



**Coordenação de Apoio Técnico às Micro e Pequenas Empresas - CATE**  
**Centro de Tecnologia Mineral - CETEM**  
**Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI**

## **LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

**Francisco Wilson H. Vidal**  
Tecnologista Sênior

**José Roberto Pinheiro**  
Eng. de Minas

**Núria Fernández Castro**  
Tecnologista Pleno

**Adriano Caranassios**  
Tecnologista Pleno.

**Rio de Janeiro, junho de 2014**

**CCL-0002-00-14 CAPÍTULO DO LIVRO TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS:  
PESQUISA, LAVRA E BENEFICIAMENTO. Vidal, F.V.; Azevedo, H.C.A.; Castro, N. F. Rio de  
Janeiro: CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3. p 153 - 257**

# TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Pesquisa, Lavra e Beneficiamento

**EDITORES**

**Francisco W. H. Vidal,  
Hélio C. A. Azevedo e  
Nuria F. Castro**

**CETEM**  
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

CETEM/MCTI  
Rio de Janeiro/2014

## TECNOLOGIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS: PESQUISA, LAVRA E BENEFICIAMENTO

### Editores:

Francisco Wilson Hollanda Vidal - CETEM/MCTI

Nuria Fernández Castro - CETEM/MCTI

Helio Carvalho Antunes de Azevedo – CBPM

### Autores:

Adriano Caranassios - CETEM/MCTI (*In Memoriam*)

Angêlica Batista Lima – CPRM/MME

Antônio Rodrigues de Campos - CETEM/MCTI

Carlos César Peiter - CETEM/MCTI

Carlos Rubens Araujo de Alencar – HEAD Participações

Cid Chiodi Filho – ABIROCHAS

Denise Kistemann Chiodi – KISTEMAN&CHIODI Assessoria e Projetos

Eunice Freitas Lima – CETEM/MCTI

Francisco Wilson Hollanda Vidal - CETEM/MCTI

Helio Carvalho Antunes de Azevedo – CBPM

Ilsan Sandrini – Consultor

José Roberto Pinheiro – ALVORADA Mineração Comércio e Exportação Ltda.

Júlio Cesar Souza – UFPE

Leonardo Cattabriga - CETEM/MCTI

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira - CETEM/MCTI

Luciana Marelli Mofati - CETEM/MCTI

Marcos Nunes Marques – UNIMINAS

Maria Heloísa Barros de Oliveira Frascá – MHB Serviços Geológicos Ltda.

Nuria Fernández Castro - CETEM/MCTI

Roberto Carlos da Conceição Ribeiro - CETEM/MCTI

Roberto Cerrini Villas-Bôas - CETEM/MCTI

Ronaldo Simões Lopes de Azambuja - CETEM/MCTI (*In Memoriam*)

Rosana Elisa Coppedê da Silva - CETEM/MCTI

Vanildo Almeida Mendes – CPRM/MME

### Colaboradores:

Abiliane de Andrade Pazeto, Ana Cristina Franco Magalhães, Arquiteto Paulo Barral, Arquiteto Renato Paldés, Carolina Nascimento Oliveira, Davi Souza Vargas, Diego Amador Rodrigues, Douglas Bortolote Marcon, Eder Ferreira Framil, Eduardo Coelho, Eduardo Pagani, Gilson Ezequiel Ferreira, Hieres Vetorazzi, Hudson Duarte, Isabela Rigão, Jefferson Camargo, Julio César Guedes Correia, Marcelo Taylor de Lima, Marcione Ribeiro, Michelle Pereira Babisk, Ronaldo Frizzera Matos, Thiago Bolonini, Victor Ponciano.

**Capa:** Bruno Dias Ferreira, Roger Ferreira de Lima, Ananda Menali Menezes Rodrigues

**Desenhos:** Cassiane Santos Tofano, Nuria Castro

**Revisão Português:** Danielle da Conceição Ribeiro, Verônica Bareicha

**Projeto gráfico/Editoração eletrônica:** Vera Lúcia do Espírito Santo, Thiene Pereira Alves

**Revisão:** Carlos Rubens de Alencar

### O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es)

Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento/Eds. Francisco W. H.

Vidal, Hélio C. A. Azevedo, Nuria F. Castro – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.

700p.: il.

1. Rochas ornamentais. II. Beneficiamento de minério. I. Centro de tecnologia Mineral.

II. Vidal, Francisco W. H. (Ed.). III. Azevedo, Hélio C. A. (Ed.). IV. Castro, Nuria F. (Ed.)

ISBN 987-85-8261-005-3

CDD 553

ESTE LIVRO FOI FINANCIADO POR

Secretaria de  
Geologia, Mineração e  
Transformação Mineral

Ministerio de  
Minas e Energia

# Agradecimentos

ANPO, Andreia Batista Teixeira, Antonio Augusto Pereira Souza (Fuji Granitos), Associação Ambiental Monte Líbano, Alvorada Mineração, Bruno Zanet, Cetemag, Comil Cotaxé Mineração, Decolores Mármore e Granitos, Emanuel Castro (Revista Rochas), Elzivir Guerra (SGM/MME), Enir Sebastião Mendes (SGM/MME), Fernando Vidal, Flamart Acabamentos do Brasil Ltda., Flávia Karina Rangel de Godoi, Flávio José Silva, Fundisa, IEMA, Granfaccin Granitos, Granitos Collodetti, Granitos Zucchi, Ivar Costa, Luiz Zampirolli, Marbrasa Mármore e Granitos, Mauro Varejão, Mineração Corcovado, Mineração Guidoni, Mineração Pagani, Mineração Santa Clara, Mineração Vale das Rochas, Nilza Hagai, Olívia Tirello (Centrorochas), Pedra Mosaico Português Cesar, Pedra Rio, Pemagran, Phillippe Fernandes de Almeida, Prefeitura Municipal de Cachoeiro de Itapemirim, Regina Martins, Rossittis Brasil S.A., Sindirochas, Tracomal Mineração, Volpi equipamentos.

## Dedicatória “*in memoriam*”

Nossa eterna gratidão e reconhecimento aos colegas que não chegaram a ver esta obra concluída, mas que em muito contribuíram com a sua elaboração e com o legado nela impresso:

Gildo Sá Cavalcanti de Albuquerque

Adriano Caranassios

Ronaldo Simões Lopes de Azambuja

# Sumário

Agradecimentos	
Dedicatória	
Apresentação	
Prefácio	
Prólogo	
Sumário	
<b>Capítulo 1:</b> Introdução	<b>15</b>
<b>Capítulo 2:</b> Tipos de rochas ornamentais e características tecnológicas	<b>43</b>
<b>Capítulo 3:</b> Pesquisa de rochas ornamentais	<b>99</b>
<b>Capítulo 4:</b> Lavra de rochas ornamentais	<b>153</b>
<b>Capítulo 5:</b> Aspectos legais das rochas ornamentais	<b>259</b>
<b>Capítulo 6:</b> Plano de aproveitamento econômico de rochas ornamentais	<b>285</b>
<b>Capítulo 7:</b> Beneficiamento de rochas ornamentais	<b>327</b>
<b>Capítulo 8:</b> Saúde e segurança no trabalho	<b>399</b>
<b>Capítulo 9:</b> Resíduos - tratamento e aplicações industriais	<b>433</b>
<b>Capítulo 10:</b> O setor de rochas ornamentais no Brasil	<b>493</b>
<b>Capítulo 11:</b> A busca da sustentabilidade na produção e uso das rochas ornamentais	<b>529</b>
Anexo	<b>567</b>
Glossário e dicionário	<b>587</b>

# Capítulo 4

---

## Lavra de rochas ornamentais

*Francisco Wilson Hollanda Vidal, Eng. de Minas, DSc., CETEM/MCTI  
José Roberto Pinheiro, Eng. de Minas, ALVORADA Mineração, Comércio e Exportação  
Nuria Fernández Castro, Enga. de Minas, MSc., CETEM/MCTI  
Adriano Caranassios, Eng. de Minas, DSc., CETEM/MCTI †*

## 1. Aspectos históricos da lavra de rochas ornamentais

O uso da pedra pelo homem remonta a tempos pré-históricos quando foi utilizada para a confecção de utensílios domésticos, de armas para caça e guerra e como objetos sacros. Muito tempo mais tarde, por volta de 10.000 a.C., registra-se seu uso como elemento construtivo nas edificações de cunho religioso e a partir de 8.000 a.C. nas de habitação e de defesa das cidades, que surgiam então como unidade política e social na história da humanidade.

Especialmente na região da Mesopotâmia e no Egito, as rochas perpetuaram as figuras dos faraós, deuses e outras personalidades importantes na forma de grandes esculturas. Uma rocha calcária de grã muito fina esculpida em ricos detalhes e pintada com cores vivas, e também rochas lustráveis, muito duras, como granito vermelho e quartzito preto ou rosa, que eram esculpidas e polidas.

Ainda na sua utilização para grandes esculturas, teve importância, para a história da aplicação da rocha como elemento ornamental, a percepção de algumas propriedades de cor e textura do mármore que permitiam esculpir figuras humanas com coloração parecida com a da pele. Coincidentemente, esta descoberta deu-se durante a predominância da cultura naturalista da Grécia antiga, e teve como resultado uma grande produção artística e arquitetônica durante o período Clássico da cultura grega.

Foram também os gregos que levaram o uso do mármore para o domínio público, fosse em escultura ou em arquitetura. Mas, por outro lado, deve-se aos romanos sua aplicação em construções privadas, como símbolo do status e riqueza de seu proprietário.

Na antiguidade, o uso das rochas ornamentais foi bastante restrito, principalmente por causa do sistema de propriedade das minas e das técnicas disponíveis. No antigo Egito, a mina ou jazida de onde eram retiradas as rochas ornamentais eram de propriedade dos faraós. Na Grécia Clássica eram propriedades das cidades-estados, enquanto pelas leis romanas e do Império Bizantino as jazidas eram propriedades do tesouro do imperador. Cada um desses proprietários de jazidas possuía também seus próprios técnicos especializados na extração e no beneficiamento primário da rocha. Tais serviços eram realizados por grandes contingentes de escravos, com o uso de técnicas e ferramentas muito rudimentares.

As metodologias e técnicas desenvolvidas na Grécia e no Egito foram difundidas e evoluíram junto com a expansão do Império Romano pela Europa, disseminando a tecnologia pelos seus domínios, como no caso dos calcários e mármore de Portugal que, embora já fossem utilizados desde o século 18 a.C., foram amplamente exportados para Roma e suas províncias. Inicialmente, Roma fazia uso do mármore tipo travertino que se encontrava próximo à cidade e, foi incrementando suas construções com os mármore encontrados nas colônias, como aconteceu no período da ocupação da Península Ibérica com os mármore da região norte do Alentejo, conhecida como Anticlinal de Estremoz, época de que datam suas primeiras utilizações fora das regiões originalmente produtoras. Posteriormente, os romanos deslocando sua mão de obra escrava, passaram a realizar a extração do mármore das montanhas apuanas, cujo centro é Carrara e onde são extraídos até hoje os mármore mais famosos do mundo. Muitos artistas das mais variadas épocas, dentre eles Michelangelo, iam às montanhas apuanas escolher no local o material adequado para as suas obras.

A regulamentação do uso do subsolo como propriedade de interesse público somente veio aparecer por volta do período Medieval, sendo realmente mais difundido já na Idade Moderna, mas o sistema de concessão do direito de lavra para a iniciativa privada já se fazia observar desde então. Isto

levou ao desenvolvimento, no último século da Idade Média, de uma tradição técnico-profissional na extração e no beneficiamento de rochas ornamentais que, de uma forma ou de outra, sobrevive até os dias de hoje. Ao mesmo tempo as construções de grandes catedrais, edifícios públicos e dos palácios da nobreza medieval nas mais importantes cidades italianas, deram grande impulso ao uso do mármore como material nobre tanto na arquitetura quanto na arte.

Todavia, foi no auge do Renascimento que novos e diferentes materiais, com colorido diversificado proporcionaram um verdadeiro rompimento entre o mundo antigo e o novo, no que diz respeito ao uso das rochas ornamentais. Entre os séculos XVI e XVII muitos governos receberam uma grande quantidade de requerimentos de concessão de lavra de mármore de colorações diferentes, até então desconhecidos, a maioria ocorrida em novas províncias minerais com potencialidade de produção duvidosa. Esses materiais começam então a aparecer em policromias embutidas na arquitetura da época, sobretudo na arquitetura barroca. Esse surto de preferência pelas rochas de coloração mais exótica começa a enfraquecer na segunda metade do século XVIII, quando o estilo arquitetônico neoclássico redescobre o uso do mármore branco.

Com o advento da arquitetura colonial como um ramo do estilo neoclássico, o uso do mármore branco se difunde intensamente na região mediterrânea e também na América do Norte, que declarou há pouco sua independência, surgindo no cenário mundial como uma terra rica e promissora.

No século XIX o consumo de mármore aumentou significativamente, mas este incremento não se deu com um uso qualitativo do material. Em geral, o aumento no emprego do mármore foi observado pelo seu intenso uso como elemento estrutural em construções de moradia suburbana para a classe média que surgia.

Até o final do século XIX, início do século XX, quando se introduz a mecanização na extração e no beneficiamento do mármore, através do uso do fio helicoidal na extração e, em seguida, do tear, no desdobramento do bloco em chapas, o uso do mármore na arquitetura era mais intenso como elemento estrutural do que ornamental. Com o advento do aço e do concreto armado, juntamente com as novas técnicas de extração e beneficiamento, o mármore passa a ter maior aplicação em revestimentos, como elemento decorativo e de proteção das construções.

No século XX, graças às novas tecnologias, materiais mais duros começam ser utilizados também como revestimentos e é criado um mercado de “granitos” comerciais abrangendo grande variedade de materiais silicáticos de cores e texturas diferenciadas, como é o caso dos granitos brasileiros.

## 2. Introdução à lavra de rochas ornamentais

A lavra das rochas ornamentais consiste em uma atividade cujo objetivo é a remoção de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto da etapa de lavra ou extração é o bloco de arestas aproximadamente retangulares, de dimensões variadas que procuram obedecer ou aproximar-se tanto quanto possível daquelas que proporcionem o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos nas etapas de beneficiamento.

Como qualquer atividade mineral com razoável nível de desenvolvimento, a extração de rochas ornamentais também obedece a algumas fases para a sua execução.

As principais delas são a prospecção - para localização ou identificação da ocorrência mineral de rocha ornamental; a pesquisa mineral - para avaliação do potencial de aproveitamento da jazida e para levantar dados e informações que permitam fazer o melhor planejamento da

lavra; a lavra - que é a atividade produtiva da extração desenvolvida aplicando-se metodologias apropriadas às características do material e da formação geológica da jazida; e, por último, a recuperação da área degradada.

Grande parte das rochas ornamentais, em especial as rochas de revestimento, entendidas como a ABNT define, como rochas ornamentais submetidas a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, são obtidas de blocos de grande tamanho, com volumes de 8 a 12 m<sup>3</sup>, os quais são desdobrados em chapas que, após polimento ou tratamento superficial, são vendidas para se transformarem em ladrilhos ou placas de revestimento ou peças ornamentais, embora de utilidade, como pias, tampos de mesa, bancadas etc., como se mostra no capítulo 7 deste livro.

Existem outros tipos de lavra de rochas de revestimento, especificamente, para pedras foliadas como quartzitos, ardósias, e outras como gnaisses ou calcários facilmente separados em placas. Esses materiais são produzidos, normalmente, com tecnologias semimecanizadas como serras de piso para cortar bloquetes, de tamanho superficial padronizado (40 cm x 40, 50 cm x 50 cm,...) que serão posteriormente deslocados de forma manual. Esses casos não são tratados aqui em detalhes, pois este livro dá enfoque às rochas de revestimento produzidas a partir de blocos.

A extração dos blocos de rochas ornamentais pode ser realizada tanto por lavra à céu aberto como por lavra subterrânea. O primeiro tipo de lavra ocorre em maior frequência, sendo subdividido em dois grandes grupos: lavra de matacão e lavra de maciço. As figuras 1 e 2 mostram a lavra de matacão que é realizada extraindo blocos comercializáveis a partir de corpos arredondados de rochas que foram deslocadas do maciço, por erosão e irregulares tanto de tamanho quanto de distribuição espacial.

