

CAPÍTULO

7

OPERAÇÕES DE LAVRA EM PEDREIRAS

Jair Carlos Koppe

Engenheiro de Minas e Geólogo pela UFRGS

Doutor em Ciências pela UFRGS

Professor Titular do DEMIN-UFRGS

João Felipe Coimbra Leite Costa

Engenheiro de Minas pela UFRGS

PhD em Geoestatística-University of Queensland

Professor Associado do DEMIN-UFRGS

1. INTRODUÇÃO

Desde a Idade da Pedra, o homem utiliza rochas para o seu desenvolvimento e à medida que foi se tornando sedentário e passou à fase de urbanização, as rochas passaram a ter enorme importância, sendo utilizadas nos mais variados tipos de construções. No início, as técnicas de uso das rochas eram extremamente rudimentares e com os avanços tecnológicos ocorreram grandes melhorias nos processos de lavra nas pedreiras. Ainda hoje, utilizam-se quantidades elevadas de rochas britadas na construção de edifícios, casas, estradas e outras obras civis.

Neste capítulo os autores apresentam os principais procedimentos nas operações de lavra em pedreiras, enfocando a preparação e descobertura das rochas, a perfuração do maciço rochoso para carregamento dos explosivos, os principais conceitos e sugestões de projeto para o desmonte da rocha com explosivos, o carregamento e o transporte do minério desmontado à unidade de britagem.

2. PREPARAÇÃO E DECAPEAMENTO

A preparação do terreno para início das operações de lavra, em uma pedreira, constitui uma fase bastante delicada para o bom andamento dos futuros trabalhos de desmonte da rocha. Nessa fase, é importante se preservar parte do solo removido para posterior recuperação da área lavrada. Dessa forma, durante o planejamento das operações de lavra deve ser reservada uma área adequada à estocagem de solo.

As espessuras das coberturas de solo residual, inclusive o desenvolvimento dos horizontes do solo, variam muito de região para região, dependendo das condições climáticas e de relevo. Em alguns locais, espessas coberturas de solo requerem um manejo mais apropriado nas operações de decapeamento. Em outros, a pequena espessura e às vezes inexistência do solo, facilitam as operações iniciais.

Os equipamentos que são utilizados no processo de decapeamento em pedreiras incluem: tratores de esteira, carregadeiras frontais, escavadeiras e caminhões.

A remoção do solo residual ou outro material de cobertura da rocha gera, em geral, uma superfície irregular que dificulta as primeiras operações de perfuração e desmonte. Recomenda-se que seja feita uma limpeza da superfície coma remoção dos fragmentos de rocha, evitando ultralançamentos decorrente de materiais residuais.

3. PERFURAÇÃO

As operações de perfuração do maciço rochoso na lavra de pedreiras são importantes ao sucesso do desmonte da rocha. A correta execução da perfuração, assegurando que os furos efetivamente sejam desenvolvidos segundo o plano de fogo, mantendo-se malha como planejada, a correta inclinação e retilinidade. Essas são condições essenciais para assegurar os objetivos do desmonte.

Diversas técnicas de perfuração são empregadas nas pedreiras, variando muito no porte dos equipamentos, mas, de um modo geral, no Brasil ainda são adotados, na maioria das operações, equipamentos de pequeno a médio porte. Na indústria de produção de brita é utilizado principalmente o método de perfuração de rochas à percussão. As mais importantes variações dessa técnica compreendem os sistemas:

- percussão *down-the-hole* (DTH) ou perfuração de fundo de furo;
- percussão *tophammer* ou perfuração com martelo de superfície;
- perfuração pelo sistema COPROD (método desenvolvido pela Atlas Copco).

Além da perfuração por percussão, podem ser utilizados métodos rotopercussivos incluindo perfuração por trituração e rotação, por corte e rotação e por rotação e abrasão (perfuração adiamantada). Essas últimas técnicas são muito menos utilizadas e a perfuração adiamantada tem uso basicamente na exploração dos maciços rochosos.

Na perfuração por percussão a energia de impacto é transmitida da perfuratriz para a rocha por meio dos botões ou insertos de metal duro. A perfuração *down-the-hole* é caracterizada pelo martelo percussor posicionado imediatamente atrás da coroa de perfuração (Figura 1). A aplicação da energia de impacto de 18 a 25 kW é transferida diretamente do martelo a coroa (bit) de perfuração ou seja, o pistão da perfuratriz trabalha diretamente sobre o bit (metal duro utilizado para corte ou quebra da rocha). À medida que o furo vai avançando, o martelo vai descendo com a coroa. Quando o martelo impacta a coroa de perfuração, a energia cinética é transformada em uma onda de percussão. O martelo *down-the-hole* é acionado pneumáticamente.

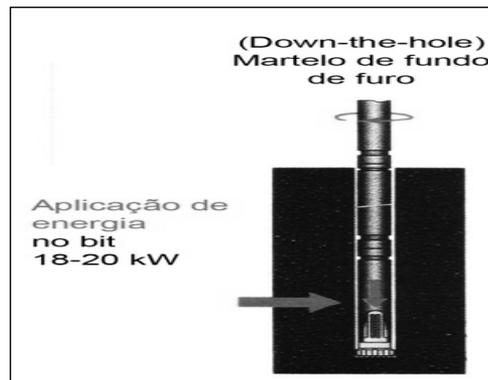


Figura 1 – Perfuração *down-the-hole*.

A técnica do *tophammer* ou martelo de superfície é caracterizada pela percussão do martelo fora do furo no topo do conjunto de hastes de perfuração, cuja energia de impacto, 18 a 30 kW, é transferida para a coroa de perfuração pelo conjunto de hastes (Figura 2). Perdas de 6 a 8% de energia ocorrem durante a transferência de energia causada por atrito nas conexões das hastes. Perdas adicionais podem ocorrer por atrito entre as hastes e as paredes do furo. Com o aumento da profundidade do furo, na comparação com o método *down-the-hole*, há uma perda da performance do equipamento.

