combinações de retardos podem ser utilizadas de acordo com as características de cada desmonte e com o tipo de remoção mais conveniente, de modo a permitir o trabalho simultâneo dos equipamentos de limpeza e de transporte, sem interferência com perfuratrizes que eventualmente preparem novos desmontes na vizinhança.

Alguns esquemas de fogo, variáveis com a ordem da iniciação das cargas, constam das Figs. 6, 7 e 8, neles se representando em perfil e em planta as sequências de desmonte, da maneira a dispensar comentários adicionais.

II-6 — INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS

Por diversas vezes referimos os constrangimentos ambientais que interferem com o projeto dos desmontes de rocha com explosivo, constituindo muitas vezes obstáculos sérios à minimização de custos sempre procurada.

Regra geral, os efeitos secundários prejudiciais dos desmontes, resultam dos excessos de energia libertada na explosão que não são absorvidos pela fragmentação da rocha. Duas causas podem contribuir para que tal aconteça: ou o projeto deficiente, ou a presença de descontinuidades não mapeadas no interior das bancadas, que poderão desviar a energia libertada para zonas não previstas do maciço e até para a atmosfera, provocando fragmentação irregular, além dos já citados efeitos secundários.

ESQUEMA DE FOGO TIPO A ($H > 2A$)

CARACTERÍSTICAS: DISPARO RETARDADO DE TODAS AS CARGAS RELATIVAMENTE AS ADJACENTES.

ORDEM DE RETARDO: 1, 2, 3, 4,

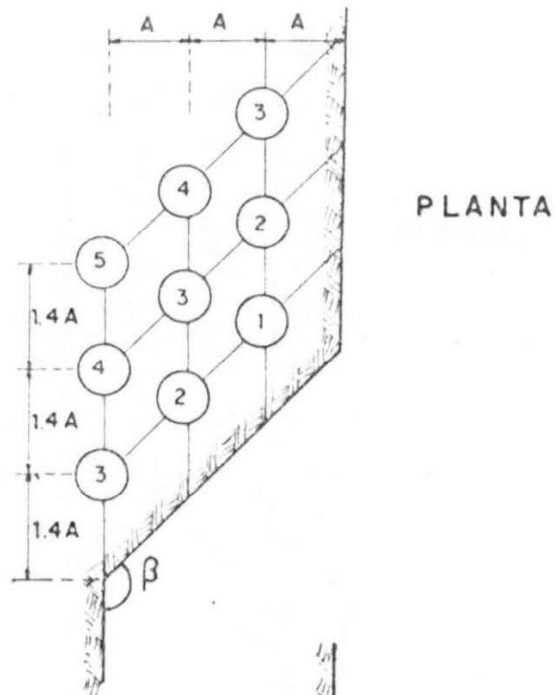
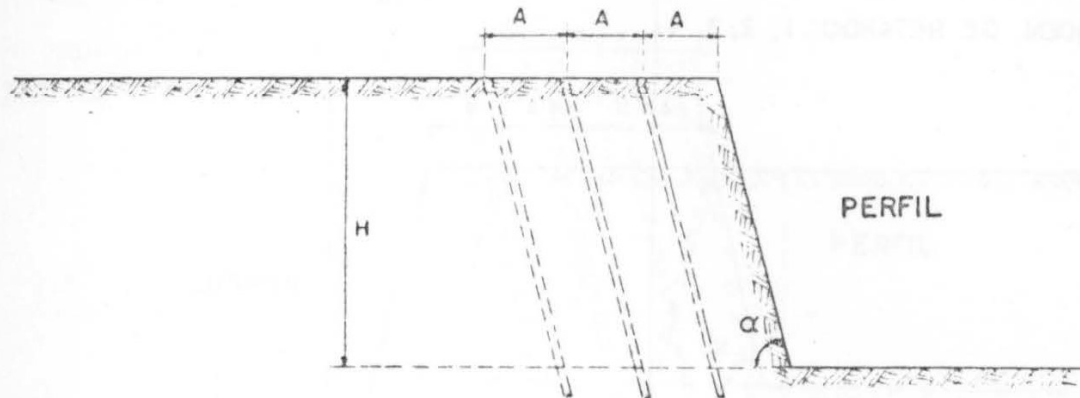


Fig. 6

Fig.7

ESQUEMA DE FOGO TIPO B ($H \geq 4A$)
ESQUEMA DE FOGO TIPO C ($2A < H < 4A$)

CARACTERÍSTICAS: CARGAS DA MESMA FIADA RETARDADAS ENTRE SI, MAS
DISPARO LATERAL SIMULTÂNEO.