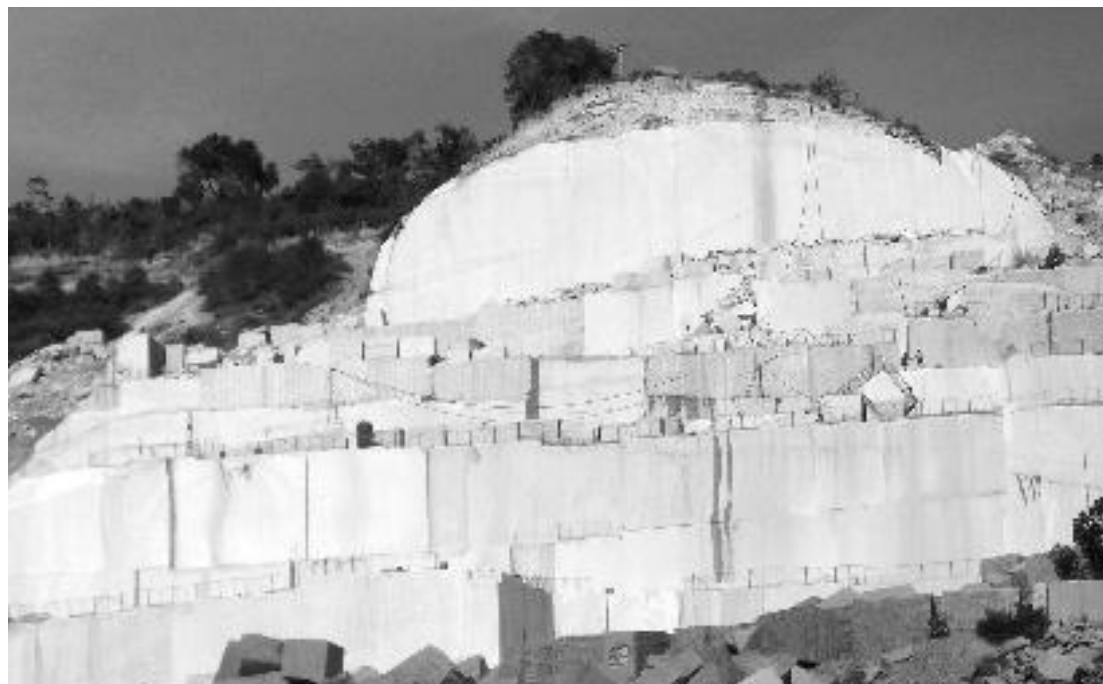


**Figura 1** - Lavra de matacões parada. Foto: Thiago Bolonini, 2010.



**Figura 2** - Lavra de matação do Granito Preto São Marcos, na Paraíba. Foto: Granitos FUJI, 2009.

A lavra do maciço (Fig. 3) apresenta maior incidência e é realizada, como o próprio nome indica, diretamente no maciço rochoso, sendo este último definido como o conjunto formado pela matriz rochosa e por todas as descontinuidades nela contidas.



**Figura 3** - Lavra de granito no maciço rochoso, no Espírito Santo. Foto: CETEM/MCTI, 2013.

A lavra em maciço pode ser realizada em pedreiras a céu aberto, as mais frequentes, ou em pedreiras subterrâneas. As pedreiras a céu aberto, instaladas em maciços rochosos, são agrupadas em:

- Pedreiras em cava sobre terrenos planos (Fig. 4);
- pedreiras em encostas de terrenos inclinados (Fig. 5); e
- pedreiras de nivelamento (Fig. 6).



**Figura 4** - Pedreira em Cava, em Portugal. Foto: CETEM/MCTI, 2008.



**Figura 5** - Pedreira em encosta, no Espírito Santo. Foto: CETEM/MCTI, 2010.





**Figura 6** - Pedreira de nivelamento, no Espírito Santo. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

Há diferentes configurações de pedreiras distribuídas em vários países produtores, onde há ocorrência de diferentes tipos litológicos e que se veem afetadas por fatores geomorfológicos. No território italiano, por exemplo, muitas lavras são desenvolvidas em zonas de montanha caracterizadas por relevos pronunciados, dando muita visibilidade às frentes de lavra abertas no topo ou em meia encosta (Fig. 7). É o caso da zona de ocorrência do mármore de Carrara, na qual os relevos são preponderantemente alterados devido às operações de lavra, que conferem um aspecto inconfundível à paisagem. Nas zonas de planície o impacto sobre a paisagem é menos acentuado, mesmo porque as pedreiras tendem a se desenvolver em profundidade. Em contrapartida, aumentam os problemas de interação com os centros urbanos ocasionando problemas nas atividades econômicas como agricultura, expansão territorial urbana e industrial, turismo entre outros como os de caráter protetor, principalmente a água. Portanto, intervenções de recuperação ambiental ou de restituição das áreas para usos alternativos são facilitadas e normalmente traduzem vantagens para a coletividade como acumulação hídrica, descarga controlada de rejeitos, atividades industriais alternativas etc.



**Figura 7** - Lavra desenvolvida em zona de montanha, na Itália. Foto: CETEM/MCTI, 2007.

Atualmente, os métodos de lavra a céu aberto e subterrâneo empregados nos mármore das regiões de Carrara (Itália) e Vila Viçosa (Portugal) bem como os critérios de escolha desses métodos associados à tecnologia de corte, demonstram que há diferentes soluções capazes de satisfazer às exigências técnicas produtivas nas mais variadas situações de lavra de uma jazida situada em uma topografia de relevos pronunciados. Na Itália e em Portugal há uma tendência atual, nas pedreiras de mármore, de passar progressivamente da lavra a céu aberto para subterrânea, cuja evolução natural é ditada por motivos econômicos e de reservas geológicas (Figs. 8 e 9).



**Figura 8** - Lavra subterrânea em Carrara - Itália. Foto: CETEM/MCTI, 2008.



**Figura 9** - Lavra subterrânea de calcário em Portugal. Foto: Luis Lopes, 2008.

No Brasil existe uma destacada diversidade de jazidas de granitos, mármore e afins (ardósias, quartzitos, basaltos e conglomerados), com grande disponibilidade de variedades litológicas distribuídas por boa parte do território nacional. Os principais estados produtores de rochas ornamentais estão situados na região sudeste e nordeste do país, nos estados de: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Ceará, e Paraíba.

As jazidas de mármore, granito e rochas afins normalmente possuem reservas muito superiores às das simples atividades produtivas e os volumes de interesse dependem essencialmente da geometria dos limites da reserva geológica ou das exigências técnicas colocadas pelo método de lavra e das tecnologias de corte.

De modo geral, a duração das atividades de lavra em uma determinada jazida é superior aos tempos de amortização dos equipamentos empregados, que são móveis (equipamentos de perfuração, de movimentação e transporte montados sobre pneus ou esteiras, equipamentos de corte etc.) ou semifixos (redes de distribuição de energia e ar comprimido, instalações de movimentação de cargas etc.) e, portanto, transferíveis de acordo com a evolução da lavra.

Por tais razões, a jazida é subdividida em projetos para porções delimitadas sob bases de condições geoestruturais ou sob bases de áreas de ações de eventuais sistemas de carregamento e movimentação semifixos constituindo-se em unidades produtivas da pedreira. O método de lavra indica as modalidades segundo cada volume que será lavrado.

Na maioria das jazidas de rochas ornamentais, os métodos de lavra são descendentes seja nas pedreiras a céu aberto, seja naquelas em subterrâneo. No caso da lavra a céu aberto os trabalhos preliminares destinados a preparação das pedreiras referem-se especialmente à retirada da cobertura de solo dos afloramentos desenvolvendo-se através da instalação de praças contendo uma ou mais bancadas. A espessura de capeamento dos depósitos de rochas ornamentais lavrados a céu aberto é relativamente pequena e na maioria dos casos é totalmente inexistente ou consistente em um pequeno capeamento de material areno-argiloso. Em tais situações, a retirada do capeamento pode, em alguns casos, revelar uma camada de material rochoso fraturado e alterado, que atinge espessuras superiores a alguns metros. Existem casos em que as espessuras das rochas alteradas assumem valores tão elevados que tornam a lavra a céu aberto economicamente inviável.

A melhor escolha do método de lavra a ser definido é função da morfologia dos afloramentos, dos volumes da reserva mineral, da análise do plano estrutural da jazida, de seu estado de fraturamento, da localização geográfica da área, e das características intrínsecas do material objeto da exploração.

### 3. Métodos de lavra

Os métodos de lavra podem ser considerados como sendo o conjunto de operações que definem a sequência espacial e os ciclos de trabalho, em função do tempo para o melhor aproveitamento de uma jazida em desenvolvimento, que é correlacionado com sua configuração geométrica, bem como com a sequência de avanço que se estabelece, visando os volumes a serem isolados e subdivididos.

A aplicação de uma metodologia de lavra para uma determinada jazida permite, em qualquer instante do seu desenvolvimento, a definição da geometria espacial da mina em toda a sua peculiaridade; a primeira operação é a identificação dos volumes, para em seguida determinar a sequência de extração. A definição das tecnologias, equipamentos ou materiais e energia, bem como as relativas modalidades de uso, representam uma informação adicional e não substitutiva no método.

Os principais métodos de lavra utilizados e que estão descritos neste capítulo são: lavra por desmoronamento, lavra seletiva, lavra de matacões, lavra de bancadas altas ou baixas, lavra de painéis verticais e lavra subterrânea.

A importância crescente que o setor de rochas ornamentais vem atingindo é confirmada pelo desenvolvimento tecnológico observado nas unidades produtivas, inclusive no segmento da extração, o que é, em parte, favorecido pelos aspectos de qualidade técnica e estética dos materiais.

O segmento extrativo encontra-se em um estágio de amadurecimento no Brasil, tendo incorporado a evolução tecnológica do setor e modificando e aperfeiçoando os métodos de lavra ao longo do tempo, de acordo com utilizações que se tornaram cada vez mais específicas e especializadas. De fato, hoje, a variedade de litologias do território brasileiro, tem permitido que os produtores brasileiros sejam, provavelmente, os melhores conhecedores da aplicação das diversas tecnologias de corte a materiais “duros” como são a maioria de rochas silicáticas.

Os métodos de lavra também evoluíram rápido, tanto pela necessidade de se aumentar a produção demandada pelo mercado internacional quanto pela evolução das tecnologias e, ainda, pela conscientização socioambiental. Até alguns anos atrás, por exemplo, era comum o método de desmoronamento para lavar rochas ornamentais; método aparentemente econômico, porém altamente destrutivo. Com a evolução das tecnologias de corte, e, principalmente, devido a uma maior difusa sensibilidade no que se refere à proteção dos valores ambientais, aquele método registrou uma gradativa e decidida diminuição na sua aplicação. O processo de transformação da lavra por desmoronamento em métodos de corte, acelerou-se em virtude do progresso científico e industrial que resultou no desenvolvimento de tecnologias e de equipamentos.

#### 3.1. Lavra por desabamento

O método de lavra por desmoronamento ou desabamento é aplicado para os casos em que a rocha se apresenta sob a forma de prismas delimitados por falhas ou planos de esfoliação, dispostos em afloramentos caracterizados por elevados gradientes topográficos. A estrutura cebolar existente no maciço rochoso, que consiste em fraturas subparalelas que acompanham a morfologia do maciço, permite que enormes volumes de rocha sejam removidos, por meio de desmontes realizados através do emprego de explosivo deflagrante, sendo a pólvora negra o explosivo carregado nos furos localizados na parte posterior desses volumes primários.

O desmoronamento ocorre ao longo dos planos de fraturas existentes, com auxílio da gravidade, a partir da deflagração da pólvora negra. Nos pontos de queda (pé da encosta), o volume desmontado é desdobrado em volumes secundários (filões), que serão tombados e esquadrejados em blocos (Fig. 10).

O método por desmoronamento de capas naturais é limitado a poucos casos, onde prevalecem as condições estruturais favoráveis. Embora sejam tomados todos os cuidados e precauções, é inevitável o desperdício de uma considerável quantidade de rocha, pelas características geológico-estruturais presentes no maciço e pelo desabamento propriamente dito, acarretando perdas econômicas pelo baixo índice de recuperação da lavra.

Há também o aumento do custo de transporte dos rejeitos gerados, para as pilhas de disposição controlada desses volumes descartados, para liberação dos espaços, evitando não comprometer a evolução dos trabalhos de lavra. De modo geral, as condições de segurança no método de lavra por desabamento são consideradas críticas.



**Figura 10** - Lavra por desmoronamento. Foto: José Roberto Pinheiro, 2003.

Particularmente, o método por desabamento também é observado em maciços rochosos, que apresentam fraturas provocadas por alívio de tensão, que são geradas no decorrer da lavra. Essas fraturas, denominadas de “esfoliação granítica de tensão residual”, são responsáveis pela formação de capas, que são removidas por desabamento, deixando para trás repês, para serem lavrados em seguida.

Em um passado relativamente recente, o método por desmoronamento predominava na lavra daqueles maciços rochosos, que não apresentavam os fatores estruturais necessários, para a sua aplicação. Assim, pelo amadorismo predominante na época, as fraturas eram provocadas por explosivos detonantes, comprometendo a integridade físico-mecânica da rocha, contribuindo para a baixa recuperação da lavra, e, em alguns casos, inviabilizando a continuidade produtiva da mina (Fig. 11).

Com a intensificação do emprego de técnicas racionais de lavra e da utilização de tecnologias avançadas de corte, seguidas pela maior profissionalização do Setor de Rochas Ornamentais, além de uma crescente sensibilização para a proteção dos valores ambientais, a lavra por desabamento de capas originadas por fraturamento induzido ou artificial, registrou um constante e gradual desinteresse, sendo, nos dias de hoje, praticamente abolida sua aplicação.



**Figura 11** - Lavra por desabamento de capas artificiais. Foto: Jose Roberto Pinheiro, 2003.

### 3.2. Lavra seletiva

O método de lavra seletiva aplica-se frequentemente nos casos onde o maciço a ser explorado possui, como característica, a presença de famílias distintas de fraturas com orientações principais preferencialmente ortogonais. Assim sendo, tais fraturas podem ser aproveitadas como planos naturais de separação de porções rochosas, e com auxílio de cortes complementares, obtêm-se volumes liberados e prontos para a realização das operações de recorte e esquadrejamento (ALENCAR *et al.*, 1996).

A diferença fundamental entre o método de lavra seletiva e o método por desmoronamento é que o último condiciona os trabalhos de confecção dos blocos no local em que se posicionam as porções rochosas após o desmonte principal, já o primeiro adota critérios de seleção que permitem a identificação de volumes de rochas suscetíveis a serem deslocados e transportados (Fig.12). No que se refere aos processos de organização dos trabalhos de exploração, o método de lavra seletiva permite a transferência imediata dos blocos primários, caracterizados por suas formas irregulares, até a área de praça destinada aos trabalhos de esquadrejamento, através de potentes pás carregadeiras sobre pneus, as quais são operadas de modo versátil e ágil em espaços operacionais muitas vezes limitados.

Normalmente a produtividade da metodologia da lavra seletiva é muito baixa e, portanto, torna-se necessário adotar velocidades elevadas para o desenvolvimento dos trabalhos mediante a utilização de equipamentos que permitam versatilidade, potência e alta produtividade, bem como também, para as etapas de transporte na pedreira. De modo geral, a configuração da pedreira apresenta-se com seus elementos constituintes bastante definidos (frentes de lavra, praças, rampas de acesso, áreas de manobras, zonas de deposição de rejeitos etc.). A geometria das frentes de lavra fica condicionada ao andamento das fraturas responsáveis pelas delimitações da superfície.



**Figura 12** - Lavra seletiva.  
Foto: CETEM/MCTI, 2013.

### 3.3. Lavra de matacões

A utilização do método de lavra por matacões ainda é utilizada em diversos países, principalmente naqueles em desenvolvimento localizados na faixa tropical, onde existem matacões de grandes dimensões, normalmente, pouco afetados por fenômenos de alteração (Fig. 13).



**Figura 13** - Lavra de matacão de grande porte.  
Foto: Granitos FUJI, 2009.

Os matacões são divididos em duas ou mais partes, que são tombadas para serem esquadrejadas em blocos. Dentre as técnicas utilizadas para o desdobramento dos matacões em fatias, o emprego da pólvora negra se destacava em um passado recente. A técnica consiste na realização de “fogo raiado”, para orientação dos gases oriundos da deflagração da pólvora, através da realização de duas aberturas no interior do(s) furo(s), com o objetivo de se obter o direcionamento do corte. Trata-se de uma técnica simples que pode ser utilizada empregando mão de obra pouco especializada (Fig. 14).