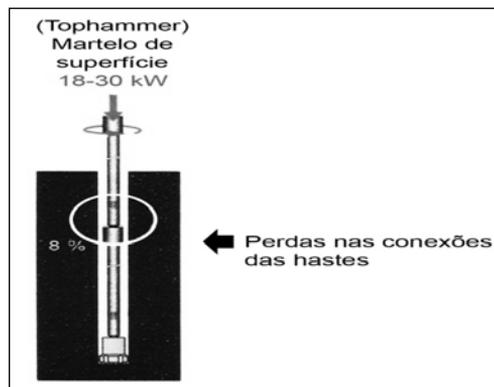


Figura 2 – Perfuração do tipo *tophammer*.

O sistema COPROD consiste de uma combinação de hastes de impacto com tubos de perfuração. As hastes de impacto transferem energia unicamente à coroa de perfuração, enquanto que os tubos de perfuração conduzem a força de impulsão e o torque rotacional (Figura 3). A peça terminal da coroa de perfuração permite que a energia de impacto gerada pela ação de percussão seja transferida por meio das hastes de impacto na forma de ondas de percussão diretamente à coroa de perfuração no fundo do furo. A energia de impacto aplicada é da ordem de 18 a 40 kW e os furos têm diâmetro maior do que 90 milímetros.

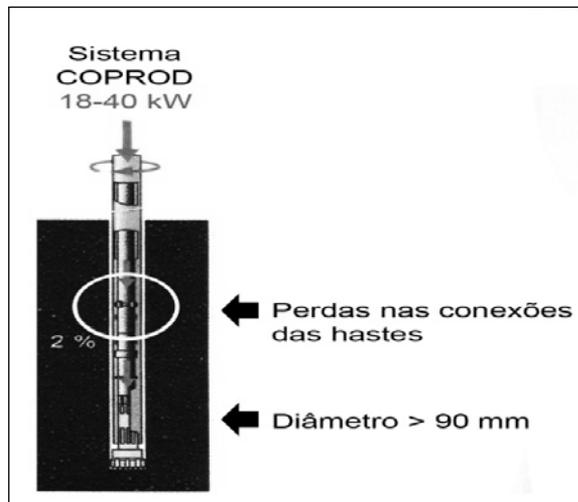


Figura 3 – Sistema de perfuração COPROD.

Na Tabela 1 consta uma comparação entre os diferentes métodos de perfuração utilizados nas operações de lavra em pedreiras modernas.

Tabela 1 – Comparação entre os métodos de perfuração para operações em pedreiras com altura de bancada de 20 m (FERNBERG, 2005).

Método de Perfuração	Martelo de Superfície	<i>Down-the-hole</i>	COPROD
Diâmetro do furo, mm	76-127	85-165	105-165
Taxa de penetração	Boa	Regular	Muito boa
Retilidade do furo	Regular	Muito boa	Muito boa
Profundidade do furo	Regular	Muito boa	Muito boa
Produção t/m/turno	Boa	Regular	Muito boa
C.C./m	Bom	Regular	Bom
C.C./M - Consumo combustível/m			

Muitas vezes, durante a perfuração ocorrem desvios da furação, em virtude de diversos fatores, entre eles, o uso inadequado dos equipamentos e as condicionantes geológicas do terreno, refletidas especialmente por materiais de diferentes durezas ou outras circunstâncias como existência de fraturas, zonas de cisalhamento e diferentes estratos. Esses desvios podem gerar problemas, posteriormente, durante a detonação dos explosivos no desmonte, podendo provocar excesso de vibrações no terreno e ultralanchamentos que podem ser perigosos para: operadores, equipamentos e vizinhança da pedreira.

Os principais erros e desvios que podem ocorrer durante a perfuração compreendem (KERBER *et al.*, 2007): desvios do furo para frente ou para trás da face da bancada, desvios laterais, desvio na inclinação ou azimute do furo, comprimento errado do furo e perdas de furo (Figura 4).

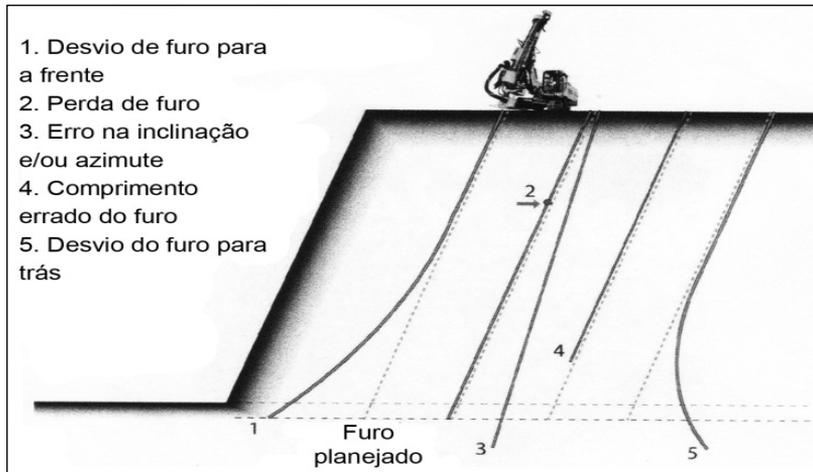


Figura 4 – Principais erros que ocorrem durante o desenvolvimento das operações de perfuração.

Os desvios da furação que ocorrem para frente da face da bancada podem diminuir sensivelmente o afastamento projetado, o que pode acarretar ultralanchamento. Ocorrendo o desvio para trás da face da bancada, a tendência é aumentar o afastamento, criando áreas ausentes ao efeito da energia dos explosivos daqueles furos, podendo ocasionar formação de repé (saliências rochosas no pé da bancada), fragmentação inadequada e excesso de vibrações no terreno. Desvios laterais modificam a relação de espaçamento planejado, redundando em problemas na fragmentação do material.