ORDEM DE RETARDO: 1, 2, 3, 4.....

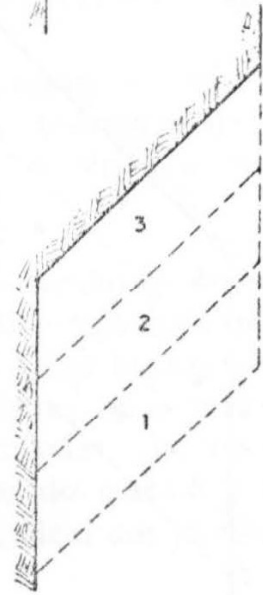
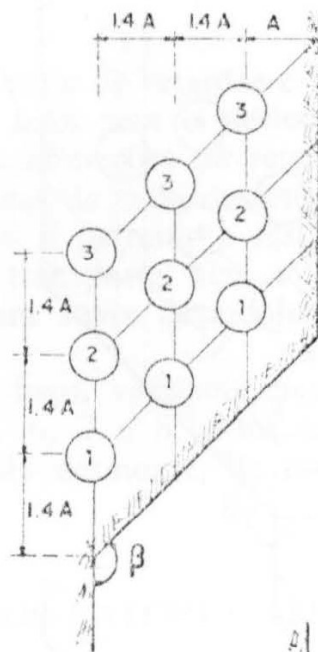
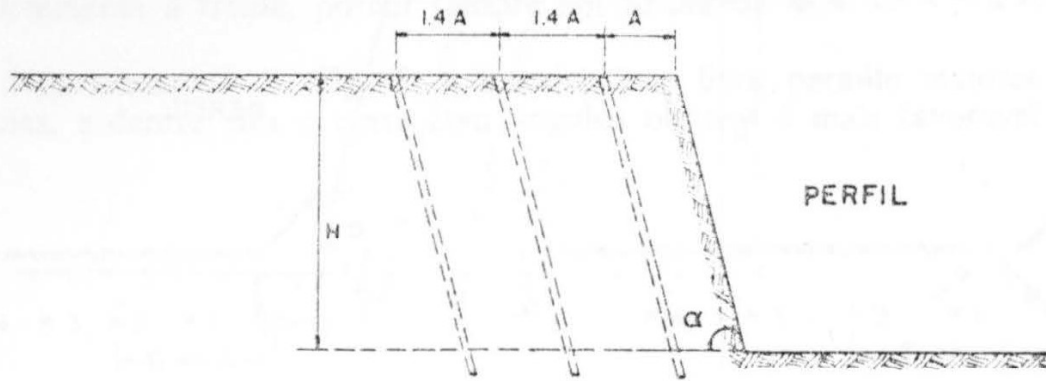


Fig. 7

ESQUEMA DE FOGO TIPO D ($H \geq 4A$)

ESQUEMA DE FOGO TIPO E ($2A < H < 4A$)

CARACTERÍSTICAS: DISPARO SIMULTÂNEO DE TODAS AS CARGAS DA MESMA FIADA, MAS DISPARO LATERAL COM RETARDAMENTO.

ORDEM DE RETARDO: 1, 2, 3, 4.....