**Figura 14** - Matacão dividido pela técnica do “fogo raiado”. Extraído de Marbrasa, 2011.

Todavia, tem-se observado o emprego de tecnologias inovadoras de corte, para o desdobramento de volumes rochosos de portes variados, apresentando uma satisfatória relação custo x benefício (Fig. 15).



**Figura 15** - Lavra de matacões com fio diamantado. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Na maioria dos casos, grande parte dos matacões não são aflorantes, sendo identificados e expostos somente após grande remoção de solo. Isto dificulta a cubagem de reservas e previsão de produção da lavra, trazendo como consequência o planejamento com horizonte de curto prazo e frequente constrangimento na área comercial para a empresa.

A viabilidade econômica das operações da lavra de matacões depende principalmente da qualidade da rocha. Se por um lado os custos operacionais são relativamente reduzidos, por outro lado corre-se o risco de se obter recuperações insuficientes, quando comparada à extensão das zonas alteradas, dificilmente previstas com antecedência.

Os resultados mais visíveis do problema da lavra de matacões são trazidos pela baixa categorização comercial, fortes restrições quantitativas e qualitativas de suprimento, apresentando dificuldade de abertura de novos mercados para exportações, tanto de materiais em bruto, quanto de produtos acabados e semiacabados. As jazidas formadas por matacões têm vida útil bastante limitada, salvo algumas raras exceções, resultando ainda, em grande impacto paisagístico e danos consideráveis ao meio ambiente.

### 3.4. Lavra por bancadas

No método de lavra por bancadas, a mina é subdividida em níveis sucessivos de lavra, que evoluem lateralmente de forma sequenciada, com altura definida em função da geomorfologia da jazida e das características físico-mecânicas da rocha. O número de níveis em lavra é função das características geomorfológicas do maciço rochoso e das exigências produtivas.

A configuração espacial de uma mina por bancadas é melhor observada na fase de lavra avançada, quando a mina assume geometria regular, com altura das bancadas uniformes, a partir do seu progressivo rebaixamento. Este método é aplicado tanto em minas localizadas em encostas, como naquelas que evoluem em cava, localizadas abaixo do nível do terreno. As minas em encostas possibilitam que toda a movimentação da produção e do rejeito seja realizada de maneira descendente, reduzindo o custo operacional da lavra. A drenagem da mina também é facilitada pelo auxílio da gravidade (Fig. 16).



**Figura 16** - Lavra por bancadas em encosta. Foto: Mineração Pancieri, 2011.

Já nas minas em cava, os níveis de lavra são acessados por meio de rampas previamente construídas, para o escoamento da produção, movimentação de rejeitos e circulação de máquinas e equipamentos. Todo o material desmontado é escoado para fora da mina de maneira ascendente, assim como a drenagem da mina é realizada por meio de bombeamento. Por questões de segurança, o acesso de pessoal se dá por meio de escadas metálicas, protegidas por corrimãos, afixadas nas paredes limitadoras da cava. As minas em cava com presença de rampas de acesso são denominadas de minas em fossa (Fig. 17).



**Figura 17** - Pedreira em cava (fossa). Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Uma particularidade da lavra em cava são as minas delimitadas por paredes verticais, sem a presença de rampas para acesso direto aos níveis de lavra, o que torna indispensável o uso de meios de elevação fixos, para o içamento de blocos, rejeitos e movimentação de máquinas e equipamentos, para dentro e para fora da mina. O acesso de pessoal também é feito por meio de escadas metálicas, protegidas por corrimãos. Minas em cava com essas características recebem a denominação de minas em poço (Fig. 18).



**Figura 18** - Pedreira em poço, lavrada por bancadas, em Portugal. Foto: CETEM/MCTI, 2008.

### **Bancadas altas**

A evolução lateral de cada nível de lavra obedece a uma geometria em “L”, formando “corredores”, que são subdivididos em volumes primários de rocha de formato paralelepípedo, denominados de “quadrotes”, que são lavrados sequencialmente, de maneira que cada “quadrote” avance lateralmente em relação ao outro, caracterizando a geometria em “L” (Fig. 19).



**Figura 19** - Lavra por bancadas altas com geometria em “L”. Foto: CETEM/MCTI, 2010.

Na abertura de novas frentes ou níveis, o desenvolvimento da lavra é facilitado abrindo uma “gaveta” na frente para obter superfícies livres no maciço e espaço para operar o fio diamantado (Fig. 20).

Os “quadrotes” são desdobrados em volumes secundários, denominados de “filões”, que por sua vez, após a sua completa liberação do maciço rochoso, são tombados em um leito constituído por terra e fragmentos de rocha, com o objetivo de amortecer o impacto de queda. Após o seu tombamento, o “filão” passa a ser denominado de “prancha”, devido à posição horizontal que assume, passando a ser esquadrejada em blocos nas dimensões comercializáveis. A sequencia deste método é ilustrada nas figuras 21 a 24.



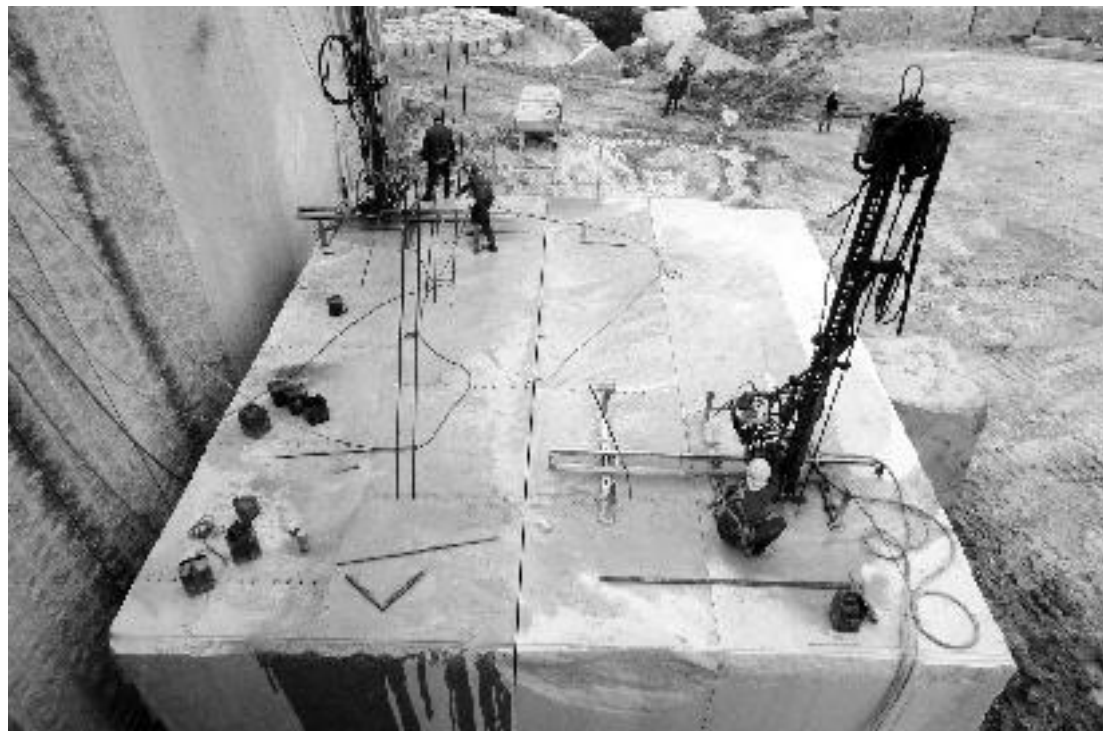
**Figura 20** - Abertura de gaveta para início de exploração do nível. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



**Figura 21** - Quadrote isolado na bancada. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 22** - Tombamento de filão. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



**Figura 23** - Esquadrejamento de blocos da prancha. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 24** - Movimentação dos blocos cortados da prancha. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Este método permite a otimização da produção, devido à possibilidade dos níveis evoluírem lateralmente e simultaneamente, compensando eventuais deficiências qualitativas da rocha, de maneira a corrigir rapidamente as oscilações dos quantitativos demandados.

Por se tratar de um método seletivo, é altamente aplicável na lavra de maciços que apresentam grande heterogeneidade qualitativa, com significativa incidência de defeitos do ponto de vista comercial, permitindo a seleção de blocos com elevado padrão de qualidade.

Outro aspecto que deve ser analisado é a condução de pedreiras de granito com geometria em “U”, com início da frente de lavra geralmente nas cotas mais inferiores do maciço. Essa prática compromete o avanço da frente, que passa a ganhar altura muito rapidamente, dependendo da inclinação do maciço, limitando o progresso da pedreira.

Pratica-se, também, na configuração em “U”, o que se pode denominar de “lavra ambiciosa”, com a extração processando-se somente no material interessante, sem a preocupação de se desenvolver lateralmente a pedreira. Tal prática favorece o estrangulamento da pedreira, comprometendo sua vida útil.

#### ***Bancadas baixas***

Classifica-se como uma particularização do método de lavra por bancadas, aquele cuja altura da bancada corresponde a uma das dimensões do bloco comercializável, geralmente aquela correspondente ao comprimento do bloco. O denominado método de lavra por bancadas baixas consiste na extração de blocos nas dimensões finais, diretamente do maciço rochoso, sem a necessidade de recorrer a processos de subdivisões sucessivas, adotando-se sistemas de trabalho mais simplificados, com redução das etapas do ciclo de produção (Fig. 25).



**Figura 25** - Lavra por bancadas baixas do Mármore Bege Bahia, na Bahia. Foto: CETEM/MCTI, 2006.

Bancadas baixas são aplicáveis em maciços homogêneos com pouca presença de defeitos do ponto de vista comercial, possibilitando uma lavra com elevados níveis produtivos. Em contrapartida, quando aplicado em maciços heterogêneos, que apresentam incidência de defeitos do ponto de vista comercial, esse método se mostra pouco seletivo, aumentando sensivelmente a produção de blocos de qualidade inferior, que são descartados na forma de rejeito.

O método de lavra por bancadas baixas se aplica perfeitamente nos casos onde a jazida possui conformação tabular e possui grande incidência de planos de descontinuidades sub-horizontais, pouco espaçados, caracterizando uma estrutura cebolar, delimitando naturalmente a altura das bancadas, que passa a ser variável em função da esfoliação esferoidal presente, tornando imperativo o seu emprego.

Tais fraturas são aproveitadas como planos naturais de separação de porções rochosas, das quais através de cortes complementares, são liberados volumes prontos para a realização das operações de recorte e esquadreamento (Fig. 26).

De modo geral, a configuração da mina apresenta-se com seus elementos constituintes bastante definidos (frentes de lavra, praça para movimentação e carregamento de blocos, rampas de acesso, pilhas para disposição de rejeitos etc.). A geometria de evolução da mina fica condicionada ao comportamento das fraturas responsáveis pelas delimitações das superfícies lavradas.

O fato de a recuperação da lavra ser normalmente muito baixa, torna-se necessária a adoção de velocidades elevadas de extração, para a obtenção de resultados produtivos satisfatórios, mediante a utilização de equipamentos que permitam versatilidade, potência e alta produtividade, necessários também para a movimentação desses materiais na mina.

Do ponto de vista ambiental, este método oferece menor impacto visual sobre o meio ambiente, devido a uma menor superfície exposta, além de facilitar a recuperação da área minerada. Todavia, a baixa recuperação da lavra sugere a disponibilidade de vastas áreas para disposição do rejeito gerado.

Bancadas baixas apresentam vantagens do ponto de vista de segurança do trabalho, pois reduzem a exposição ao risco de quedas, além de permitir um maior controle da estabilidade das bancadas.



**Figura 26** - Lavra por bancadas baixas cujas alturas são definidas naturalmente pela esfoliação esferoidal presente no maciço rochoso. Foto: José Roberto Pinheiro, 2003.

#### *Painéis verticais*

Trata-se de uma particularidade do método de lavra por bancadas, aplicado em maciços com elevado gradiente topográfico e na fase inicial de abertura da mina. O avanço da lavra ocorre de maneira ascendente, em um único “nível”, através do desmonte individual de painéis verticais com altura variável e cuja espessura corresponde, normalmente, ao comprimento do bloco comercializável. A extensão da área dos painéis é relativamente grande e permite uma boa seletividade. (Fig. 27).

O método consiste, basicamente, no isolamento do painel, seu tombamento e esquadreamento em blocos. A partir da movimentação dos blocos e do rejeito gerado de cada painel esquadreado, é construído um novo aterro com altura igual àquela definida pela diferença de cota topográfica entre as partes anterior e posterior do painel lavrado. Assim, à medida que cada painel vertical é desmontado, um degrau de rocha é formado na base do painel seguinte a ser lavrado, a partir do aterro realizado, que tem a vantagem de utilizar o próprio rejeito da lavra para sua formação (Fig. 28).

O tombamento dos painéis verticais se dá através de uma técnica específica, denominada “boca de lobo”, que consiste na obtenção de uma cunha localizada na base do painel, que é detonada, descalçando e desmontando o painel (Fig. 29).

Com um estágio avançado de evolução da lavra e com a mina localizada em uma cota topográfica superior do maciço rochoso são obtidos vários degraus de rocha, de baixo para cima. Nesse momento, ocorre uma inversão do sentido de lavra, que passa a ser descendente. Assim, com a gradual remoção dos níveis de aterro, para exposição dos vários degraus de rocha obtidos, os novos níveis de lavra passam a ser definidos, obedecendo a uma altura correspondente a um número múltiplo das aturas dos degraus, de maneira que, para o rebaixamento de cada novo nível, basta remover uma camada de aterro correspondente à altura que se deseja para este nível (Fig. 30).





**Figura 27** - Lavra por painéis verticais. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 28** - Método de pranchas verticais. Notar a retroescavadeira preparando o colchão de resíduos para o tombamento. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 29** - Corte inclinado para descalçar o filão (boca de lobo). Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 30** - Pedreira com avanço ascendente pelo método de pranchas verticais (esquerda da imagem) e descendente por bancadas altas (direita da imagem). Foto: CETEM/MCTI, 2013.

Em algumas pedreiras tem sido observada a aplicação de um método misto, adaptado deste de pranchas verticais. Em vez de pranchas (de largura igual a uma das dimensões do bloco a ser produzido), são cortados quadros altos (de até mais de 50 metros de altura) e tombados. A partir daí, do quadrote tombado, inicia-se o ciclo normal de bancadas altas: corte em filões, tombamento dos filões e subdivisão em blocos das pranchas (Fig. 31). É um método de alta produtividade, pois se trabalha com grandes volumes (chegando a superar os 10.000 m<sup>3</sup>) na mesma operação, mas de baixa recuperação, já que devido a seu tamanho, os quadros altos quebram ao serem tombados (Fig. 32).



Figura 31 - Subdivisão em filões de um quadrote alto tombado. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



Figura 32 - Quadros altos tombados para divisão em pranchas. Foto: CETEM/MCTI, 2013.

### 3.5. Lavra subterrânea

O progresso e desenvolvimento tecnológico na mineração procuram aproveitar ao máximo a disponibilidade de reservas de uma boa jazida. Sob este ponto de vista, torna-se interessante a tendência da passagem progressiva das lavras conduzidas a céu aberto, para as subterrâneas, cuja evolução natural é proporcionada por razões econômicas e pelas características geológicas da reserva mineral. Existem alguns casos em que a lavra subterrânea é adotada para alguns tipos de materiais que, mediante a utilização das novas tecnologias, podem sustentar o confronto econômico com os métodos conduzidos a céu aberto; ou aquelas que por motivos de valorização do material, não são lavradas a céu aberto.

A atividade de abertura de lavra em subsolo é realizada mediante a criação de espaços subterrâneos, denominados salões, sustentados por pilares, geralmente constituídos por material de qualidade inferior, uma vez que estes não serão explorados (Fig. 33). A relação entre as áreas dos salões e pilares em alguns casos é elevada, em dependência da resistência geomecânica do maciço e da profundidade da frente de lavra. Com a abertura em cotas cada vez mais profundas, devido à lavra de praças inferiores, incrementam-se os esforços de tensão sobre os pilares além da probabilidade do aparecimento de novas fraturas conseqüentes dos esforços provocados pelo carregamento e da sua interação com a abertura de vazios (CARANASSIOS, 1993).