Erros na inclinação ou azimute do furo podem levar à perfuração inadequada do comprimento de um furo e modificar as relações de afastamento entre furos projetadas no plano de fogo. Quando ocorre um aumento da subfuração, a tendência é gerar uma maior vibração no terreno devido ao confinamento dos explosivos. Ao contrário, caso o furo não atinja a profundidade planejada, poderá surgir repé na praça de trabalho.

4. DESMONTE COM EXPLOSIVOS

O desmonte de rocha em pedreiras é realizado tradicionalmente por meio de explosivos. Embora várias questões de ordem ambiental, tais como ruído, ultralanchamentos e vibrações transmitidas à vizinhança, a utilização intensa de explosivos, no desmonte em pedreiras, está associado à eficiência da técnica e aos custos associados, muito menores do que no desmonte mecânico.

O planejamento do desmonte, com utilização de explosivos, é influenciado por diversos fatores, os quais necessitam de controle para que os objetivos pretendidos do desmonte sejam efetivamente alcançados. A escolha do método e dos equipamentos de perfuração, a distribuição, o diâmetro e profundidade dos

furos, o tipo de explosivo a ser utilizado e a qualificação da equipe de desmonte são, por exemplo, fatores relevantes para o sucesso do desmonte, mas, as condições geológicas têm papel fundamental e sempre devem ser consideradas no projeto.

Para uma melhor compreensão dos aspectos que envolvem o desmonte de rochas, com utilização de explosivos, é necessário o entendimento dos processos inerentes fragmentação da rocha. A fragmentação inicia com a detonação do explosivo e a partir desse momento ocorre uma interação da ação do explosivo com a rocha (Figura 5). O tipo de explosivo, a geometria da furação imposta ao maciço rochoso, o padrão de iniciação da detonação e as características do maciço rochoso são responsáveis pela fragmentação e formação da pilha desmontada. A detonação do explosivo promove uma liberação de enorme quantidade de energia na forma de calor e pressão de gases de forma rápida e violenta. Diversas teorias desenvolvidas nos últimos anos procuram explicar o mecanismo associados aos processos de fragmentação, sendo que as principais são: reflexão, expansão de gases, ruptura flexural, ondas de tração e expansão de gases, ondas de tração, expansão de gases e ondas de tração/defeitos, nucleação, torque e crateramento (OLOFSSON, 1989).

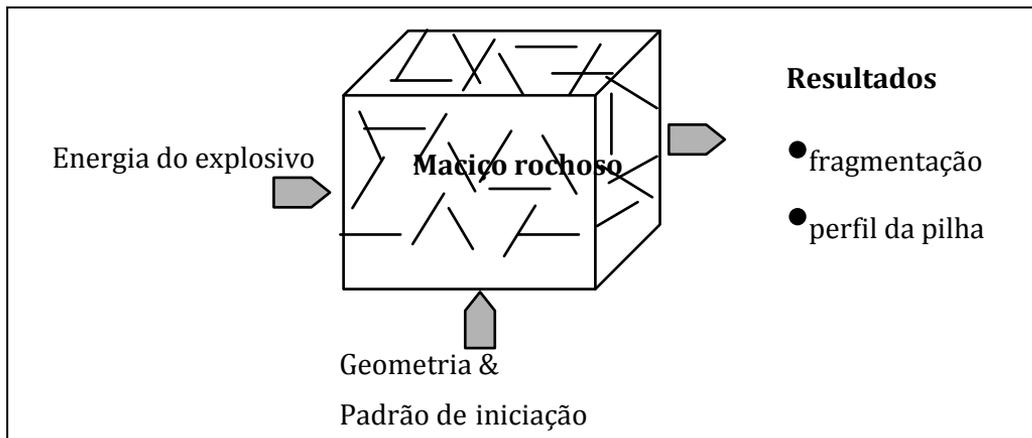


Figura 5 – Interação do explosivo com o maciço rochoso.

Em resumo, com base na detonação do explosivo, o processo compreende, inicialmente, uma forte compressão do maciço rochoso, por uma onda de choque que se propaga pela rocha com velocidades no intervalo de 2.000-7.000 m/s, dependendo do tipo de rocha e do explosivo utilizado. Essa onda de compressão provoca microfissuras no entorno do furo carregado com explosivos, dando início ao processo de fraturamento da rocha. Na sequência, a onda de choque pode sofrer reflexões nas superfícies livres (face da bancada ou planos de descontinuidade existentes na rocha). A onda de compressão é, então, transformada em ondas de tração e cisalhamento, aumentando o processo de fraturamento (Figura 6). Observa-se o alargamento do furo pela onda

compressional, com o aparecimento de fraturas radiais. As ondas de tração geradas pela reflexão das ondas de choque, nas superfícies livres, induzem a continuidade do fraturamento da rocha e o deslocamento (*spalling*) na face da bancada (SCOTT *et al.*, 1996). A seguir, grandes volumes de gás são liberados, que penetram e expandem as fissuras existentes. O gás pode promover, também, o lançamento da rocha no sentido da face da bancada e o mecanismo de ruptura flexural (Figura 7).

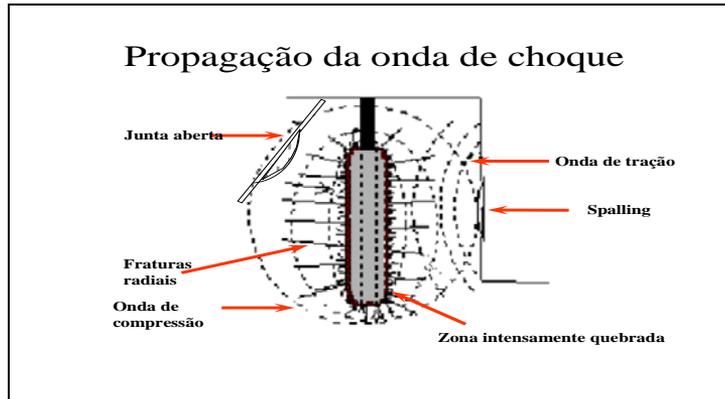


Figura 6 – Propagação da onda de choque no maciço rochoso. (Modificado de SCOTT *et al.*, 1996).