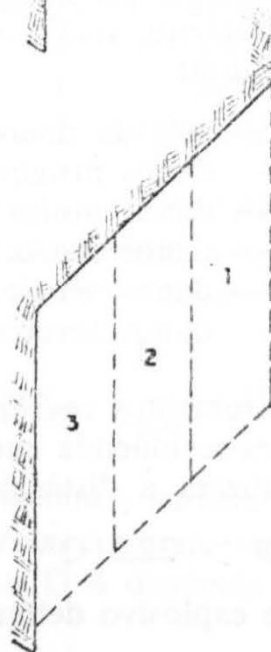
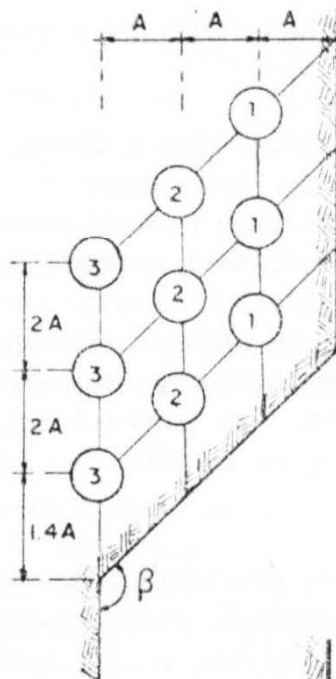
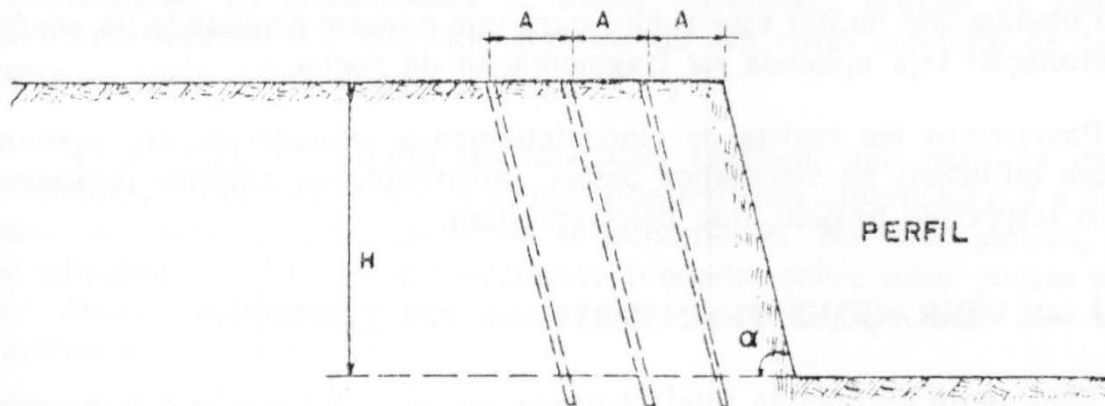


Fig. 8

Como regra empírica muito útil cita-se a que atribui à intensidade do ruído da explosão uma avaliação do excesso de energia libertada, convido obviamente limitar esse ruído, para que a quase totalidade da energia de detonação seja aplicada na fragmentação da rocha.

Passaremos em revista os cinco fenômenos secundários dos desmontes com influência na vizinhança destes, salientando os critérios limitativos para o respectivo projeto, que deles resultam.

II-6-1 — VIBRAÇÕES TRANSMITIDAS AO TERRENO

Uma parte da energia total libertada por uma detonação é transmitida à rocha circundante sob forma ondulatória, propagando-se através do maciço e sofrendo reflexões e refrações nas suas superfícies livres. Tal propagação origina vibrações que podem ser detetadas pelo homem, podem ser medidas por instrumentação apropriada e podem causar danos em estruturas vizinhas à detonação.

Sabendo-se experimentalmente que o limiar da sensibilidade humana está consideravelmente abaixo do limiar correspondente a danos provocados em edifícios por explosões próximas, deveria constituir preocupação fundamental para o projetista de desmontes, a proteção individual.

Contudo, como as faixas de vibrações detectáveis pelo homem podem classificar-se em 3 grupos (perceptíveis, objeccionáveis e dolorosas) e estas últimas encontram-se próximas das intensidades de vibração capazes de provocar danos em estruturas, os estudos são geralmente orientados para a proteção destas.

Dos numerosos critérios desenvolvidos, em especial nos E.U.A., Suécia e Inglaterra, tem-se mostrado mais ajustável à realidade, o baseado na velocidade vibratória do terreno, sendo usualmente admitidos os seguintes limites de dano estrutural:

- Até 50 mm/s — inexistência de danos
- De 50 a 70 mm/s — danos insignificantes
- De 71 a 109 mm/s — danos muito ligeiros
- De 110 a 160 mm/s — danos moderados
- De 160 a 230 mm/s — danos sérios
- Mais que 230 mm/s — danos severos e/ou colapso.

Quando não existem instrumentos registradores de velocidades vibratórias, o U.S. Bureau Of Mines recomenda que o nível seguro é conseguido quando as estruturas se localizam a distâncias D (em metros) tais que

$$D > 22,5 Q^{1/2} ,$$

onde Q representa o peso de explosivo detonado (em Kg).