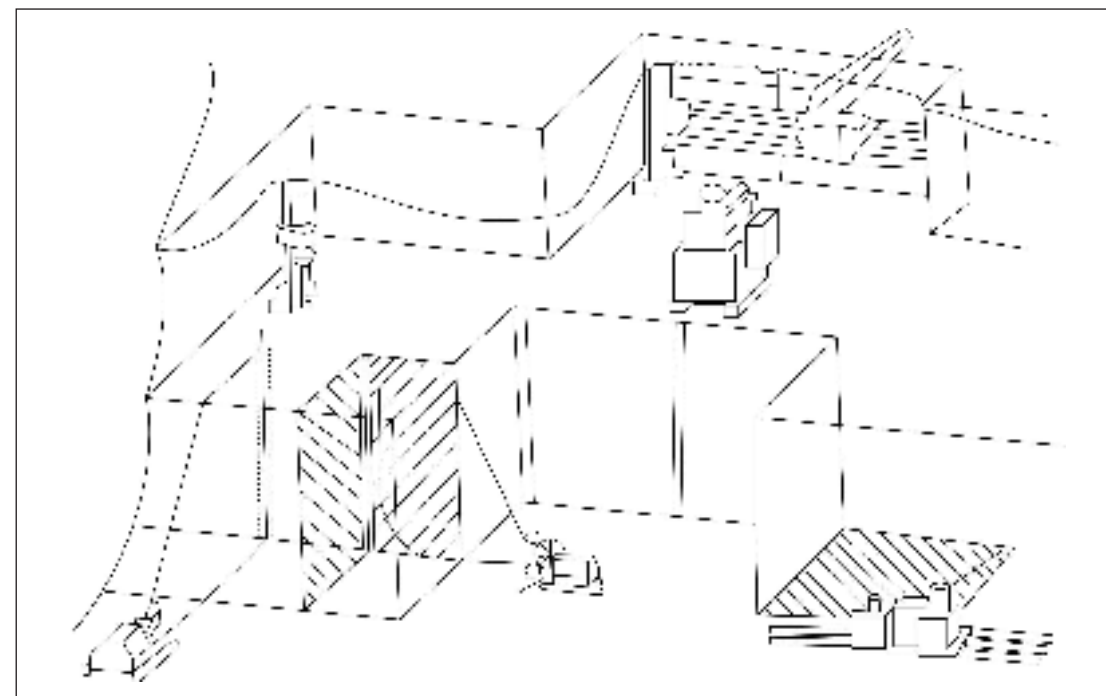


Figura 33 - Ilustração esquemática de uma lavra subterrânea em dois níveis. Extraído de Jimeno, 1996.

Os pioneiros na extração subterrânea de mármore foram os egípcios, os gregos e os romanos. As massas rochosas calcárias do Egito estão dispostas em estratos horizontais dos quais os egípcios selecionavam e extraíam os materiais mais resistentes às intempéries, com boa qualidade, para o qual precisaram escavar poços e galerias.

Na Grécia antiga, o mármore estatuário da ilha de Paros era extraído em subterrâneo e, durante a época romana, outra pedra subterrânea ganhou fama, a Aurisina, pedra de calcário na região do Carso, perto de Trieste, que hoje é extraída a céu aberto (PINZARI, 1989). O mármore Pentelikon que foi empregado para a construção do Partenon e de várias outras obras famosas da Grécia foi o primeiro mármore a ser extraído de uma pedra subterrânea. Hoje, na mesma zona das pedreiras antigas, a uma altitude de 700 metros, há uma pedra em boas condições, explorada pela empresa Dionyssomarble (TOMARAS, 2005). Os gregos levaram seu conhecimento para Nápoles, onde começaram a extrair tufo vulcânico do subsolo, para construir templos, termas e residências. Os romanos aprenderam e aprimoraram as técnicas de extração e utilização das rochas dos gregos e dos egípcios, o que é comprovado pelos muitos trabalhos de arquitetura criados com vários materiais rochosos. Alguns centros produtores de mármore, ainda explorados hoje, têm sido lavrados por mais de 2.000 anos. O mármore Lunese, por exemplo, foi extraído extensivamente durante o Império Romano, sob os imperadores Augustus e Marcus Aurelius, e traços dessa atividade ainda são visíveis em algumas partes da bacia de mármore de Carrara (Colonnata, Miseglia e Torano). A cidade de Luni ganhou riqueza e prestígio com as pedreiras de mármore antes da dominação bárbara; e floresceu através dos tempos medievais, até a Renascença. Na região de Carrara, ao que tudo indica, os romanos lavravam as partes inferiores da formação marmífera, em minas subterrâneas com técnicas de céu aberto (FORNARO; BOSTICCO, 1994).

Os franceses também souberam aproveitar muito bem os tesouros do subterrâneo de algumas partes da França. Na época da construção de Paris, as pedreiras a céu aberto tiveram que ceder espaço para as plantações, necessárias para alimentar a crescente população. Foi então que teve início a extração dos calcários em pedreiras subterrâneas, das quais também era extraída gipsita.

Atualmente a lavra subterrânea de rochas ornamentais vem sendo praticada em vários países como Itália, Espanha, Portugal, Croácia, Grécia, França, Eslovênia, Turquia e os Estados Unidos.

A Itália é o país que tem o maior número de lavras subterrâneas que utilizam vários equipamentos e técnicas para a extração, dependendo da configuração do depósito. São cerca de 45 pedreiras subterrâneas na região de Carrara de mármore cristalino, como as das figuras 34 e 35 e, em outras regiões da Itália nos seguintes materiais, de acordo com as informações do Dr. Piero Primavori: Mármore “Condoglia” (rocha metamórfica – mármore cristalino); “Ceppo di Gre” (rocha sedimentar – conglomerado quaternário); Mármore “Lasa” (rocha metamórfica – mármore cristalino); “Pietra di Finalle” (rocha sedimentar – calcário bioruditico); “Pietra di Vicenza” (rocha sedimentar – calcário bioclástico); Mármore “Nero Portoro” (duas pedreiras, rocha sedimentar – calcário euxinico); “Pietra di Comiso” (rocha sedimentar – calcário biomicrítico); ardósias (duas pedreiras, rocha metamórfica); “Verde Patrizia” e “Verde San Nicolaus” (rochas metamórficas – complexo ofiolítico e serpentinitos relacionados).

Ainda de acordo às informações do Dr. Primavori, na Espanha há algumas pedreiras subterrâneas de ardósia na área de Odollo-Llamas, na região do Bierzo, Província de León (Fig. 36), de mármore “Beig Serpiente”, na província de Murcia (Fig. 37), do calcário “Rojo Ereño” do País Basco, semelhante ao Lioz português e o calcário arrecifal “Gris Deva” (País Basco).

Na França são cerca de 10 pedreiras subterrâneas, todas em rocha sedimentar (calcários e arenitos macios) e na Croácia há uma pedra subterrânea (Fig. 38), na região de Kanfanar. Trata-se de uma rocha sedimentar, um calcário fossilífero conhecido como Amarelo Istria.



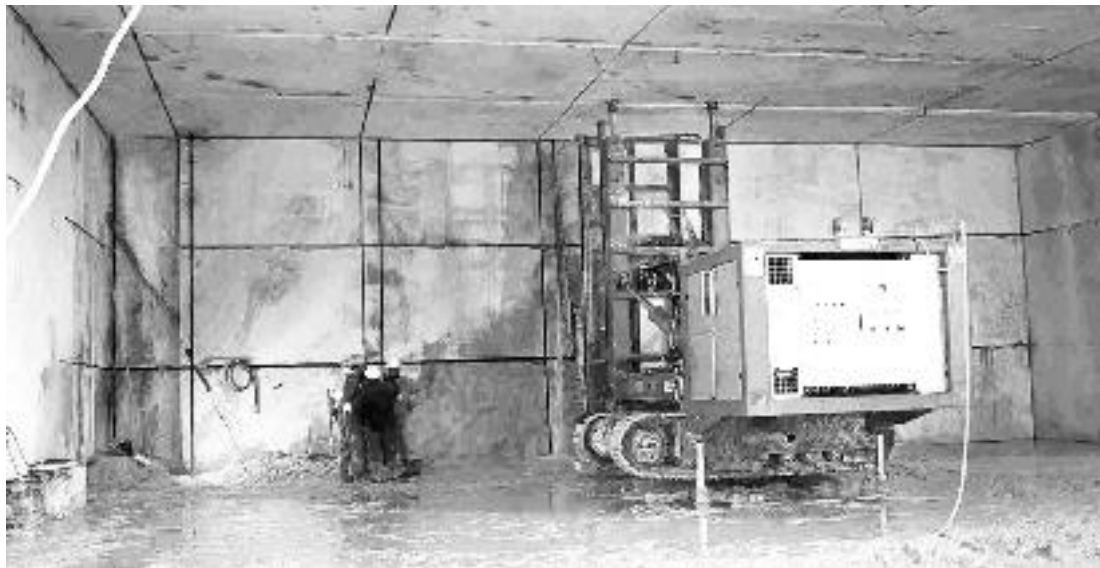
**Figura 34** - Pedreira Bettogli, localizada na região dos Alpes Apuanos (Itália), da qual são extraídos os mármore cristalino Estatuário e Calacatta. Foto: Piero Primavori.



**Figura 35** - Pedreira subterrânea do Monte Corchia (Alpes Apuanos, Itália) da qual se extrai o mármore cristalino Arabescato. Foto: Piero Primavori.



**Figura 36** - Lavra subterrânea de ardósia no Bierzo (León, Espanha). Foto: Daniel P. Tavares, 2013.



**Figura 37** - Pedreira subterrânea do mármore Beig Serpiente, na Espanha. Foto: Piero Primavori.



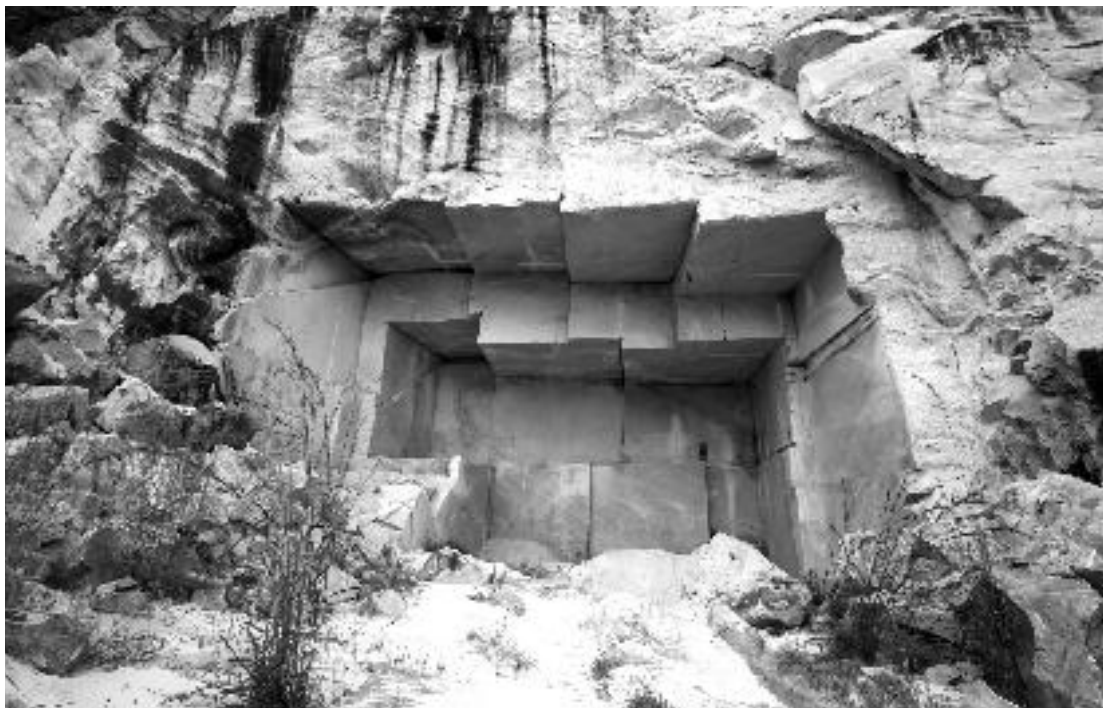
**Figura 38** - Pedreira do calcário Amarelo Istria, Kanfanar, Croácia. Foto: Piero Primavori.



**Figura 39** - A maior pedreira subterrânea do mundo, do mármore de Danby, USA. Extraída de UCLI, 2013.

Nos Estados Unidos também há duas extrações de mármore, uma localizada na cidade de Barbeton (Ohio), atualmente paralisada, e uma localizada em Vermont, onde se produz o mármore Danby. A pedreira de Vermont existe há mais de 200 anos e é a maior pedreira subterrânea de mármore do mundo (Fig. 39). Possui seis níveis de extração e a planta de beneficiamento foi instalada dentro da mina. São cinco tipos comerciais de mármore que revestem fachadas famosas nos Estados Unidos e ao redor do mundo.

No Brasil, atualmente, não há nenhuma pedreira subterrânea em operação. Alguns anos atrás, chegou a ser iniciada a abertura de uma galeria do material conhecido comercialmente como mármore Azul Imperial (Fig. 40), da empresa Rossittis na Serra da Vereda, município de Oliveira dos Brejinhos, Bahia. Geologicamente, trata-se de um dumortierita quartzito, de coloração azul, muito valorizada no mercado.



**Figura 40** - Vista geral da pedreira subterrânea na Bahia. Foto: CETEM/MCTI, 2009.

De acordo com a Rossittis, empresa que detém o direito mineral para a exploração desse material, a lavra subterrânea, que iniciou em 1999, está paralisada há dois anos por ter apresentado problemas de estabilidade do maciço. A extração era feita através de perfuração e corte com fio diamantado. Segundo dados da empresa, na época, com a exploração subterrânea a taxa de recuperação que era de 8-10% subiu para 36%, justificando os custos maiores da tecnologia. Por outro lado, no caso dessa área, a lavra subterrânea se justificava também pelo alto valor agregado do material, incluindo o aumento da recuperação. O material já chegou a ser comercializado a US\$ 5.500,00/m<sup>3</sup>, mas posteriormente à crise de 2008 o preço diminuiu para US\$ 3.500,00/m<sup>3</sup>. Na mesma região há produção de um material semelhante a este, conhecido como Azul Macaúbas, mas não em lavra subterrânea (Fig. 41).



**Figura 41** - Lavra de Azul Macaúbas, na Bahia. Foto: CETEM/MCTI, 2011.

O método de lavra subterrânea vem sendo utilizado predominantemente nas rochas carbonáticas, particularmente nos mármore, que são rochas mais tenras, e conseqüentemente apresentam uma maior facilidade de corte com as novas tecnologias. Torna-se de extrema importância a realização de um cuidadoso projeto de lavra associado a um vigilante e rigoroso controle dos vazios criados pela atividade de extração. De modo particular, salienta-se a necessidade da equação de controles sistemáticos da temperatura e das instalações, além de instrumentos capazes de realizar medições de deslocamentos diferenciais, mediante o uso de sinais luminosos ou acústicos, instrumentos adotados e consagrados em outros campos, que envolve o estudo da mecânica das rochas. Não se deve esquecer de realizar controles sobre o estado dos pilares de sustentação, por meio de medições extensiométricas ou geofísicas.

Do ponto de vista ambiental, o impacto sobre a paisagem é mínimo, em contrapartida cresce exponencialmente a importância dos problemas de controle de estabilidade a curto e longo prazo, principalmente nos vazios de grande volume (da ordem de milhares de metros cúbicos). Estes ficam sobrecarregados de pacotes rochosos com distribuição heterogênea que com o passar do tempo, devido ao desenvolvimento dos trabalhos de abertura dos salões, determinarão deslocamentos solicitados pelo maciço, sendo muito difícil de prever mesmo adotando-se medidas de controle instrumental.

Os principais fatores que podem estar na decisão de avanço para uma exploração em subterrâneo são:

- Existência de material excelente qualidade sob elevadas coberturas de solos e de material de fraca aptidão ornamental.
- Áreas licenciadas de reduzidas dimensões que inviabilizam o alargamento da pedreira e a remoção das camadas superficiais estéreis.
- Forte pressão ambiental.