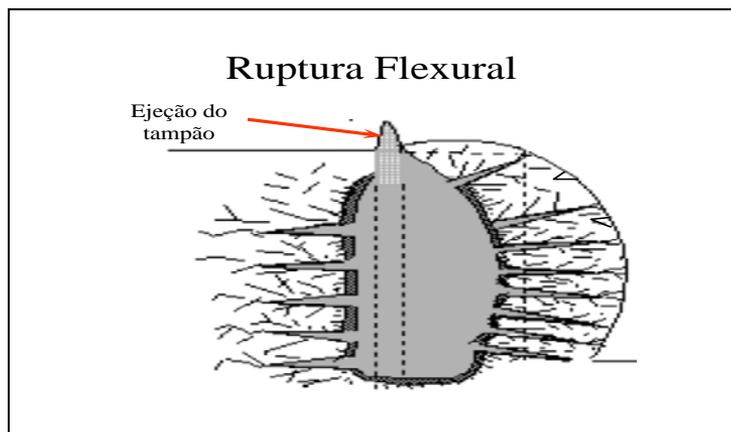


Figura 7 – Ruptura flexural da bancada promovida pela expansão dos gases promovendo o lançamento do material para frente da bancada. (Modificado de SCOTT *et al.*, 1996).

O desmonte de rochas em pedreiras segue o método de bancadas simples ou múltiplas, dependendo do porte e condicionamento topográfico e geológico do maciço rochoso. De um modo geral, no Brasil as lavras em pedreiras são desenvolvidas em encostas e, poucas, são configuradas na forma de cavas (*open pit*). O método de bancadas é o método mais comum para desmontes com

utilização de explosivos. A organização dos furos paralelos a faces livres, permite uma fácil fragmentação do maciço rochoso tornando, dessa forma, o método de bancadas em um dos mais fáceis, eficientes e econômicos de desmonte.

Para uma melhor compreensão do desmonte em bancadas (Figura 8) é necessário estabelecer uma nomenclatura identificando todos os elementos do projeto de desmonte ou do plano de fogo. Esses elementos estão ilustrados nas Figuras 9 e 10.



Figura 8 – Desmonte em bancadas em pedreira de basalto.

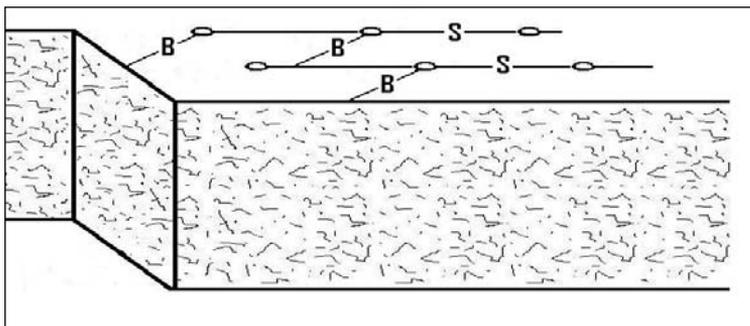


Figura 9 – Diagrama representativo de uma bancada com malha em estilo pé-de-galinha onde estão inseridos: B = afastamento (*burden*) e S = espaçamento (*spacing*).

Observam-se, na Figura 9, os elementos geométricos que constituem a malha de perfuração do plano de fogo. O afastamento (B) ou *burden* corresponde a distância normal da linha de furos até a face da bancada ou a distância normal entre duas linhas de furos e o espaçamento (S) é a distância entre furos de uma mesma linha. A malha pode ser organizada em uma configuração quadrada, retangular ou em pé-de-galinha. A razão entre o espaçamento e o afastamento (S/B) tem grande impacto no resultado da fragmentação e 1,4 pode ser considerado um valor médio satisfatório.

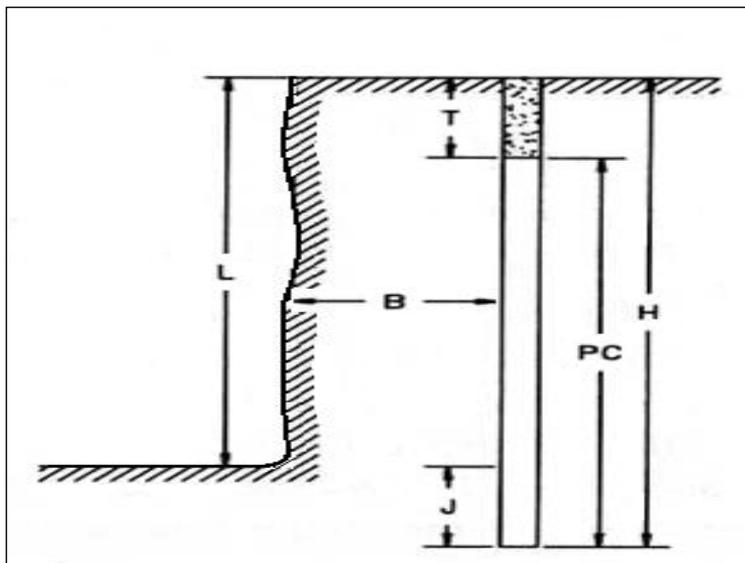


Figura 10 – Seção lateral de uma bancada com delimitação dos elementos geométricos: L = altura da bancada; B = afastamento; T = tampão; H = comprimento do furo; PC = comprimento da carga de explosivos; J = subfuração.