Como é evidente, os valores acima indicados referem-se a primeiras aproximações da possibilidade de danos estruturais, porque na realidade o comportamento dos edifícios depende de um vasto conjunto de fatores, entre os quais salientamos:

a) O tipo de terreno de fundação (sabe-se que para as mesmas condições de onda incidente, a resposta de um solo superficial é 2 a 3 vezes mais atenuada do que a de rocha subsuperficial). Por esse motivo, níveis de vibração de 50 mm/s em estruturas fundadas sobre solos podem provocar danos comparáveis aos resultantes de vibrações com 200 mm/s verificadas em rochas sãs.

b) A natureza da construção (sua geometria, orientação em relação à direção de propagação das ondas, sua capacidade de dissipar energia vibratória e sua interação com o terreno de fundação).

c) A forma da onda incidente, em termos de sua composição em amplitudes e em frequências. Também é útil conhecer a distribuição espectral de potências na onda.

d) Convém não esquecer que toda a propagação ondulatória no terreno é tridimensional, pelo que é necessário registrar três componentes de vibração e calcular a respectiva resultante (que é sempre maior que qualquer dos componentes). Em geral, dois componentes são horizontais, sendo um dirigido para o ponto de detonação, o segundo perpendicular a esse, e o terceiro vertical.

As tentativas para matematizar as respostas de estruturas e fundações às vibrações resultantes de desmontes têm sido pouco frutíferas do ponto de vista teórico, em vista de enorme variabilidade de parâmetros e da complexibilidade das propagações ondulatórias. Por esse motivo, procura-se quantificar os critérios de dano estrutural, a partir de dados experimentais registrados a prática e agrupando as variáveis mais importantes em álbacos apropriados.

Um dos mais divulgados é o diagrama logarítmico que relaciona velocidade vibratória (em ordenadas) com o coeficiente $D/Q^{1/2}$ (em abcissas), proporcionando relações do tipo

$$v = a \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right) - b$$

em que a e b representam constantes características do terreno em questão. O peso de explosivo Q refere-se à carga por retardo do esquema de fogo responsável pelas vibrações e D à distância entre o ponto de explosão e a estrutura considerada.

Assinale-se que para distâncias superiores a cerca de 1 Km, os fenômenos de atenuação e dispersão das ondas misturam as vibrações resultantes dos vários retardos dos esquemas de fogo, justificando-se nesses casos que se considerem duas leis de propagação, uma da carga por espera e outra da carga total, que devem ser introduzidas no projeto dos esquemas de fogo.

Duas opções existem então para o projetista:

a) Dimensionam-se com pesos máximos de explosivo que podem detonar por retardo, em função das distâncias envolvidas e dos parâmetros locais a e b , considerando-se os níveis seguros de vibração dos critérios convencionais que garantem estabilidade das estruturas próximas.

b) Se as estruturas ainda não estão construídas, prevêm-se os coeficientes sísmicos resultantes dos desmontes vizinhos, para afetarem as forças dinâmicas horizontais que incidirão sobre as mesmas estruturas, de modo a poder reforçá-las convenientemente.

II.6.2 — LANÇAMENTO DE BLOCOS

A ocorrência do fenômeno de lançamento à distância de fragmentos das rochas desmontadas por explosivos é relativamente corrente, devendo ser controlado, mais do que evitado.

A experiência (confirmada pela teoria) revelou um certo número de fatos importantes sobre esse fenômeno:

a) O lançamento de blocos, representado pela distância máxima atingida, é tanto maior quanto maior for o consumo específico de explosivos num desmorte, estando associado a um excesso de fragmentação da rocha.

b) Consequentemente, é mais habitual observar-se essa ocorrência nos desmontes em cratera (só uma face livre) do que nos desmontes em bancada (duas ou três faces livres).

c) A velocidade de lançamento dos fragmentos aumenta com o excesso de carga explosiva utilizada, sendo simultâneo com a sobrefragmentação já referida.

d) Para as cargas cilíndricas frequentemente usadas no desmorte em bancadas, verifica-se maior incidência de lançamentos quando a sua iniciação é feita pelo topo, do que quando é feita pela sua base.

Lundborg et al. ⁽¹⁰⁾ realizaram estudos detalhados que incluíram filmagem a alta velocidade, donde é possível extrair relações numéricas entre os parâmetros mais influentes no lançamento de blocos. Tais parâmetros são:

- d — Diâmetro dos furos (em polegadas)
 v — velocidade dos fragmentos (em m/s)
 δ — peso específico da rocha (t/m^3)
 \varnothing — diâmetro médio dos blocos projetados (m)

Os autores citados estabeleceram o seguinte relação empírica:

$$\varnothing \delta v = 26 d$$

que permite avaliar a influência relativa de cada um dos parâmetros envolvidos.

No que se refere à distância máxima L de lançamento de blocos, concluíram também que no desmonte em crateras tem-se:

$$L = 260 d^{2/3}$$

sendo o diâmetro médio desses blocos:

$$\varnothing = 0,1 d^{2/3}$$

Para o desmonte em bancadas seria

$$L = 40 d^{2/3}$$

o que leva a concluir que o lançamento é cerca de 1/6 do lançamento previsível em desmonte por cratera.