Para a abertura de uma exploração subterrânea devem ser realizados estudos preliminares aprofundados que permitam caracterizar o maciço rochoso em questão e definir o “modelo geomecânico” do mesmo, no sentido de poderem ser realizados, com êxito, os trabalhos de desmonte e estabilização. Os estudos a serem executados são:

- Estudo geológico;
- características estruturais da jazida;
- características geomecânicas do maciço;
- estado de tensão *in situ*;
- dimensões possíveis para as cavidades;
- recuperação da jazida; e
- rendimento.

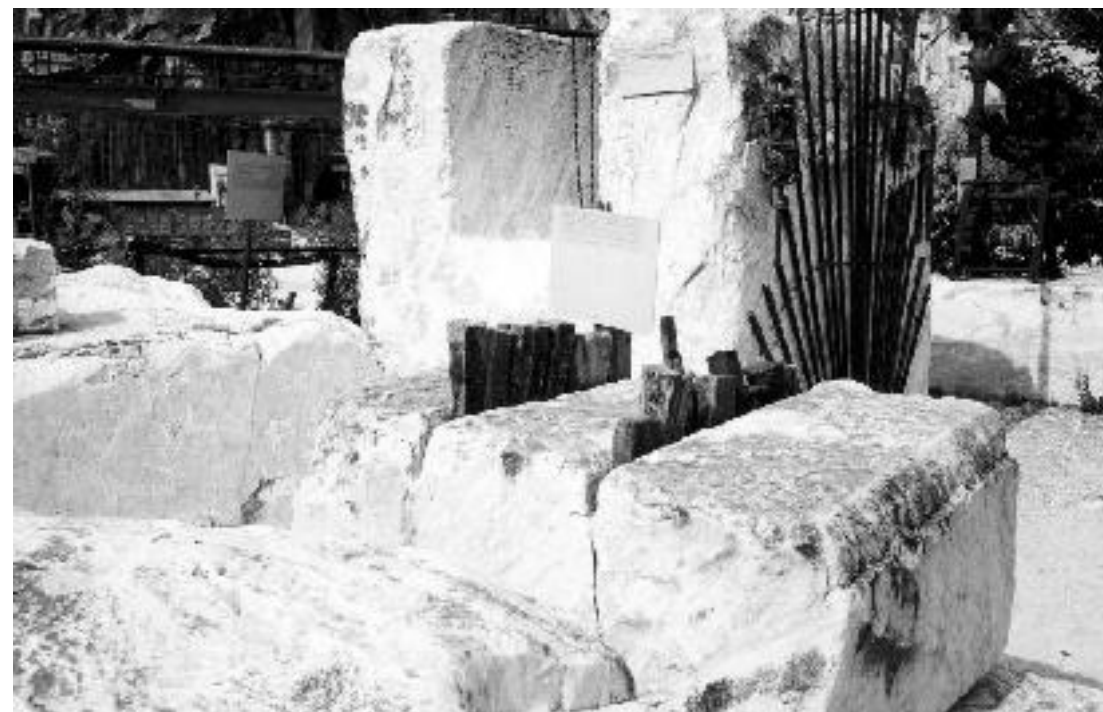
Posteriormente a esses estudos, é selecionado o método de desmonte. Na seleção do método de desmonte, devem ser levados em consideração os seguintes fatores:

- Características geológicas do local;
- morfologia;
- espessura e inclinação das camadas;
- continuidade da jazida;
- profundidade da jazida; e
- fatores econômicos.

O sistema de lavra mais utilizado em pedreiras subterrâneas é o método de câmaras e pilares. Neste método de desmonte, a massa útil é retirada das câmaras, deixando-se um conjunto de pilares para suporte do teto de escavação. Este método caracteriza-se pela existência de galerias retas e paralelas; no entanto, podem existir variantes do método, como é o caso de muitas explorações subterrâneas italianas. Outros métodos comuns de exploração subterrânea são o Método de Frentes Corridas e o Método de Corte Enchimento.

#### 4. Tecnologias de lavra

Nos primórdios, os blocos de mármore eram extraídos mediante a introdução de cunhas de madeiras nas fissuras naturais do corpo rochoso (Fig. 42). Essas cunhas eram umedecidas com água que, dilatando-se, dividiam a pedra. A antiga técnica usada pelos romanos, conhecida como “corte romano”, era utilizada tanto a céu aberto quanto em subterrâneo e continuou praticamente imutável através dos séculos, até que os explosivos foram introduzidos. De fato, uma reconstrução dos métodos de extração usados (CAPUZZI, 1984) mostra que até os tempos modernos, antes que qualquer atividade extrativa começasse, os trabalhadores da pedreira tinham que estudar cuidadosamente como as fraturas (“linhas capilares”) corriam na massa rochosa, de modo que a exploração da divisibilidade natural da rocha pudesse ser feita.



**Figura 42** - Método de corte romano, com cunhas de madeira. Foto: Cid Chiodi, 2003.

Para os Romanos, de acordo com Fornaro e Bosticco (1994), o corte do canal era chamado “*cesurae*” e era feito com martelos e cinzéis metálicos ao longo das falhas das rochas até que blocos fossem criados através de cortes profundos em forma de “V”. Os blocos eram então removidos com a ajuda de vigas de madeira ou alavancas de ferro, e eventualmente com cunhas de madeira. Todo o trabalho era manual e provavelmente envolvia uma grande equipe de operários: cinzeiros, esquadrejadores, ferreiros, carregadores, madeireiros. As ferramentas usadas eram cunhas, cinzéis, martelos, marretas, pás, enxadas. As marretas (pesando de 5 a 6 kg) e as cunhas eram usadas para abrir fraturas naturais ou quebras feitas deliberadamente na rocha; os martelos (2,5 a 3,5 kg) e os cinzéis eram usados para fazer cortes ou entalhes isolando os blocos a serem extraídos em tamanhos predeterminados. Outras técnicas usadas no passado incluíam a colocação de pedaços de madeira, posteriormente encharcados de água nas fendas, que aumentava a abertura graças à expansão causada pelo congelamento da madeira molhada.

Certas pedreiras subterrâneas desenvolveram técnicas especiais, assim como aquelas usadas para ardósia onde túneis estavam ativos desde o Século XIII (DEL SOLDATO, 1985). Os métodos de mineração foram baseados na abertura das galerias, por causa da natureza geológica dos depósitos, e porque a terra disponível para pedreiras a céu aberto já havia sido explorada. O acesso à pedreira era através de passagens subterrâneas rasas, levando a um leito de ardósia; a pedra era então extraída pelo método “*skyward*” (de baixo para cima), isto é, em fatias horizontais ascendentes (FORNARO; BOSTICCO, *op. cit.*).

O corte era feito com a ajuda de um triângulo de madeira, usado para traçar o sulco perimetral do bloco com precisão; o bloco era, então, delimitado com uma picareta apontada e um martelo usados repetidamente até que a espessura de chapa desejada fosse alcançada (Fig. 43). O bloco

em formato de chapa era, então, removido golpeando-se o lado inferior livre, que correspondia à superfície de fissura, e deixando-o descer em uma cama de detritos. As chapas grandes eram então terminadas e acertadas para o tamanho requerido dentro da galeria, e carregadas para fora à mão.



**Figura 43** - Extração de blocos em pedra subterrânea romana. Modificado de Adam, 2012.

Na metade do Século XIX, o método “*earthward*” (de cima para baixo) foi introduzido, com a extração feita em fatias horizontais descendentes, eventualmente envolvido no que hoje é definido como “extração em mina” (FORNARO; BOSTICCO, 1994). A ardósia era removida por inserção de cunhas e alavancas, um método mais seguro para aqueles trabalhos, mas arriscado em termos da inundação da pedra que poderia ser causada por infiltração de água; a inundação levava ao abandono de muitas pedreiras, até que bombas elétricas tornaram-se disponíveis (BARZAN, 1993).

Na região de Portoro, as pedreiras eram anteriormente escavadas à mão (DEL SOLDATO, 1985). Inicialmente, um túnel baixo era cavado para descobrir o depósito, usando uma picareta e martelo; mais tarde duas covas laterais eram cavadas, tão longe quanto a largura do bloco a ser retirado. Deste modo, uma vez que os espaços laterais foram criados, dois homens executavam os cortes ao lado, fazendo os cortes posterior e inferior com uma serra de ferro temperado grande e sem dentes, cuja ação de corte era ajudada pela água e areia silicosa. Os cortes eram aprofundados usando uma serra helicoidal (anteriormente trabalhados à mão). O bloco era removido pela inserção de cunhas de madeira, que eram então encharcadas, ou as de ferro que eram então golpeadas (FORNARO; BOSTICCO, *op.cit.*).

No passado, a “*Pietra de Finalle*” (ZUCCHETTI *et al.*, 1974) era extraída com o método então chamado “*vara*”, que gastava grandes quantidades de mão de obra na utilização manual dos martelos e cinzéis de aço (com mais de 120 cm de comprimento) usados para fazer cortes nos quatro lados do bloco. Os cortes eram então limpos dos detritos com pequenos machadinhos em forma de colher, e o bloco era finalmente liberado golpeando-o com martelos e dirigindo com cunhas de aço que quebravam ao longo de linhas guias.

A *Pietra de Vincenza*, material macio, sempre foi extraído manualmente e somente nas décadas recentes recebeu um empurrão tecnológico. Na década de 1930 (FILIPPI, 1980), era extraída à mão em túneis usando um martelo de dois dentes, pesando cerca de 1 quilo e tendo 20 cm de comprimento. O trabalho era pesado e feito sobre uma frente de aproximadamente 6 metros; os blocos eram retirados do teto do túnel por escavação de dois sulcos, de 12 a 14 cm de largura, e

isolando o bloco, da massa delineada, com cunhas batidas com um martelo. Os túneis às vezes se estendiam por dezenas de metros montanha adentro e eram iluminados por lâmpadas a óleo. Os blocos eram extraídos medindo aproximadamente 300 x 120 x 100 cm, e eram esquadrejados com maestria fora do túnel, usando o martelo de dois dentes; trabalhando aos pares, os trabalhadores estavam aptos a transformar dois blocos por mês.

Nas pedreiras de Carrara, as primeiras aberturas de galerias começaram como uma progressão natural de estágios de extração, iniciando de um “sótão”. Um sótão é uma cavidade aberta próxima ao topo da montanha, delimitando assim seu topo por um corte horizontal e lateralmente por dois cortes verticais. Este tipo de extração de rocha é o primeiro degrau em direção à pedra subterrânea. Até não muito tempo atrás, a extração de pedra do sótão era baseada na técnica usando andaime e cortadeiras com fios helicoidais (CAPUZZI *et al.*, 1975).

Com a tecnologia da serra helicoidal, extrair mármore em galerias levava a diferentes direções, dependendo das condições particulares de cada pedra. No caso citado, a retirada do material criava uma cavidade suficientemente alta para dar a um trabalhador um acesso fácil e uma sala para trabalhar. O banco circundante era trabalhado fazendo-se cortes verticais com o fio helicoidal.

Do final dos anos 20 até o começo dos anos 30, do século XX, a serra helicoidal era usada em Lasa (Val Venosta), e a extração de mármore nas galerias era feita exclusivamente com o método do ar comprimido (CONSIGLIO, 1964).

Os blocos eram extraídos na direção do canal em tamanhos comerciais, e então enviados para a praça para ser esquadrejados. Os cortes verticais eram feitos com um martelo de perfuração montado sobre dois trilhos dirigidos verticalmente ao longo da pedra, e equipados com cremalheiras, para assim fazer uma série de furos paralelos. O restante entre os furos era depois eliminado por martelos pneumáticos. O bloco era isolado trabalhando sobre os quatro lados com cortes verticais e com um corte horizontal que era feito por cunhas inseridas nas embocaduras de um grupo de furos previamente cortados para a quebra em profundidade. Entretanto, este método provou ser rígido na prática, em termos da direção de avanço e profundidade do corte; ele se adaptava mal às características do depósito o que levava a produção de baixa qualidade com custos maiores. Mais tarde, a técnica da mistura “ar comprimido-fio diamantado” veio a ser usada, promovendo maior flexibilidade nas operações das pedreiras (FORNARO; BOSTICCO, 1994).

Na evolução das tecnologias através dos tempos, destacam-se as técnicas de extração de blocos iniciadas com a trincheira romana, que consistia em cunhas de madeira umedecidas e dispostas nos planos de fratura do maciço rochoso, e que seguiu para o uso de explosivos no século XVI. Ao final do século XIX e início do século XX, a Itália passou a usar o fio helicoidal como tecnologia de lavra, para o corte dos blocos de mármore e travertinos. A partir da década de 1970 foi introduzida nas minas de mármore da região de Carrara a tecnologia do cortador a corrente e subsequentemente a do fio diamantado. No espaço de dez anos registrou-se uma rápida evolução do fio diamantado, sendo introduzido nas minas de granito da Sardenha (Itália) no final da década de 1980. No Brasil, em 1984, teve início o emprego das ferramentas diamantadas para o corte de mármore, passando também a ser utilizadas para o corte de granito no início dos anos 1990.

Atualmente, o desenvolvimento e a inovação tecnológica oferecem diversas opções para as operações que integram o ciclo de produção de uma mina, permitindo, desta maneira, definir no planejamento de exploração a melhor escolha das tecnologias mais adequadas do ponto de vista técnico e econômico.

A escolha das tecnologias de corte é função das características da jazida, no que se refere a suas reservas, parâmetros geoestruturais, características minero-petrográficas e estruturais da rocha,

da infraestrutura local existente e das disponibilidades financeiras do empregador. Alguns desses fatores representam a evolução e o aperfeiçoamento das tecnologias tradicionais (exemplo: tecnologia de perfuração) e avançadas (exemplo: tecnologia do fio diamantado), consagradas e de largo emprego. Outras são de caráter inovador e merecem considerações particulares, principalmente o corte com jato d'água (*water-jet*).

As tecnologias de corte denominadas como tradicionais e avançadas podem ser divididas em dois grupos principais: tecnologias cíclicas e tecnologias de corte contínuo.

As tecnologias cíclicas são aquelas em que os cortes necessários para o isolamento de volumes de rocha são realizados mediante a sucessão de diversas operações, que vão constituir as fases do ciclo de produção. Em função das características de cada método de lavra, esses cortes são realizados para liberação de volumes primários, secundários e para o esquadreamento de blocos.

As tecnologias cíclicas se baseiam, preponderantemente, na perfuração e são caracterizadas por apresentar grande versatilidade e poder de adaptação para situações adversas da atividade extrativa. De modo prático, existe uma compatibilidade dessas tecnologias para os diferentes métodos de lavra, podendo, em determinados casos, se consorciar mais de uma tecnologia.

As tecnologias cíclicas são:

- Divisão mecânica com cunhas;
- corte com perfuração e explosivo;
- corte com perfuração contínua; e
- divisão mediante argamassa expansiva.

As tecnologias de corte contínuo constituem-se basicamente naquelas cujas operações são efetuadas sem o uso predominante de perfuração. Este tipo de tecnologia encontrou sua consolidação nas operações em rochas de origem carbonática (mármore), destacando-se o fio helicoidal e os cortadores à corrente. Outro tipo de tecnologia de corte contínuo é o *flame-jet*, desenvolvido para ser empregado nas minas de granito, tanto para abertura de canais, nos quais a falta de superfícies livres inviabilizava o uso de explosivos, como para o isolamento de volumes primários de rocha.

Com o advento do fio diamantado, para o corte de rochas ornamentais, as tecnologias do *flame-jet* (granitos) e do fio helicoidal (mármore) foram quase que integralmente substituídas por esta nova tecnologia. O ruído excessivo do *flame-jet*, a geração de poeira tóxica, a baixa velocidade de corte e a presença de fissuras nas laterais dos cortes motivaram a abolição desta tecnologia nas minas de granito. Já a baixa produtividade do fio helicoidal, aliada aos riscos de acidentes do trabalho, tornou esta ferramenta de corte obsoleta.

As tecnologias de corte contínuo são:

- Fio helicoidal;
- maçarico (*flame-jet*);
- cortador à corrente;
- cortador à corrente diamantada;
- fio diamantado; e
- corte com água (*water-jet*).