Na Figura 10 ilustram-se os demais elementos necessários à elaboração do plano de fogo. O tampão (T) é constituído por material inerte e tem a função de reter a energia do explosivo no furo, não permitindo que a energia se dissipe pelo topo da bancada, sem realizar a fragmentação esperada. Além disso, serve para controlar e reduzir o ultralançamento. O material utilizado no tampão deve ser granular, por exemplo, brita e o tamanho de partículas dependerá do diâmetro da furação. Pó de furação, embora muito utilizado, deve ser evitado como material do tampão. A subfuração (J) corresponde a um incremento na profundidade do furo, é utilizada muitas vezes no intuito de impedir a formação de repé na bancada.

Outro componente do desmonte, com destaque especial, é o explosivo a ser utilizado. Os explosivos comerciais mais empregados no desmonte em pedreiras podem ser agrupados em duas categorias: (i) ANFO e (ii) emulsões e blendados.

O ANFO é constituído essencialmente por nitrato de amônia (AN) e óleo combustível (FO) e tem densidade em sua maioria entre 0,8 e 0,9 g/cm³. Nas emulsões, gotas microscópicas de sais oxidantes, como nitratos de amônia, sódio e cálcio, estão dispersas em uma fase contínua de óleo, formando uma mistura do tipo água no óleo. Outros elementos podem ser adicionados, na matriz da emulsão, para controlar a densidade que em geral varia de 0,7 a 1,35 g/cm³. Os blendados correspondem a misturas de ANFO e emulsões.

A seleção de explosivos pode ser feita com base nas condições geológicas da jazida, principalmente, a existência d'água, fraturas e características de resistência da rocha. Quando há a água, deve-se optar por emulsões e blendados. O ANFO é o explosivo mais utilizado em condições secas, devido a sua baixa performance no ambiente aquoso. O baixo custo do ANFO é responsável pela sua grande comercialização. No caso de rochas muito fraturadas, em condições secas, a preferência é, também, pelo ANFO. Quanto mais resistente for a rocha, de um modo geral, deve-se optar por um explosivo com maior densidade.

Outro conceito importante no plano de fogo é a definição da razão de carga (R_c), ou seja, a massa de explosivos necessária para fragmentar uma dada quantidade de rocha. A razão de carga é expressa usualmente em kg/m^3 ou kg/t . Na Tabela 2 estão registrados alguns parâmetros que relacionam, de modo preliminar, o tipo de rocha à resistência à compressão e à razão de carga. As condições de fraturamento da rocha devem ser levadas em consideração, em geral, quanto maior o fraturamento menor a razão de carga a ser utilizada. Variações na razão de carga podem ser obtidas modificando-se as relações de afastamento e espaçamento na malha de perfuração. A fragmentação da rocha tende a aumentar com o aumento da razão de carga.

O volume de rocha fragmentado por furo (V_f) é calculado multiplicando-se o afastamento pelo espaçamento e pela altura da bancada: $B \times S \times L = V_f$. O volume total de rocha (V_t) desmontado é calculado multiplicando-se o número de furos (N_f) do plano de fogo pelo volume de rocha fragmentado por furo: $V_f \times N_f = V_t$.

Tabela 2 – Razão de carga para algumas rochas considerando a sua resistência mecânica.

Tipo de rocha	Resistência à compressão (MPa)	Razão de carga (kg/m^3)
Granito, basalto	> 150	0,70
Dolomito, xistos	100-150	0,45
Arenitos, calcários	50-100	0,30
Carvão	<50	0,15-0,25

Diferentes métodos para dimensionamento do plano de fogo são encontradas na literatura moderna sobre explosivos, destacando-se alguns como (OLOFSSON, 1989), KONYA, 1995 & SEM, 1995). No entanto, métodos empíricos são ainda muito utilizados e, de um modo geral, são de fato a melhor opção para iniciar o planejamento. Os métodos empíricos são de fácil utilização e de simples entendimento. A seguir, são descritos alguns métodos que podem ser utilizados preliminarmente para o projeto de desmonte de rocha com utilização de explosivos e que fazem parte da experiência dos autores e combinação de fórmulas empíricas clássicas.

Para o início do plano de fogo, pode ser adotada uma razão de carga de 500 a 600 g/m³. Essa razão de carga assegura uma boa fragmentação de rocha, quando se utiliza a técnica de desmonte em bancadas. Deve-se observar, no entanto, qual é o objetivo do plano de fogo. Caso se necessite uma menor fragmentação da rocha, a razão de carga deve ser reduzida.

O plano de fogo pode ser iniciado pela definição da altura da bancada, a qual depende do diâmetro de furação:

$$L \text{ (altura da bancada)} = 100 \text{ a } 120 D \text{ (diâmetro do furo).}$$

Essa altura é idealizada para os casos onde a perfuração pode ser feita de forma aceitável. Deve ser observado, também, que a altura deverá guardar uma proporção com o afastamento (B), a altura precisa ser pelo menos 4 vezes o afastamento, para se obter uma boa fragmentação. Bancadas muito baixas ocasionam vários problemas, por exemplo, fragmentação inadequada e ultralancamento.

A definição do afastamento (B) e do espaçamento (S) é feita em função do diâmetro do furo e deve guardar uma relação média entre esses fatores de 1,4 ($S = 1,4 B$):

$$B \text{ (afastamento)} = 25 \text{ a } 30 D \text{ (diâmetro do furo).}$$

$$S \text{ (espaçamento)} = 35 \text{ a } 45 D \text{ (diâmetro do furo).}$$

O tampão (T) pode ser dimensionado com valores entre 0,7 a 1,3 vezes o afastamento (B), recomenda-se iniciar com:

$$T \text{ (tampão)} = B \text{ (afastamento).}$$

Caso haja preocupação com ultralancamentos, em pedreiras próximas de áreas urbanas, recomenda-se aumentar o comprimento do tampão. O tamanho do material do tampão deve ser de 1/8 do diâmetro do furo.