A Fig. 9 traduz aquela variação de grandezas envolvidas no fenômeno, funcionando o diâmetro δ dos furos como parâmetro da família de curvas.

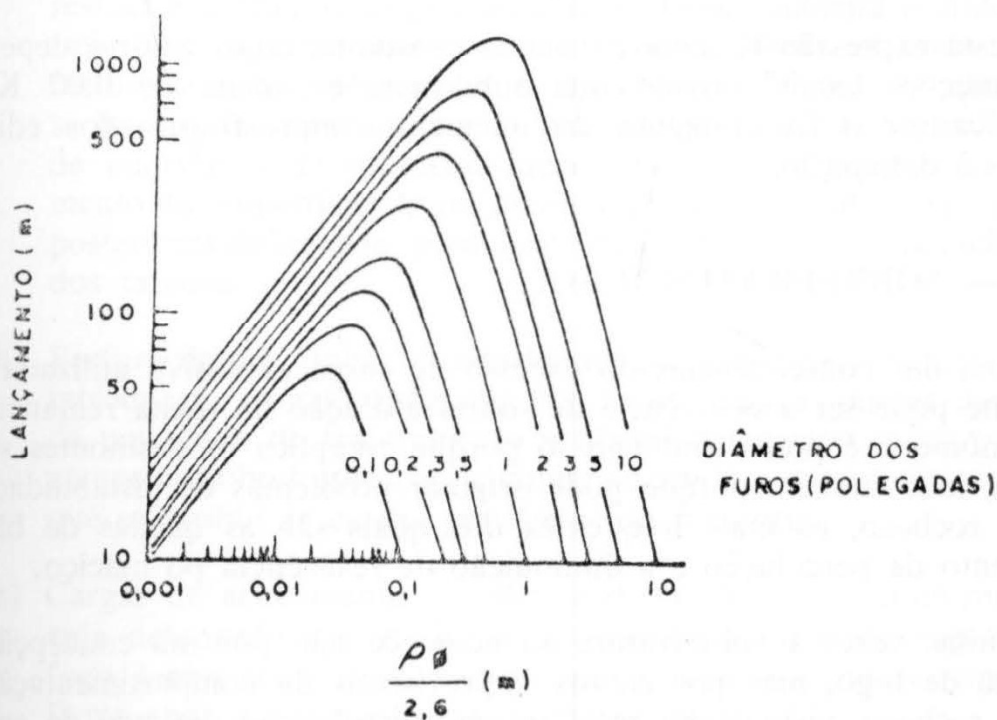


Fig. 9

II.6.3 — SOPRO DA EXPLOSÃO

O "sopro" de uma explosão, ou deslocamento de ar resultante da parte de energia de detonação transmitida através da atmosfera, pode ter consequências nefastas no desmonte com explosivos, convindo sempre minimizar os seus efeitos, que se fazem sentir sobre o homem (principalmente na audição) e nas estruturas próximas (especialmente vidraças e janelas). Geralmente estes efeitos são mais pronunciados quando:

- a) O Tamponamento dos furos é inexistente ou mal executado.
- b) É grande o diâmetro das cargas explosivas.
- c) Predominam condições atmosféricas adversas (direção e velocidade dos ventos, nebulosidade, inversões térmicas, etc.).

Em geral a onda de choque através da atmosfera atenua-se mais do que as vibrações através do terreno e para distância superiores a 100 metros as diferentes ondas resultantes de cargas retardadas compõem-se, formando um trem único.

A atenuação da onda através do ar é aproximadamente estabelecida em função da distância escalonada D , entrando com a raiz cúbica do peso de explosivo detonado Q , sendo a respectiva sobrepressão dada por:

$$F = \frac{Q^{1/3}}{D} K$$

Nesta expressão K representa uma constante, cujos valores dependem das condições locais. Geralmente, sobrepressões acima de $0,07 \text{ Kg/m}^2$ podem causar o fraturamento dos elementos mais frágeis dos edifícios vizinhos à detonação.

II-6-4 — SOBREFRATURAÇÃO:

Uma das consequências do excesso de carga explosiva utilizada num desmonte pode ser a ocorrência de sobrefraturação na rocha remanente. Este fenômeno é prejudicial não só porque complica os desmontes subsequentes, mas também porque pode originar problemas de instabilidade no maciço rochoso, os mais freqüentes dos quais são as quedas de blocos, o aumento de percolação e a diminuição de resistência po maciço.