#### 4.1. Critérios de escolha das tecnologias

As jazidas de rochas ornamentais possuem características geológicas peculiares relacionadas aos tipos petrográficos e fatores estruturais presentes, que acarretam no emprego diferenciado de metodologia e técnica de lavra, associadas às escolhas mais adequadas das tecnologias de corte para a abertura da mina.

Em virtude de um considerável desenvolvimento tecnológico, atribuído à expansão mundial da atividade do setor nos últimos anos, estão disponíveis algumas soluções, para a escolha das tecnologias capazes de satisfazer as exigências técnicas, para a produção de blocos.

Na literatura dos países produtores tradicionais (Itália, Portugal e Espanha) são encontradas vastas referências bibliográficas, com exemplos de estudos de casos, focalizando os aspectos mais importantes para o correto emprego das tecnologias de corte, com atenção à importância do conhecimento geológico das jazidas, do planejamento de exploração e do acompanhamento e controle das operações unitárias de lavra.

As minas de rochas carbonáticas geralmente empregam tecnologias de cortes avançadas com ferramentas diamantadas, utilizando o cortador à corrente diamantada e o fio diamantado, com os quais se obtém ótimo desempenho e produção de melhor qualidade, com custos inferiores aos alcançados com as tecnologias tradicionais de corte contínuo, tais como: fio helicoidal e cortador à corrente de metal duro (não diamantado).

Nas minas constituídas de rochas silicáticas, em especial as de granito, a extração é efetuada com técnicas tradicionais e avançadas, como perfuração descontínua com o uso de explosivo (cordel detonante imerso em água) ou argamassa expansiva, empregados para cortes primários e secundários, e cunhas manuais ou hidráulicas para as operações de recorte e esquadreamento de blocos.

Todavia, a partir de 2005, a tecnologia de corte com fio diamantado teve um salto de desempenho jamais imaginado no Brasil, aumentando extraordinariamente a velocidade de corte e a vida útil das pérolas diamantadas, com redução expressiva do custo por metro quadrado de rocha cortada. Esses resultados estimularam o uso intensivo do fio diamantado nas minas de rochas silicáticas, passando a ser empregado não somente para o isolamento de volumes primários de rocha, mas também no desdobramento destes em volumes secundários, independentemente do preço comercial da rocha extraída, não sendo raro, nos dias de hoje, o seu emprego também para o esquadreamento de blocos de rochas exóticas. Esta revolução é resultado do aprendizado conjunto e contínuo, através do compartilhamento de informações e experiências entre colaboradores e gestores das empresas de mineração e de seus fornecedores de fio diamantado.

#### 4.2. Parâmetros operacionais das tecnologias

Para a escolha de uma tecnologia de corte adequada é necessário que se confronte os parâmetros técnicos, econômicos, de segurança e de saúde ocupacional dentre as tecnologias existentes.

A tabela 1 apresenta análise comparativa de parâmetros técnicos entre as tecnologias: fio diamantado e fio helicoidal, em mármore. A mesma análise comparativa é apresentada na tabela 2 entre as tecnologias: fio diamantado e *flame-jet*, em granitos.

**Tabela 1** - Parâmetros técnicos das tecnologias de fio diamantado e fio helicoidal, em mármore.

Modalidade Operacional	Parâmetros	
	Fio Diamantado	Fio Helicoidal
Velocidade do fio (m/s)	25 - 45	6 - 18
Potência instalada (kW)	15 - 50	10 - 40
Comprimento do fio (m)	20 - 100	1000 - 4000
Diâmetro do fio (mm)	10	4 - 6
Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)	15 - 50	1 - 3

Elaboração dos autores



**Tabela 2** - Parâmetros técnicos das tecnologias de fio diamantado e *flame-jet*, em granitos.

Modalidade Operacional	Parâmetros	
	Fio Diamantado	Flame - Jet
Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)	10 – 30	1 – 2
Largura do corte (mm)	8,0 – 11,5	100
Desvio superficial (cm)	1 – 5	10 – 30
Consumo de água (m <sup>3</sup> /h)	1,0	1,0
Nível de ruído (dba)	70	130

Elaboração dos autores.

A evolução da tecnologia e o desenvolvimento de metodologias específicas para os materiais brasileiros nas empresas, resultaram em que a tecnologia de corte com fio diamantado é mais barata do que as outras, como mostra a tabela 3 na qual se comparam, em termos de custo, as três tecnologias mais usadas hoje para o corte de granitos e rochas duras, e, que serão detalhadas neste capítulo: fio diamantado, argamassa expansiva e explosivo.

**Tabela 3** - Comparativo econômico e de produção entre tecnologias de corte para um granito duro.

	Fio Diamantado	Argamassa	Explosivo
Custo (R\$/m <sup>2</sup> )	18,99	25,31	22,88
Prod. Corte (m <sup>2</sup> /h)	7,50	1,33	1,33
Produção (m <sup>3</sup> /h)	2,8	0,67	0,67

Elaboração dos autores.

No que se refere à utilização das diferentes tecnologias e combinações delas habitualmente utilizadas, para cada tipo de corte ou lavra, o quadro 1 permite visualizar a frequência de utilização de cada tecnologia ou combinação de tecnologias e seu potencial de aplicação.

Método	Tecnologia							
	PD+E	PD+ME	PC	DMC	FH	FD	FJ	WJ
Lavra por bancada								
- cortes primários	XXXO	XOO	XXO	-	XO	XXX	XXO	O
- cortes secundários	XXXO	XOO	XO	XO	-	XXOO	-	O
- esquadrejamento	XO	XO	-	XXOO	-	XOO	-	OO
Painéis verticais								
- cortes primários	XXOO	-	-	-	-	XX	-	O
- esquadrejamento	X	XO	-	XXOO	-	OO	-	OO
Lavra por desmoroamento								
- desmonte	XX	-	-	-	-	X	-	-
- esquadrejamento	XO	XO	-	XXOO	-	OO	-	O
Lavra seletiva								
- desmonte	XXO	-	-	-	-	X	-	-
- esquadrejamento	X	XO	-	XXOO	-	OO	-	OO
Lavra por matacões								
- divisões	XXO	-	-	XO	-	-	-	O
- esquadrejamento	X	XO	-	XXO	-	XX	-	-
Lavra subterrânea								

**Quadro 1** - Comparação de tecnologias de acordo com os métodos de extração. Elaboração dos autores.**Legenda:**

PD+E = Perfuração descontínua + explosivos

PD+ME = Perfuração descontínua + massa expansiva

PC = Perfuração contínua

DMC = Perfuração descontínua + cunhas

FH = Corte com fio helicoidal

FD = Corte com fio diamantado

FJ = Corte com *flame-jet*

WJ = Corte com *water-jet*

**Frequência de Aplicação:**

XXX Elevada

XX Média

X Baixa

**Potencial de Aplicação:**

OOO Muito bom

OO Bom

O Baixo

O quadro 2 mostra a comparação das tecnologias em relação ao tipo de material: mármore ou granito.

Material	Tecnologia								
	PD+E	PD+ME	PC	CMD	CCD	FH	FJ	FD	WJ
Mármore	XO	XXO	XO	XXX	XXOO	XO	-	XXX	-
Granito	XXOO	XXOO	XXO	-	-	-	XO	XXX	XXO

**Quadro 2** - Análise comparativa das tecnologias utilizadas na extração de mármore e de granito. Elaboração dos autores.**Legenda:**

PD+E = Perfuração descontínua + explosivos

PD+ME = Perfuração descontínua + massa expansiva

PC = Perfuração contínua

CMD = Cortador à corrente metal duro

CCD = Cortador à corrente diamantada

FH = Corte com fio helicoidal

FJ = Corte com *Flame-jet*

FD = Corte com fio diamantado

WJ = Corte com *Water-jet*

**Frequência de Aplicação:**

XXX Elevada

XX Média

X Baixa

**Potencial de Aplicação:**

OOO Muito bom

OO Bom

O Baixo

Por último, em termos de análise comparativa segue o quadro 3, no qual se analisam outras características das tecnologias de corte existentes (embora algumas pouco usadas) como fatores de escolha.

Tecnologia	Custo de operação	Taxa de produção	Flexibilidade de operação	Rendimento	Facilidade de Operação	Nível de ruído	Fator de segurança
<i>Flame-jet</i>	C	C	D	B	A	D	C
Perfuração + explosivo	A	A	A	D	A	D	C
Perfuração + massa expansiva	D	C	D	A	D	C	C
Perfuração contínua	C	C	C	A	C	C	A
Fio helicoidal	C	C	D	C	D	A	C
Cortadora à corrente diamantada	C	A	C	B	B	B	A
Fio diamantado	C	A	A	A	B	A	B
<i>Water-jet</i>	C	C	A	A	B	A	A

**Quadro 3** - Comparação das tecnologias de corte de rochas ornamentais. Elaboração dos autores.

**Legenda:** A-fator positivo; B-fator insignificante; C-fator negativo; D-fator limitante.

### 4.3. Inovação tecnológica no Brasil

As principais vantagens competitivas do Brasil no setor de rochas ornamentais, frente aos seus mais diretos concorrentes no mercado mundial, referem-se ao enorme potencial geológico para mármore e, sobretudo, granitos, de variados padrões estéticos, homogêneos e movimentados. Essa vantagem competitiva só poderá ser materializada mediante aprimoramento das bases de trabalho e profissionalização em toda a cadeia produtiva dos seguimentos da atividade afetos ao setor, destacando-se, em particular, o conhecimento adequado para a etapa de operação da lavra.

Na literatura brasileira são encontrados vários trabalhos que descrevem o setor de rochas ornamentais no Brasil, abordando as atividades extrativas nos estados produtores, em destaque: Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Bahia e Ceará, especificamente, relacionados aos métodos de lavra e tecnologias utilizadas, condicionando as operações de extração ao custo e escala de produção na mina. Embora seja recente, o setor de rochas ornamentais no Brasil precisa superar ainda alguns erros iniciais cometidos pelos empresários que, na sua maioria, não possuíam a cultura minerária e deixavam de cumprir o processo desenvolvimentista necessário para produção de materiais de excelente qualidade, utilizando tecnologias de lavras adequadas ao tipo de jazida, para ser competitivo no mercado mundial.

Em alguns casos, o amadorismo dos empresários impediu que fossem tomadas medidas necessárias, para conduzir a lavra para um aproveitamento mais racional da matéria prima, apresentando ao mercado um produto em conformidade com as normas internacionais, para seu uso e aplicação, na quantidade e prazo esperados. A falta desse conhecimento acarretou problemas de caráter técnico e econômico, tornando-se imperiosa a necessidade de se investir em pesquisa geológica e planejamento de lavra.

Pode ser observado que no decorrer dos últimos vinte anos, existem ainda empreendimentos mineiros, talvez em virtude da grande disponibilidade das reservas de rochas ornamentais no Brasil, com tendências ao uso de metodologias e técnicas rudimentares na extração de blocos, tanto

para a lavra de maciços rochosos, quanto para a lavra de matacões. Esse último tipo de lavra, que envolve técnicas de grande simplicidade operacional, apresentou muitos problemas para várias empresas de mineração, no que se refere à manutenção da produção e qualidade desejadas.

Dessa forma, se verifica que o entusiasmo inicial impediu que fossem tomadas as precauções importantes para reduzir o risco típico da atividade de mineração, através da realização de pesquisas geológica, tecnológica e de mercado, imprescindíveis para a pré-viabilidade econômica do empreendimento na elaboração dos projetos de lavra e beneficiamento. Consequentemente, algumas empresas fecharam e outras ainda estão passando por dificuldades. Algumas trabalham com as consequências da organização precária, sob pressão da procura comercial, que não permite a reorganização e a reestruturação em curto e médio prazo de suas atividades, visando à adequação em toda cadeia produtiva.

Para que haja desenvolvimento e competitividade da indústria brasileira de rochas ornamentais não basta somente dispor de equipamentos de alta tecnologia, mas é de fundamental importância a transferência e a aplicação dos conhecimentos técnicos e científicos alcançados ao longo dos anos no que se refere aos problemas de identificação das reservas, introdução de metodologias que racionalizem a atividade produtiva, escolha de tecnologias adequadas, formação de recursos humanos nos diferentes níveis, valorização e agregação dos materiais, além da garantia de qualidade unidas a uma política comercial eficaz e abrangente.

Sem dúvida, em termos de inovações tecnológicas que mudaram o setor foram: os explosivos, diminuindo o trabalho manual e acelerando o processo; o fio helicoidal, que reinou absoluto como melhor tecnologia durante quase um século, até a aparição do fio diamantado; e, especialmente, a aplicação deste na produção de granitos.

Algumas inovações tecnológicas que podem contribuir muito ainda com o melhor aproveitamento das jazidas de rochas ornamentais são equipamentos para análise do estado tensional dos maciços e acompanhamento da criação ou expansão de fraturas devido ao alívio de tensões permitido pelo avanço da lavra. Um fator importantíssimo na hora de se produzir rochas ornamentais do maciço é o estado tensional deste.

## 5. Tecnologias diamantadas de corte de rochas

### 5.1. Cortadora a corrente diamantada

A máquina cortadora a corrente diamantada é constituída de uma corrente com uma nova concepção, diferente da antiga cortadora a corrente. O mecanismo da máquina é semelhante, porém com a diferença que os dentes de metal duro são substituídos por peças diamantadas. O aprimoramento tecnológico da máquina associado à fixação mecânica dos elementos abrasivos de corte diamantados, contribuíram para uma relevante difusão desta tecnologia de corte na lavra de pedreiras de mármore na Itália e em Portugal, que a partir da década de 1970 passou a ser considerada uma tecnologia indispensável em pedreiras que praticam os métodos de lavra em subterrâneos. A máquina consiste em um equipamento moderno, composto por um braço até o máximo de 4 metros de comprimento, dotado de corrente, onde em seus anéis são aplicados elementos abrasivos constituídos de segmentos ou plaquetas de diamantes sinterizados, que podem ser substituídos após o seu desgaste (Fig. 34). O braço possui forma e dimensões variáveis, de acordo com a profundidade do corte a ser realizado. Apresenta, ao longo de seu perímetro, uma série de furos próximos entre si, através dos quais é injetada água para seu resfriamento, que possui também funções de auxiliar o movimento da corrente diamantada.

Essas correntes diamantadas permitem a realização de mais de 1.000 m<sup>2</sup> de corte em mármore mais duros, antes da sua substituição total. Porém, tornam-se necessárias intervenções para a substituição de outras partes que compõem a corrente, como por exemplo, os patins e a própria corrente, limitando aproximadamente a 400 m<sup>2</sup> a superfície teórica a ser cortada sem interrupções.

No caso dos mármore, os custos unitários de corte com cortador a corrente diamantada são superiores aos do fio diamantado, o qual realiza o corte com mecanismo análogo e, portanto, com semelhante energia específica, porém com espessura reduzida. A velocidade de corte dificilmente ultrapassa a taxa de produção de 5 m<sup>2</sup>/h, mesmo utilizando-se sistema de maior potência. A principal vantagem da tecnologia de cortador a corrente diamantada reside no fato de se obter na operação de corte uma superfície perfeita, não necessitando, desde o início até o final do corte, a execução de trabalhos preparatórios.



**Figura 44** - Cortadora a corrente diamantada em lavra subterrânea. Foto: CETEM/MCTI, 2008.

## 5.2. Fio diamantado

O desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado decorreu da necessidade de superar as inconveniências técnicas típicas do fio helicoidal. Os primeiros equipamentos de acionamento do fio diamantado foram inspirados nessa tecnologia. A estrutura e o princípio de funcionamento dos

equipamentos de última geração do fio helicoidal, também proporcionaram o desenvolvimento dos protótipos de máquinas para o acionamento do fio diamantado.

As técnicas baseadas no uso de elementos diamantados assumiram em um passado recente amplo uso no caso das rochas carbonáticas, registrando um progresso notável quanto ao desenvolvimento do método e do equipamento. O intenso esforço de aperfeiçoamento dos equipamentos e das ferramentas acompanhados de um adequado estudo do mecanismo de corte permitiu elevar os parâmetros do fio diamantado nas pedreiras de mármore a níveis muito elevados, determinando a difusão generalizada em curto espaço de tempo. Os parâmetros obtidos com emprego do fio diamantado nos cortes de rochas silicatáticas (granitos) são obviamente inferiores àqueles alcançados nas rochas carbonáticas (mármore), em virtude da maior dureza e abrasividade dos granitos, que acarretam problemas particularizados para a fabricação dos fios diamantados, elementos abrasivos e dos próprios equipamentos.