A subfuração (J) pode ser necessária para evitar a formação de repé. Quando existem planos de descontinuidade que podem ser utilizados como base da bancada, em geral, não será necessário a subfuração. Utiliza-se a subfuração considerando-se o afastamento:

$$J \text{ (subfuração)} = B/3.$$

O comprimento do furo (H) será:

$$H = L + J \text{ em metros.}$$

O comprimento da carga de explosivos (PC):

$$PC = L + J - T \text{ em metros.}$$

Para se calcular a densidade de carga de explosivos (W), em kg/m a ser colocada em cada furo, podem ser utilizadas as tabelas de especificações dos explosivos fornecidas pelos fabricantes, ou utilizar-se a seguinte fórmula:

$$W = SGe \times D^2 / 1273 \text{ (kg/m)}, \text{ onde}$$

SGe = densidade do explosivo;

D = diâmetro do explosivo em mm.

A massa total de explosivos por furo (Wf) é calculada da seguinte forma:

$$Wf = PC \text{ (m)} \times W \text{ (kg/m)} \text{ em kg.}$$

A massa total de explosivos do desmonte (Wt) é calculada multiplicando-se o número de furos (Nf) pelo Wf ($Wt = Wf \times Nf$). O volume de rocha a ser desmontado é calculado conforme a formulação já descrita. Conhecendo-se a quantidade de explosivos e o volume de rocha, pode-se calcular a razão de carga (Rc):

$$Rc = Wf/Vf \text{ em kg/m}^3 \text{ ou } Rc = Wt/Vt \text{ em kg/m}^3.$$

A razão de carga calculada deve ser comparada com a razão de carga recomendada. Caso não esteja entre o intervalo considerado para promover uma boa fragmentação, devem-se ajustar os elementos do plano de fogo, para atingir essa meta.

A geometria da malha de perfuração pode ser organizada de diferentes formas: quadrada, retangular ou pé-de-galinha. De um modo geral, a configuração em pé-de-galinha permite uma melhor distribuição dos efeitos dos explosivos. O sequenciamento da detonação, também, é fator extremamente importante para o sucesso do desmonte de rocha. O tempo de detonação de cada furo tem implicações na fragmentação do material, no lançamento e forma da pilha de desmontado, na geração de vibrações no terreno e ruídos. Retardos muito pequenos provocam o movimento das últimas fileiras de furos, antes que ocorra o movimento de rocha correspondente ao primeiro afastamento. Isso faz com que ocorra uma menor fragmentação do material e possivelmente dificulte o fraturamento da rocha, atrás da última linha de furos, criando obstáculos à próxima detonação. O intervalo de tempo a ser adotado nos retardos, depende do afastamento efetivo e do espaçamento e deve ser calculado furo a furo e linha por linha.

A Figura 11 ilustra um exemplo de configuração de malha e sequencia de detonação. A opção por uma ou outra configuração dependerá das condições de operação da pedreira e da disponibilidade de equipamentos de carregamento. Carregadeiras frontais, por exemplo, demandam pilhas baixas e podem ser mais espalhadas.

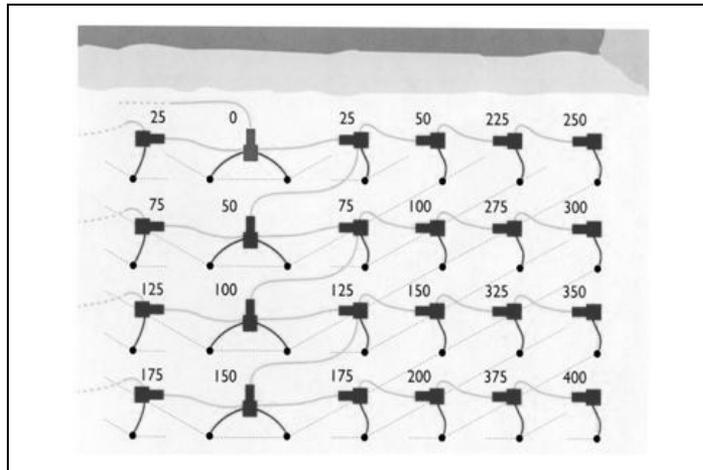


Figura 11 – Configuração de malha regular de furação e sugestão de sequenciamento de detonação.

Para ilustrar a elaboração de um plano de fogo, segue um exemplo para pedra em granito com bancadas verticais de 12 m e diâmetro de furo de 100 milímetros. Nesse caso, as condições dominantes são secas, ou seja, sem água nos furos. Com base nisso, o explosivo selecionado pode ser o ANFO com cartuchos de emulsão como iniciadores (*primers*). Assume-se que a densidade geral, para o ANFO e emulsão, seja de $0,85 \text{ g/cm}^3$. A malha de perfuração será feita em pé-de-galinha. Os principais elementos do plano de fogo podem ser dimensionados da seguinte forma:

$$B \text{ (afastamento)} = 25 \times D \text{ (diâmetro do furo)} = 2,5 \text{ m.}$$

$$S \text{ (espaçamento)} = 35 \times D = 3,5 \text{ m.}$$

$$T \text{ (tampão)} = B = 2,5 \text{ m.}$$

$$J \text{ (subfuração)} = B/3 = 0,83 \text{ m, adota-se } 0,8 \text{ m.}$$

$$H \text{ (comprimento do furo)} = L + J = 12,8 \text{ m.}$$

$$PC \text{ (comprimento da carga de explosivo)} = H - T = 10,3 \text{ m.}$$

$$W \text{ (densidade de carga do explosivo)} = SGe \text{ (densidade do explosivo)} \times D^2/1273 \text{ (kg/m)} = 6,67 \text{ kg/m.}$$

$$Wf \text{ (massa total de explosivos por furo)} = PC \times W = 68,7 \text{ kg.}$$

$$Vf \text{ (volume de rocha fragmentado por furo)} = B \times S \times L = 105 \text{ m}^3.$$

$$Rc \text{ (razão de carga)} = Wf/Vf = 0,654 \text{ kg/m}^3.$$

Os elementos do plano de fogo assim definidos servirão para um bom início do desmonte. A otimização do desmonte poderá ser feita à medida que os parâmetros de fragmentação desejados não são alcançados.