Muitas vezes a sobrefraturação acontece não por má concepção do esquema de fogo, mas por efeitos imprevisíveis da compartimentação do maciço rochoso, visto assim resultar uma distribuição desigual da energia explosiva, que dá origem a maior fragmentação nas zonas de maior densidade de fraturamento e vice-versa.

Como já foi referido, o reconhecimento geológico prévio da compartimentação é imprescindível para uma perfeita concepção do esquema do fogo, sugerindo os ajustamentos mais indicados em cada caso e permitindo evitar problemas imprevistos de sobrefraturação, lançamentos e sopro.

II-6-5 — ESTABILIDADE DA ROCHA REMANESCENTE

Na sequência do item anterior situam-se os cuidados a tomar nos desmontes de rochas em escavações e cortes que deverão permanecer estáveis por longos períodos de tempo, como nos casos de taludes para estradas, ferrovias e canais.

A adoção de esquemas de fogo especiais justifica-se quando os custos previsíveis de suporte de maciços após os desmontes, são superiores aos acréscimos de perfuração e de explosivos que tais esquemas poderão apresentar em relação aos planos de fogo comuns. Nessa análise comparativa devem ser incluídos os custos adicionais de mão-de-obra com trabalhos de saneamento dos maciços após os desmontes, os quais são eventualmente eliminados quando se utilizam métodos especiais de desmonte.

Dentre os mais usados, citaremos os seguintes métodos:

- a) Pré-corte: técnica de perfuração intensiva ao longo das superfícies de contorno dos desmontes, com espaçamentos pequenos e carregamentos suaves desse furos, que são detonados antes das restantes cargas do esquema de fogo. Dessa maneira é criada uma superfície de fraturamento onde se irão refletir as ondas provenientes das cargas que detonaram posteriormente, as quais não se transmitindo para o interior do maciço, reduzem a possibilidade de ocorrência de sobrefraturação. Além desse aspecto, o acabamento das superfícies livres elimina quase que totalmente trabalhos posteriores de suporte, permitindo obter altos ângulos de inclinações dos taludes.
- b) Perfuração em linha: é semelhante ao pré-corte, embora não se introduzam cargas explosivas nos furos, pois a simples existência de um plano de fraturamento artificial do maciço reduz os fenômenos de sobrefraturação, eliminando ainda o excesso de vibrações que se atribui às cargas periféricas do pré-corte.
- c) Cargas de acabamento — são também cargas de contorno, mas cuja detonação é posterior à dos restantes furos do esquema de fogo, tendo como objetivo principal a regularização de superfícies livres após a realização do desmonte principal.

São relativamente pouco usadas.

II-7 — ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA

Já foi dito anteriormente e ilustrado pela fig. 1, que a minimização de custos unitários nos desmontes com explosivo se consegue pela adequada combinação de todas as operações, a partir de um grau de fragmentação ótimo.

Em cada caso concreto, haverá que determinar por pontos, as curvas correspondentes a evolução de custos das diferentes operações relacionadas na fig. 1, processo que é difícil conseguir na prática.

A experiência anterior e a realização de desmontes pode suprir em parte a falta de informação relativa à forma dessas curvas, permitindo prever o anulamento delas, reconhecer as suas tendências e fazer avaliações qualitativas do grau de fragmentação.

Contudo, o procedimento mais seguro consiste em otimizar por aproximações sucessivas o próprio desmonte que se está operando, através de ajustamentos nos parâmetros do esquema de fogo que levam as curvas a aproximarem-se progressivamente do ponto ótimo assinalado na Fig. 1.

Tais ajustamentos complementares têm lugar praticamente durante toda a vida da operação de desmonte, permitindo adaptar rapidamente os esquemas de fogo à variabilidade de propriedades das rochas e à interferência das discontinuidades dos maciços. Esta circunstância confere ao trabalho de otimização às características de uma atividade constante, onde sempre se encontram fatores a corrigir e raramente se atinge a perfeição.

II-8 — A SEGURANÇA DOS DESMONTES:

A proteção dos locais onde se executam desmontes com explosivos é indispensável para o sucesso dos trabalhos. A legislação de todos os países preconiza regulamentos para a utilização de substância explosivas, mencionando os cuidados a ter com seu manuseio e as proibições de várias ordens o qual é necessário fazer respeitar.