A partir do final da década de 1970, na Itália, foram desenvolvidas as primeiras máquinas com fio diamantado na extração de mármore e travertinos, para corte deste tipo de rocha e com esta tecnologia tendo como diferença principal o sistema operacional das máquinas de tipo hidráulica e de tipo elétrica.

A substituição da tecnologia do fio helicoidal foi decorrente da evolução constante das tecnologias de abrasivos diamantados nas minas de Carrara, Itália, sob o ponto de vista técnico e aplicativo, para os cortes de paredes verticais, e pisos horizontais com diferentes tipos de máquinas da época.

Depois do aparecimento do fio diamantado há alguns anos, substituindo gradualmente o fio helicoidal, esta nova tecnologia de corte é objeto de contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento. A melhoria de desempenho das máquinas desta tecnologia de lavra vem proporcionando maiores velocidades de corte da rocha, maior capacidade de manobra de todo o equipamento bem como uma melhor compartimentação do volume de rocha a desmontar, além da otimização dos componentes constituintes do próprio fio diamantado.

A tecnologia de corte com fio diamantado tem sido largamente utilizada nas pedreiras de rochas ornamentais, sendo a solução consagrada para a lavra de rochas carbonáticas e silicatáticas em maciços rochosos e, em alguns casos, em matacões, quando estes se apresentam na forma de grandes volumes.

Pesquisadores estudaram a partir do conhecimento das características físicas e mecânicas de granitos de pedreiras em atividade de produção na Itália e no Brasil, o emprego da técnica de extração por fio diamantado, através da avaliação dos elementos diamantados fabricados pelas indústrias de elementos abrasivos (VIDAL, 1999).

Apesar da simplicidade de emprego, é importante ressaltar que a sua utilização exige um bom conhecimento técnico-operacional, devendo-se dar importância às condições geológicas reinantes no maciço rochoso, particularmente à presença de tensões internas, para se obter uma melhor desempenho da tecnologia.

O princípio básico de corte com fio diamantado é a translação deste, sob tensão, quando enlaçado na rocha. Para isso, primeiramente, são efetuados furos coplanares e perpendiculares que se interceptam nas extremidades. Em seguida, o fio diamantado é inserido dentro destes furos, as duas pontas são emendadas, formando um circuito fechado, e colocado sobre a polia motriz do equipamento de corte. O corte se processa com o movimento de translação do fio, tensionado, em contato com a rocha. Durante o corte é fornecida água ao sulco de corte, com a finalidade de refrigeração e limpeza das partículas provenientes do corte.

### Tipos de equipamentos de fio diamantado

A evolução das máquinas de corte a fio diamantado foi considerável nas últimas décadas tendo em vista que se saiu de equipamentos inicialmente hidráulicos para equipamentos elétricos automatizados, após passagem por equipamentos híbridos a elétricos com tensionamento do fio por contrapeso. É apresentada abaixo uma descrição sumária destes tipos de equipamentos.

Equipamentos de fio diamantado hidráulicos: alimentados por um sistema hidráulico, separado da máquina de fio, com uma bomba hidráulica de caudal variável, que aciona a polia motriz e outra de caudal fixo, que serve para acionar o sistema de tensionamento do fio. Possuem ainda motores elétricos de 15-22 kW e painel de comando. Estão em desuso.

Equipamentos elétricos automáticos: o surgimento deste tipo de equipamento resultou da necessidade de se obter uma tensão o mais constante possível do fio. A tensão é conseguida por meio de uma série de contrapesos aplicados em uma forquilha, situada no extremo dos trilhos. A principal vantagem deste tipo de equipamentos está na sua simplicidade. Entretanto, a difícil regulagem da tensão do fio diamantado durante o corte, em superfícies não planas, torna problemática sua utilização, principalmente em cortes de bancadas altas. A potência varia de 25 a 55 kW.

A máquina elétrica equipada com acionamento automático foi o grande salto de qualidade na tecnologia de corte por meio de fio diamantado; isto deu-se com o advento de equipamentos automáticos, dotados de regulagem elétrica para o tensionamento do fio. O surgimento destes novos equipamentos permitiu a instalação de uma maior potência (fio sempre corretamente tenso), além de possibilitar o funcionamento automático do sistema após a fase inicial do corte. É o tipo de equipamento mais usado, com potências de 40 kW até 150 kW.

A crescente necessidade de se dispor de equipamentos com potências maiores, de modo a acompanhar o desenvolvimento das ferramentas, levou ao surgimento dos equipamentos híbridos.

Neste tipo de equipamento a polia motriz é movida por um motor elétrico, com o sistema de tensionamento do fio continuando sendo feito por meio hidráulico, o qual é acionado por uma central separada, de modo que a utilização dos carros móveis fosse possível. Devido a problemas de estabilidade do conjunto, as potências instaladas nunca ultrapassaram a casa dos 22,5 kW.

Algumas melhorias foram introduzidas no sistema, tais como: dispositivos semiautomáticos (rele amperímetro, que regula o dispositivo de tensionamento do fio). Com isso foi possível conseguir uma regularização do fio, tipo "on/of", controlada pela absorção da corrente do motor principal; mas apesar deste avanço tecnológico, problemas surgiram. Vibrações anômalas sobre o fio originavam uma distribuição irregular das "pérolas" e um aumento dos esforços no cabo, com a consequente fadiga do mesmo.

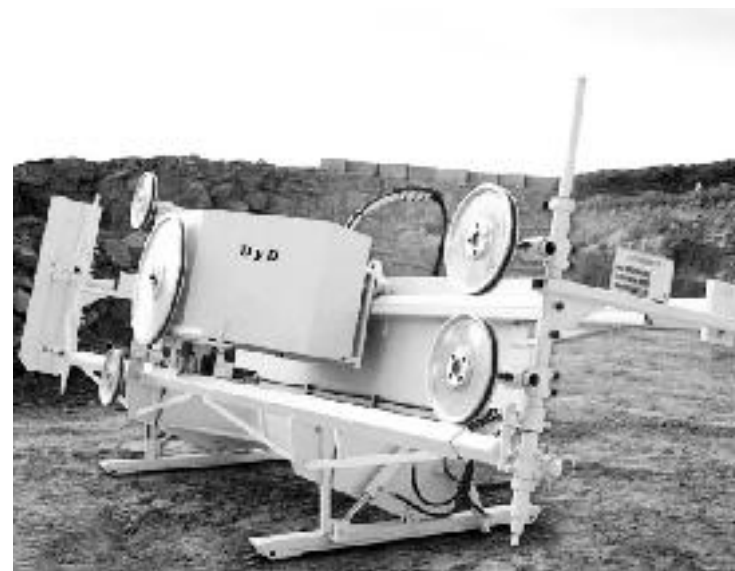
A utilização do fio diamantado hoje em dia, não está restrita à tecnologia de corte em pedreiras de rocha ornamental, já que os equipamentos denominados monofio são usados na construção civil e em diversas indústrias, tanto no recorte de peças quanto para a demolição de instalações obsoletas.

O desenvolvimento da tecnologia do fio diamantado permitiu que fossem criadas máquinas destinadas à produção de objetos bidimensionais, usados na indústria de decoração e na urbanística. Tais máquinas são capazes de executar cortes em perfis nos blocos de vários tipos de rocha, por meio de desenhos cujas informações são transmitidas por computação.

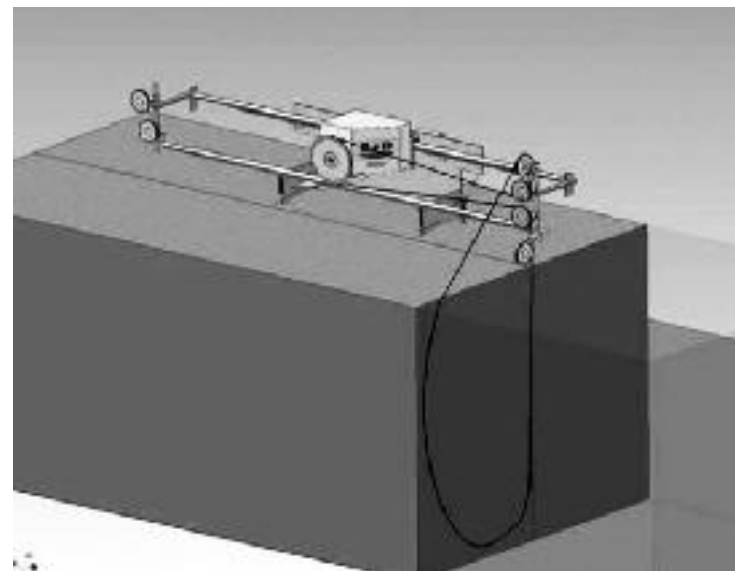
Existe também um sistema de corte a fio diamantado, denominado de multifio, o qual permite que os blocos sejam serrados em placas com espessuras variadas: 2/3/4/5/8/10/20/30 mm, através de vários fios dispostos paralelamente nos teares de corte. Tal equipamento substituiu com sucesso os teares de disco, executando cortes com maiores velocidades e economicidades. Existem

equipamentos para o uso de 5/10/20/30/60/80 fios diamantados, dispostos paralelamente, que são recomendados principalmente para cortes de materiais de dureza muito alta. O investimento inicial para este tipo de tear é alto, quase o dobro do que um tear convencional que pode estar, hoje, com instalação, na faixa de um milhão de reais. O fio diamantado para esse tear também é um insumo caro (em torno de 60 US\$/m), no entanto, um estudo comparativo realizado por Souza et al. (2012) apontou que esta tecnologia apresenta custos de operação menores que o tear convencional e ainda apresenta uma produtividade seis vezes superior.

Recentemente foi desenvolvido um outro tipo de equipamento que consiste em um conjunto: cortadora, suporte e polias (Fig. 45). A máquina movimenta-se por um eixo no suporte não precisando da instalação de trilhos e, assim como com os outros tipos de máquina, o sistema de polias permite qualquer tipo de corte (Fig. 46).



**Figura 45** - Fio diamantado sem trilhos. Extraído de DYD, 2013.



**Figura 46** - Corte em "L" com fio diamantado sem trilhos. Extraído de DYD, 2013.

### Constituição do fio

O fio diamantado é constituído por um cabo de aço galvanizado, que funciona como suporte para as pérolas diamantadas, separadas ao longo do cabo por molas metálicas (fio para mármore), ou por material plástico ou borracha, utilizados nos fios para rochas silicatadas (granito), bem como em alguns tipos de mármore ricos em sílica (Fig. 45).

O componente mais importante do fio diamantado consiste em um cabo de aço de 5 mm de diâmetro no qual são introduzidas em certa sequência anéis com pérolas de diamantes (elementos abrasivos de diamantes) que são fabricadas por dois métodos distintos: eletrodeposição e sinterização. As eletrodepositadas são constituídas segundo um processo químico, através de banhos galvânicos, que utilizam como eletrólito um composto de sais de níquel. Sobre cada pérola é depositado aproximadamente 0,30 a 0,40 quilate de diamante sintético com granulometria entre 0,42 e 0,25 mm (40 e 60 *mesh*). Para as sinterizadas, o método consiste em homogeneizar o metal com o diamante sintético em uma granulometria entre 0,42 e 0,29 mm (41 e 50 *mesh*) e solidificar a mistura, fazendo uso de elevadas pressões e temperaturas. A principal diferença entre os dois tipos de anéis nos fios diamantados é que nas pérolas eletrodepositadas a velocidade de corte decresce linearmente com uso, enquanto as sinterizadas mantêm uma velocidade de corte constante durante a vida útil do anel.

Existe ainda a recente tendência a favor das sinterizadas em vista da diferença significativa em termos de custos operacionais. Os fabricantes de material diamantado desenvolveram um novo anel com pérolas de diamantes sinterizadas de menor diâmetro e conseqüentemente surgiu um novo fio diamantado com 30 anéis/metro, cabo de aço de 3 mm e 49 fios e anéis de 6,5 mm de comprimento por 7 mm de diâmetro. Parece, até o momento, que o uso de tais elementos abrasivos tenha dado resultados positivos em determinados tipos de rochas, particularmente em rochas metamórficas de estrutura cristalina (Mármore tipo Carrara, Rosa Portugal, Branco e Rosa da Grécia e Turquia) ou em rochas metamórficas silicáticas como os serpentinos da região de Vaimalenco e os Verdes dos Alpes.

Normalmente, a montagem do fio diamantado é feita obedecendo a uma frequência de 29 a 35 pérolas/metro, para rochas carbonáticas, e 39 a 41 pérolas/metro, para rochas duras e/ou abrasivas. Para tanto, são empregados moldes específicos, que determinam este espaçamento a ser preenchido por material de revestimento do cabo de aço (plástico, borracha ou mola). Normalmente é utilizado o fio emborrachado (vulcanizado) para corte de granito, o de molas para mármore e o de plástico para teares multifio.

Por motivo de segurança os fios com mola possuem anéis de fixação a cada intervalo constante do fio, evitando que, em caso de rompimento do cabo de aço, sejam lançadas mais pérolas que a quantidade compreendida naquele intervalo (3 ou 5 unidades). Esses anéis também permitem minimizar o deslocamento das pérolas devido à expansão/retração das molas.

O fio diamantado para pedreiras pode ser utilizado em todas as fases do desmonte de rochas, seja ele primário ou secundário, e no esquadrejamento de blocos. A utilização do fio é mais destacada nas etapas de desmonte primário e secundário. A aplicação do fio no esquadrejamento de blocos muitas vezes não é viável, pois seu emprego não permite um esquadrejamento seletivo, ou seja, a seleção de blocos sem defeitos do ponto de vista comercial, preferindo-se outras técnicas como perfuração e cunhas ou explosivo (MARCON, 2012).

O elemento cortante, a pérola, é constituído de uma pasta diamantada montada sobre um suporte cilíndrico. As pérolas utilizadas para a realização dos cortes nas pedreiras possuem diâmetros externos iniciais, de 10-11 mm para fio de pedreira e de 7-8 mm para máquinas multifio, de acordo

com o fabricante e o tipo de pérola. Com a utilização, esse diâmetro vai decaindo, até atingir o anel de suporte da pasta diamantada. O anel de suporte possui diâmetro externo de 7 mm, para fio de pedreira e de 5 para multifio, também de acordo com o fabricante e o tipo de pérola (Figura 46).

A deposição da pasta diamantada nos anéis de suporte é feita por meio de processos eletrolíticos ou por sinterização.

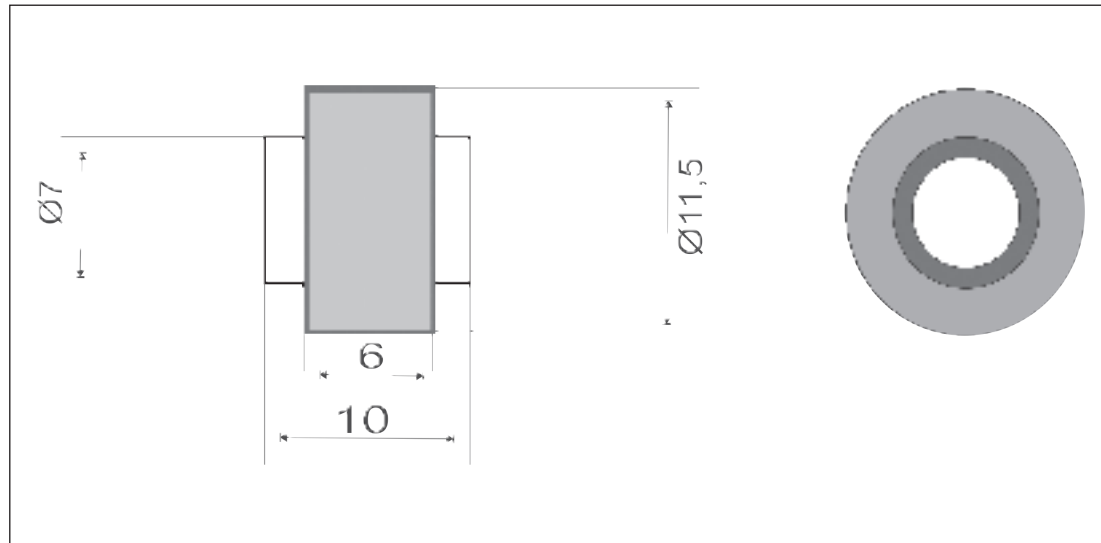
Pérolas eletrodepositadas: o processo por eletrodeposição se dá através de banhos galvânicos, que utilizam como eletrólito um composto de sais de níquel. Assim, por eletrólise, o aro cilíndrico da pérola eletrodepositada é revestido por um extrato de colante metálico, que mantém presos os grânulos de diamante depositados sobre sua superfície, até que o desgaste do cilindro da pérola seja completo (Fig. 47).