5. CARREGAMENTO E TRANSPORTE

O carregamento e transporte em pedreiras, tradicionalmente, é feito com o sistema carregadeira frontal/caminhão (Figura 12). Outras opções de equipamentos para o carregamento incluem pás-carregadeiras (*shovels*) ou escavadeiras. A Figura 13 ilustra esquematicamente esse sistema. O transporte por caminhão vai desde a frente de lavra, até a unidade de britagem e depois para o mercado consumidor.

Os crescentes aumentos no preço do petróleo, considerando-se ainda que a tendência de crescimento de preços será mantida para os próximos anos, têm feito com que os operadores de pedreiras procurem melhores práticas e tecnologias para permanecerem competitivos no mercado. O sistema de carregamento e transporte utilizado hoje, na maioria das pedreiras brasileiras, baseado no caminhão, compõe um grande fator de custo nas operações de produção de brita. O sistema de transporte por caminhões é tradicionalmente preferido pelos engenheiros de minas, devido a grande flexibilidade e mobilidade do equipamento.



Figura 12 – Sistema carregadeira frontal/caminhão usualmente empregado em pedreiras com trator dando suporte em operações auxiliares.

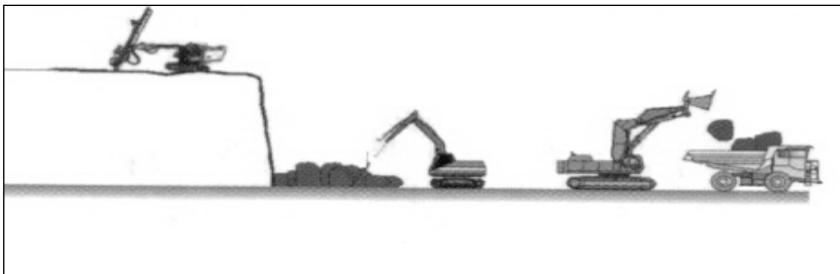


Figura 13 – Sistema de carregamento e transporte usualmente utilizado em pedreiras. Esquematização mostrando sistema escavadeira/caminhão.

Uma das possibilidades para reduzir o uso de caminhões seria a adoção de um sistema contínuo de transporte, as correias transportadoras. Esse sistema pode ser favorecido caso seja instalada uma unidade móvel de britagem (Figura 14) a ser empregada nas frentes de lavra. Em 1956, o primeiro sistema de britador móvel foi instalado em uma pedreira de calcário na Alemanha (SATTARVAND & NIEMANN-DELIUS, 2007). O britador permitiu ao operador da pedreira tirar vantagem de um sistema de correia transportadora, eliminando os custos de transporte por caminhões e de construção e manutenção de estradas. Desde aquela época, o número e a capacidade de unidades móveis de britagem e sistemas de correia transportadora cresceram, tornando-se uma das alternativas mais favoráveis, não apenas para pedreiras, mas, também, para grandes minas a céu aberto. Esse tipo de sistema diminuiu muito o custo com energia, no entanto, representa custos elevados de investimentos, justificando o seu uso apenas para operações que envolvam grandes volumes de minério e intenso transporte. Outra desvantagem é que nos casos de quebra de equipamento, isso implica na parada total do sistema.



Figura 14 – Planta de britagem móvel.

Outras possibilidades de uso de equipamentos, diretamente nas frentes de lavra, incluem a utilização de peneiras móveis (Figura 15) e unidades integradas com britagem e peneiras móveis (Figura 16). Esses sistemas de pequeno porte permitem britagem e/ou seleção de material na frente de lavra. A alimentação dessas unidades móveis pode ser feita com escavadeiras e/ou carregadeiras, cuja sequência de transporte, pode ser combinada com caminhões.

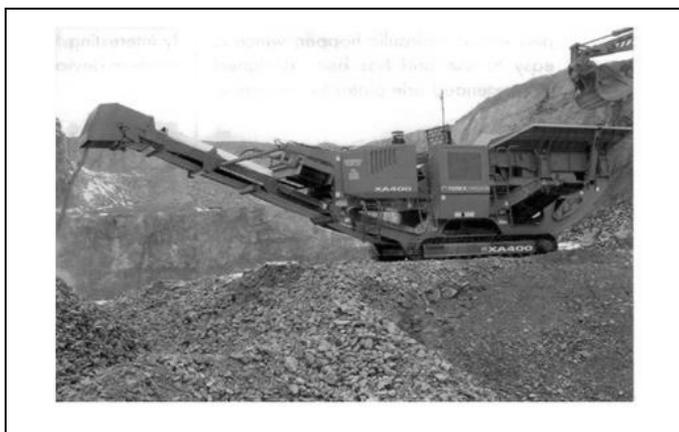


Figura 15 – Peneiras móveis utilizadas diretamente na frente de lavra.

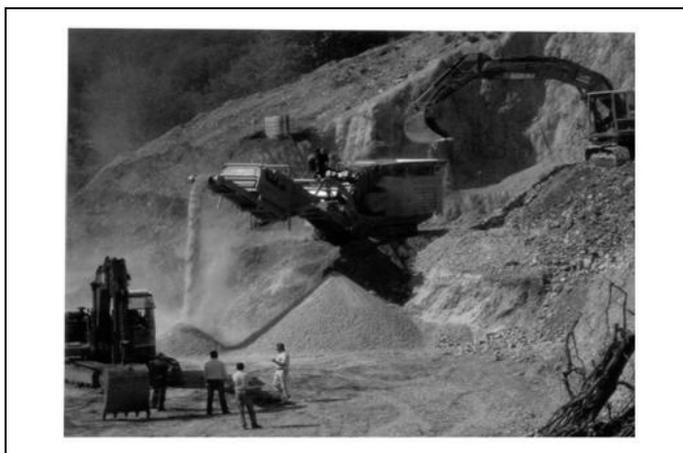


Figura 16 – Unidade móvel compacta incluindo britagem e peneiras. Escavadeiras fazem o carregamento.

6. IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos ambientais decorrentes das operações mineração nas pedreiras estão ligados essencialmente às operações unitárias de perfuração e desmonte de rochas, transporte e carregamento do material desmontado e cominuição na unidade de britagem. Impactos visuais são decorrentes das operações mineração de um modo geral e são de difícil avaliação.

Os impactos associados com o desmonte de rochas especificamente estão relacionados à propagação de vibrações no terreno, pressão acústica ou ruídos, ultralanchamentos, poeiras, gases e lixiviação de elementos químicos constituintes dos explosivos para a água subterrânea. Esses impactos são mais significativos quando as pedreiras estão próximas a áreas urbanas. Assim, as pedreiras são alvo

de reclamações por parte da população, decorrentes, em geral, do incômodo proporcionado por ruídos, poeira e vibrações. Portanto, é essencial que haja um controle desses impactos minimizando sua intensidade além dos limites da empresa.

A Figura 17 ilustra os impactos relacionados diretamente à operação de desmonte de rochas com utilização de explosivos. Observa-se que as ondas sísmicas compressoriais (P) e de cisalhamento (S) se propagam pelo terreno e pode chegar até estruturas civis (casa, edifício, etc.). À medida que essas ondas se afastam do ponto de detonação elas são atenuadas pelo terreno. Estruturas próximas da detonação poderão sofrer danos, dependendo da intensidade dessas vibrações. Limites para avaliação de risco de danos foram estabelecidos pelo NBR 9653 (ABNT, 2005) – “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos pelas minerações em áreas urbanas” com base na velocidade de vibração de partícula de pico, na frequência de vibração de partícula, no deslocamento de partícula de pico, no critério de distância escalonada e em limites de pressão acústica.

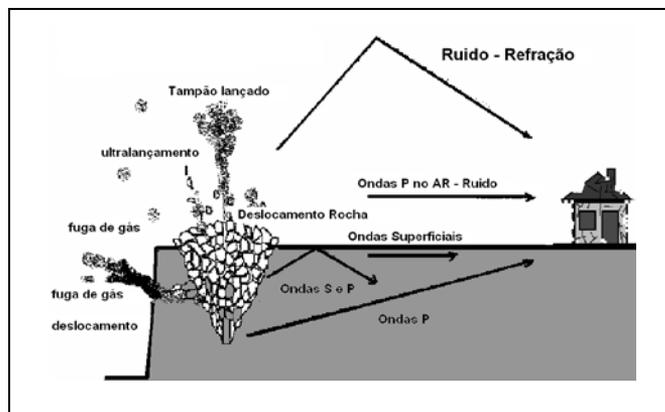


Figura 17 – Impactos provocados pela detonação dos explosivos na frente da pedreira. As ondas P e S podem atingir estruturas próximas às áreas de detonação provocando vibrações e as ondas P propagadas no ar podem provocar ruídos atingindo estruturas próximas. Observam-se, também, eventos de ultralancamento e fugas de gás.

Os limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência, estabelecidos pela NBR 9653, acima dos quais podem ocorrer danos induzidos pela propagação de vibrações no terreno estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência (NBR 9653).

Faixa de Frequência	Limite de velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s

Nota: para valores de frequência abaixo da 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

A pressão acústica medida além da área de operação da pedreira não deve ultrapassar o valor de 100 Pa, o que corresponde a um nível de pressão acústica de 134 dBL pico.

Ultralaçamento é definido pela NBR 9653 como sendo o arremesso de fragmentos de rocha decorrente do desmonte com uso de explosivos, além da área de operação. Dessa forma, esse ultralaçamento não deve ocorrer além da área de operação da pedreira, respeitadas as normas internas de segurança de operação de desmonte. Vale lembrar, que o empreendedor deve considerar, também, a necessidade de evitar danos provocados por ultralaçamento em sua própria estrutura.

De um modo geral, poeiras, gases e lixiviação de elementos químicos para água subterrânea em operações de pedreiras promovidos pelo desmonte de rochas com utilização de explosivos não são muito significativos. A poeira se concentra em maior quantidade na operação de britagem e movimentação de caminhões, podendo ser controlada por aspersão de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FERNBERG, H. (2005). Principles of rock blasting. In: Surface Drilling, Atlas Copco, Suécia, p. 6-8.
- KERBER, R., TUDESHKI, H. e REBEHN, T. (2007). Investigation into piercing rectilinear blastholes into hard rock. In: Aggregates International, Julho/Agosto, Alemanha, p. 22-31.
- KONIA, C. J. (1995). Blast Design. Intercontinental Development, Montville, Ohio, USA, 230p.
- NBR 9653 (2005). Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos pelas minerações em áreas urbanas- Procedimentos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 10p.
- SATTARVAND, J. e NIEMANN-DELIUS, C. (2007). The crude oil price fluctuations and its effect on haulage system of large hard-rock open pit mines. In: Aggregates International, Julho/Agosto, Alemanha, p. 44-50.

- SCOTT, A., COCKER, A., DJORDJEVIC, N., HIGGINS, M., LA ROSA, D., SARMA, K. S. e WEDMAIER, R. (1996). Open pit blast design – Analysis and Optimisation. JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, Queensland, Austrália, 338p.
- SEN, G. C. (1995). Blasting Technology for Mining and Civil Engineers. University of New South Wales Press Ltd, Sydney, Austrália, 146p.
- OLOFSSON, S. O. (1989). Applied Explosives Technology for Construction and Mining. Applex, Suécia, 200p.