Os riscos são variados e só serão progressivamente eliminados através da mentalização do pessoal, baseando-se em planejamento racional dos trabalhos e na atribuição de responsabilidades a todos os intervenientes. Existem procedimentos adequados para a atuação em face dos problemas mais correntes (detonações falhadas, espoletas com defeitos, circuito elétrico errado, tamponamento deficiente, cordel detonante incapacitado, etc.), sendo necessário planejar com antecedência quem, como, quando e onde tais procedimentos são executados.

Outras circunstâncias externas aos trabalhos (como por exemplo as trovoadas e as interferências elétricas), poderão constituir obstáculos à realização dos desmontes, devendo existir sempre no local de trabalho um técnico responsável e com poder de decisão, capaz de suspender ou mandar executar as explosões perante as condições externas vigentes.

As consequências psicológicas, econômicas e técnicas que os acidentes provocam, são de tal maneira importantes que os custos envolvidos com a segurança dos desmontes são sempre pequenos comparados com eventuais prejuízos deles resultantes. Tal como em outros tipos de trabalho de engenharia, economizar na segurança dos desmontes dos explosivos, pode ser considerado verdadeiro crime.

III — DESMONTES EM TRABALHOS SUBTERRÂNEOS

A descrição anterior foi essencialmente orientada para a caracterização da operação de desmonte de rochas a céu aberto, que constitui mais de 70% dos trabalhos de escavação presentemente realizados.

Os trabalhos subterrâneos apresentam porém tendências para aumentarem de importância, em virtude de várias circunstâncias atuais, principalmente de natureza ecológica.

O desmonte com explosivos continua a ser o método mais econômico para escavar rochas duras, enquanto que para rochas brandas e friáveis os métodos mecânicos (principalmente com escavadoras rotativas) são geralmente preferíveis.

Na abertura de túneis e galerias o princípio a seguir consiste em iniciar o desmonte por meio de um conjunto de cargas que abram um vazio (ou "pilão") para onde os tiros seguintes possam expandir-se. Como só existe uma face livre, o consumo específico de explosivos é sempre maior que a céu aberto, sendo mais críticos o rigor no alinhamento dos furos, o efeito da gravidade e a composição de ações das cargas vizinhas.

Em geral, são conseguidos avanços de 2 a 3 metros por cada desmonte, sendo habitual realizar um destes avanços por turno de trabalho. Contudo, com a organização adequada das operações, é possível realizar dois disparos por turno, conforme se indica na fig. 10, para o diagrama de fogo esquematizado na fig. 11 (Ref. 12) onde os números representam ordens de retardo na detonação das cargas.

OPERAÇÕES	Tempo dispendido por ciclo (h-min)	Horas no turno						
		1	2	3	4	5	6	7
Saneamento da frente	0 - 6	■			■			
Carregamento	1 - 18	■	■		■	■		
Perfuração	1 - 24	■	■	■	■	■	■	■
Carregamento, disparo e ventilação	0 - 24			■				■
Instalação de suporte provisório	1 - 39	■	■		■	■		
Retirar suporte provisório	0 - 18	■			■			
Instalação de suporte definitivo	2 - 12		■	■		■	■	
Montagem de vias férreas	0 - 30			■				■
Abertura de drenos de esgoto	2 - 12	■	■			■	■	

Fig. 10

Conforme se pode observar na Fig. 10, as diversas operações são repetidas duas vezes em cada turno, incluindo o próprio desmonte, permitindo assim, dessa forma obter avanços de 12 a 14 m por dia.

Certas relações empíricas existem entre os parâmetros fundamentais do desmonte de rochas em túneis. Assim, de acordo com Gustafsson⁽¹¹⁾, a carga específica Q (em Kg de explosivos por m^3 de rocha detonada), relaciona-se com a área da secção transversal do túnel A (m^2) pela equação:

$$Q = 3.47 - 0.073 A + 0.00044 A^2$$

O número de furos na frente de ataque N , com diâmetro 40 mm, é também dada em função de A , por:

$$N = 13.6 + 1.24 A - 0.004 A^2$$

Através destas relações pode-se deduzir que o custo por m^3 desmontado diminui quando aumenta a secção do túnel, por outro lado os custos por metro linear de escavação de túnel aumentam em proporção menor do que o aumento da secção do túnel.

Um aspecto importante nos esquemas de fogo modernos é o emprego da técnica do pré-corte nas periferias dos túneis, que permite um certo número de vantagens de menor sobrefragmentação, menor necessidade de suporte, menor quantidade de concreto projetado necessário ao revestimento e aumento da resistência geral do maciço.

IV — CONCLUSÕES:

A operação dos desmontes de rochas com explosivos caminha progressivamente para evoluir de arte para ciência, através de um processo lento de pesquisa, o qual se associa o registro e interpretação dos dados experimentais práticos. Em virtude da complexidade dos fenômenos físico-químicos envolvidos na detonação e da variabilidade de propriedades de maciços rochosos, parece que o melhor caminho para proceder a otimização dos desmontes consiste na observação constante dos fenômenos, procurando explicações à luz da teoria da Mecânica das rochas, e ajustando esta às evidências práticas.

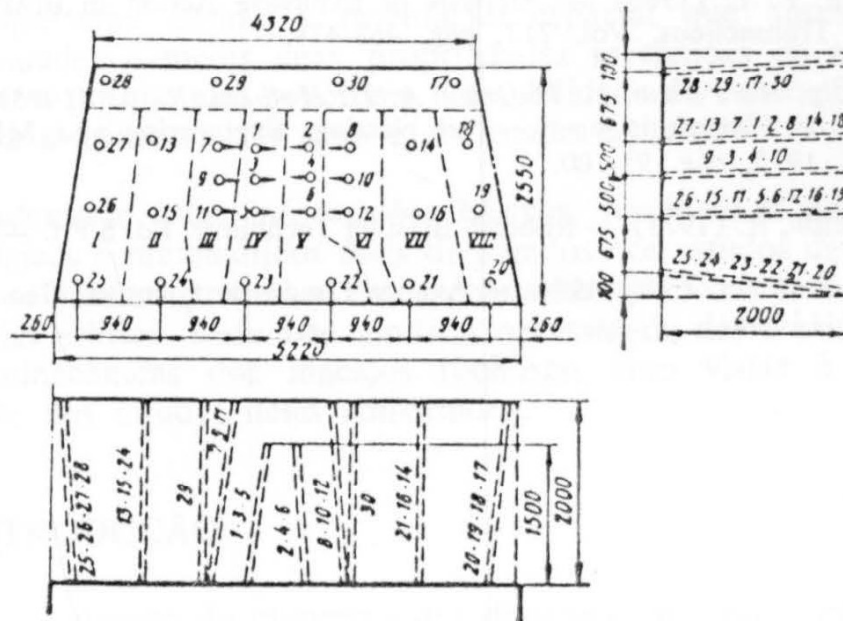


Fig. 11

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) *Olson, J. J. and Olson, K. S. (1975) — Rock Mechanics and Excavation Program — A Research Project Summary. U. S. Bureau of Mines Information Circular 8674 — Washington.*
- (2) *Johansson, C. H. and Persson, P. A. (1974) — Fragmentation System, General Report of Theme 5. Advances in Rock Mechanics, Vol. I, Parte B (pg. 1.557-1595). Denver.*
- (3) *Dinis da Gama, C. (1971) — Otimização do Arranque de Rochas com explosivos — Tese de Doutorado — Universidade de Luanda.*
- (4) *Dinis da Gama, C. (1971) — Influência da Compartimentação de Maciços Rochosos na Fragmentação dos Desmontes com Explosivo — Anais do I*

Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Vol. 2 — pág. 245-257 — Rio de Janeiro.

- (5) *Tognon, A. A.* (1976) — Estudo Analítico de Basaltos em Diversas Pedreiras de Barragens. Anais do I Congresso de Geologia de Engenharia. Vol. 2, pág. 283-296. Rio de Janeiro.
- (6) *Atchison, T. C.* (1968) — Fragmentation Principles. In Surface Mining. Ed. E. P. Pfeleider, AIME, New York.
- (7) *Ash, R. L.* (1968) — The Design of Blasting Rounds. In Surface Mining. Ed. E. P., AIME. New York.
- (8) *Pugliese, J. M.* (1962) — Designing Blast Patterns Using Empirical Formulas. U.S. Bureau of Mines — Information — Circular 8.550. Washington.
- (9) *Allsman, P. T.* (1960) — Analysis of Explosive Action in Briiking Rock — AIME Transactions, Vol. 217, pág. 468-478.
- (10) *Lundborg, N.; Person A.; Pedersen A. L.; Holberg, R.* — (1975) — Keeping the lid on Flyrock in open — pit blasting. Engineering and Mining Journal —May, 1975, pág. 95-100.
- (11) *Gustafsson, R.* (1973) — Swedish Blasting Technique. Ed. S.P.I. — Gothenburg.
- (12) *Dinis da Gama, C.* — 1974 — Avanço rápido de Galerias. Geotecnia n.º 10. LNEC. Lisboa.