**Figura 47** - Fio diamantado nas versões com molas, plastificado e vulcanizado. Extraído de Solga Diamant, 2013.

Tais pérolas geram ação de corte com uma única camada de diamante, cujo tamanho de partículas se situa na faixa de 30/40 *mesh* (600-425  $\mu\text{m}$ ) a 40/50 *mesh* (425-300  $\mu\text{m}$ ). Este sistema é preferível para cortes de rochas de baixa dureza e em pequenos cortes, devido ao fato dos diamantes se apresentarem mais protuberantes e, portanto, cortarem de maneira mais eficaz, mesmo que com maior desgaste. Sua velocidade de corte decresce regularmente com o tempo e, em função do tipo de aplicação, permitem a utilização de máquinas de baixa potência.

Pérolas sinterizadas: o processo de sinterização consiste na homogeneização do pó de diamante com o pó de metal ligante (geralmente tungstênio, cobalto, cobalto-bronze, bronze, ferro-cobalto), sendo a mistura prensada e sinterizada de modo a formar uma matriz ligante impregnada com diamantes ao redor do cilindro (Fig. 48). Esse processo é melhor indicado na fabricação de pérolas que irão atuar principalmente em rochas duras e rochas abrasivas, pelo fato de permitir uma homogênea distribuição dos diamantes na pasta diamantada que, em se consumindo, liberam novos diamantes até o esgotamento da pasta diamantada da pérola.



**Figura 48** - Dimensões da pérola.

As composições das ligas metálicas, a concentração e a granulometria dos grãos de diamantes são escolhas que dependem do tipo de aplicação, assim como acontece nos segmentos diamantados de discos e de lâminas. Geralmente o tamanho das partículas de diamante nas pérolas é de aproximadamente 425-300  $\mu\text{m}$  (40/50 mesh).

A velocidade de corte é praticamente constante ao longo de sua vida útil. Ao contrário das pérolas eletrolíticas, as sinterizadas requerem máquinas com maior potência.

O diamante é a parte da pérola que realmente corta. O tipo de rocha a ser cortada é que definirá a qualidade, a concentração e o tamanho dos mesmos.

O diamante surgiu há milhões de anos na natureza, através da transformação química do carbono em cristal, tendo acontecido em grandes profundidades, algumas vezes mais de 80 km, sob influência de temperatura e pressão muito elevadas (temperatura em torno de 1.100 - 1.300°C e pressão maior que 70t/cm<sup>2</sup>). Os diamantes, tanto naturais como sintéticos, apresentam variedades de forma cristalina, sendo predominante, para os diamantes naturais, a forma octaédrica. É o mais duro material conhecido, apresentando dureza 10 na escala de Mohs.

Os diamantes extraídos da natureza são purificados, processados e classificados de acordo com o tipo de função que desempenham. No início dos anos 1950, grandes companhias passaram a produzir diamante sintético, o qual é obtido através da exposição do grafite a altas temperaturas e altas pressões de compressão.

De acordo com Turchetta (2003), a matriz diamantada tem a função de suportar rigidamente os diamantes o tempo necessário para que este realize o corte; e tem uma dureza adequada para que possa se desgastar de maneira que quando o diamante estiver no tamanho e/ou forma final de sua vida útil possa sair e ser substituído por outro diamante emergindo da matriz. Assim, uma matriz mole pode resultar no destacamento do diamante antes do fim de sua vida útil. Já uma matriz muito dura, desgastará o suficiente e pode ocasionar a planificação da superfície do diamante, cegando a ferramenta. A dureza da matriz também é influenciada pela dureza e abrasividade da rocha na qual será utilizada (Fig. 49).



**Figura 49** - Pérola eletrodepositada. Extraída de Diamar SRL, 2013.



**Figura 50** - Pérola sinterizada. Extraída de Stonecontact, 2013.

### Rendimento

O desempenho do fio diamantado é avaliado pelo seu rendimento e pela velocidade de corte. O rendimento expressa a vida útil do fio diamantado, sendo explicitado pelo total de área de rocha cortada por metro de fio (m<sup>2</sup>/m). Para um maior controle de desempenho do fio diamantado, o desgaste das pérolas é avaliado após a realização de cada corte, e quantificado pela diferença de diâmetro das pérolas, antes e após o término do corte. O desgaste do fio diamantado não é linear, como é observado nas figuras 51 e 52. O mecanismo de desgaste das pérolas consiste no desbaste gradual da matriz metálica, que suporta os diamantes, para que estes aflorem e se tornem afiados, com poder de corte. À medida que cada grão de diamante é consumido, novos grãos surgirão com o desgaste da matriz metálica, estabelecendo-se um ciclo, para o consumo das múltiplas camadas de diamante. Para se calcular o rendimento do fio diamantado, utiliza-se a equação:

$$R = \left( \frac{\varnothing_n^2 - \varnothing_a^2}{\varnothing_i^2 - \varnothing_f^2} \right) \frac{A}{L}$$

Onde,

R = Rendimento (m<sup>2</sup>/m);

$\varnothing_n$  = Diâmetro da pérola nova (mm);

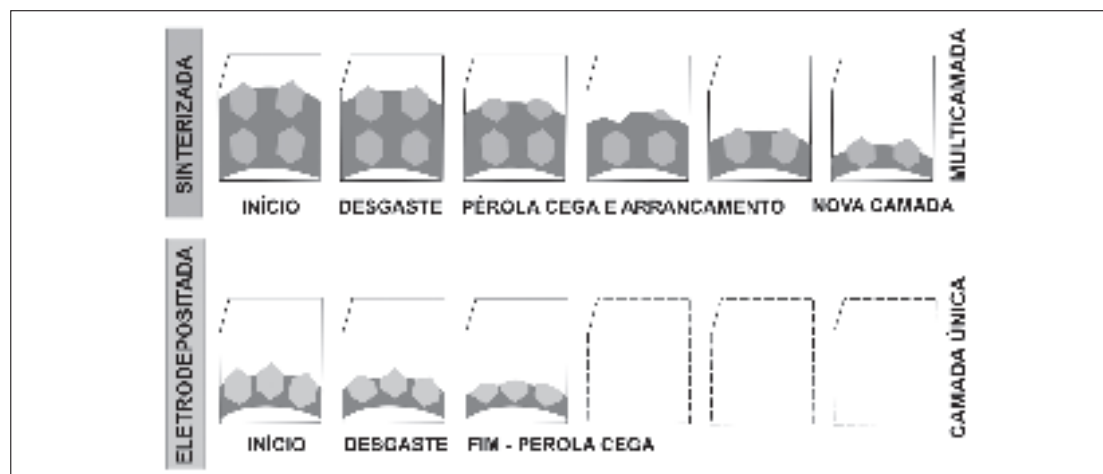
$\varnothing_a$  = Diâmetro do anel de suporte (mm);

$\varnothing_i$  = Diâmetro da pérola no início do corte (mm);

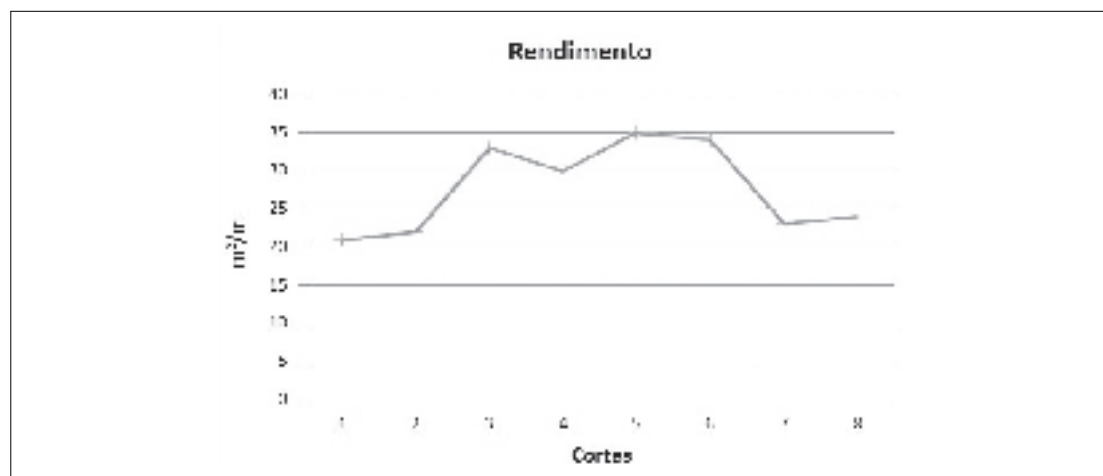
$\varnothing_f$  = Diâmetro da pérola no fim do corte (mm);

A = Área de rocha cortada (m<sup>2</sup>);

L = Comprimento do fio (m).



**Figura 51** - Mecanismo de desgaste das pérolas sinterizadas e eletrodepositadas. Modificado de Caranassios e Pinheiro (2003).



**Figura 52** - Exemplo de rendimento de um fio diamantado ao longo de sua vida útil. CETEM/MCTI.

A velocidade de corte é a razão entre a área de rocha cortada pelo tempo gasto para a realização do corte (m<sup>2</sup>/h), e depende de diversos parâmetros, sendo o principal o tipo de rocha a ser cortada. Vale ressaltar que a velocidade de corte não é constante ao longo de todo o corte e está condicionada ao comprimento de fio em contato com a rocha (dimensão de arrasto) e ao grau de anisotropia do maciço (CARANASSIOS; PINHEIRO, 2003).

O corte com o fio diamantado é afetado por parâmetros controláveis e não controláveis. Os parâmetros não controláveis são relativos a características das rochas. Os parâmetros controláveis são de âmbito operacional, como: o raio de curvatura do fio (ideal que o fio tenha forma de semicircunferência ou segmento de circunferência), potência da máquina, velocidade periférica e de arrasto do fio, quantidade de água no corte e dimensões do corte. Na tabela 4 observam-se os diversos parâmetros que afetam a eficiência do corte com fio diamantado.

**Tabela 4** - Fatores que afetam a eficiência do corte com o fio diamantado.

Parâmetros não controlados relacionados à característica das rochas	Parâmetros parcialmente controlados ou controlados	
	Propriedades da ferramenta de corte e equipamentos	Condições de trabalho
Dureza	Potência da máquina	Pessoal qualificado
Abrasividade	Velocidade periférica	Vibrações da máquina
Tensões	Números de pérolas por metro	
Grau de alteração	Número de pérolas em contato com a rocha	
Descontinuidades	Raio de curvatura do fio em contato com a rocha	
Propriedades mineralógicas	Quantidade de água usada	
Características texturais	Velocidade de arrasto	
	Dimensões do corte	

Marcon *et al.*, 2012.

#### Máquina de corte

Os parâmetros mais importantes que devem ser observados na máquina de corte são a potência e a velocidade periférica linear.

Referimo-nos à potência do motor principal, que influi significativamente na capacidade de trabalho do fio diamantado.

Mas, além da potência, as rotações do motor principal (RPM) são fator determinante para obtenção do torque do motor, que é dado pela equação:

$$\Delta F = \frac{716 \times P}{\text{rpm}}$$

Onde:

$\Delta F$  = Torque motor principal, kgfm;

P = Potência motor principal, cv;

rpm = Rotações por minuto motor principal;

716 = Constante.

Quanto maior o torque, maior poderá ser o comprimento do fio em contato com a rocha, possibilitando a realização de cortes com maiores dimensões. Não importa a área de corte a ser realizada, mas sim a dimensão em que o fio será arrastado, devendo esta dimensão ser compatível com o torque da máquina.

A velocidade periférica é a velocidade linear do fio diamantado em circuito fechado, e que é inversamente proporcional à dureza da rocha. Nos mármore varia de 35 m/s a 40 m/s e, nos granitos hoje, é frequente encontrar velocidades de 30 m/s. Essa velocidade é obtida a partir do diâmetro do volante juntamente com as rotações do motor, ou seja:

$$\text{Velocidade Periférica (m/s)} = \text{comprimento circunferência (m)} \times \text{RPM} / 60$$

Dentre os parâmetros de maior importância na avaliação dos desempenhos de fio diamantado, dois devem ser levados em especial consideração: a velocidade de corte ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) e a vida útil do fio, em  $\text{m}^2$  cortados, ou rendimento, expresso pelo número de metros quadrados cortados por metro de fio utilizado ( $\text{m}^2/\text{m}$ ).

A velocidade de corte não é constante durante todo o corte e está condicionada ao comprimento do fio em contato com a rocha, em cada momento, podendo ser obtida da seguinte forma:

$$\text{Velocidade de Corte (m}^2/\text{h)} = \text{superfície (m}^2) / \text{tempo (h)}$$

Esses dois parâmetros são inversamente proporcionais. Apenas um exame conjunto dos mesmos permitirá a correta avaliação da relação custo-benefício, buscando-se sempre a melhor velocidade de corte, para um desejado consumo de pérolas.

A tabela 5 mostra valores médios obtidos para alguns tipos de granitos do Brasil e a evolução da tecnologia e da metodologia empregada. Deve se destacar que os produtores brasileiros são especialistas em corte de materiais duros, como mostram as melhorias de produtividade dos últimos anos.

O emprego da tecnologia do fio diamantado permite a organização racional dos trabalhos de lavra, através da realização do planejamento da atividade extrativa, otimizando o ciclo de produção da pedra.

Podemos citar como principais vantagens:

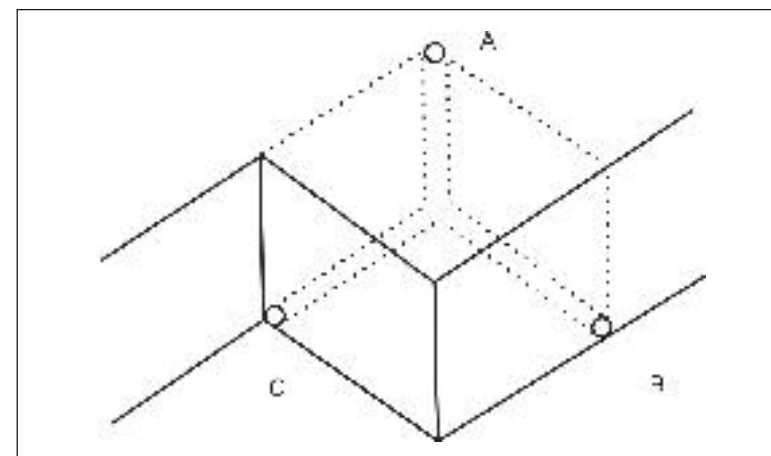
- Regularidade e excelente acabamento das superfícies cortadas;
- manutenção da integridade física da rocha, com nenhum tipo de dano à mesma;
- espessura média de corte de apenas 10 mm, o que é insignificante quando comparado a outras tecnologias;
- a partir dos três itens acima, tem-se uma maior qualidade da produção, com obtenção de um maior volume comercial de blocos, eliminando-se os tradicionais “descontos”;
- elevadas velocidades de corte ( $\text{m}^2/\text{h}$ ), com ganhos de produtividade;
- menor custo unitário de corte ( $\$/\text{m}^2$ ), em relação a tecnologias tradicionais de corte;
- melhor relação custo-benefício, com comprovada viabilidade econômica;
- versatilidade de uso para as mais variadas condições operacionais, permitindo a realização dos mais variados tipos de cortes;
- mínimo impacto ambiental, pelo menor volume de material descartado; e
- atividade silenciosa, com ausência de poeira e vibrações, contribuindo para melhoria das condições de trabalho.

**Tabela 5** - Exemplos de produtividade e rendimento de fio diamantado no Brasil em lavra de granito.

Exemplos de produtividade e rendimento de fio diamantado no Brasil em lavra de granito		
Ano 2000		
Material	Velocidade de corte ( $\text{m}^2/\text{h}$ )	Produtividade ( $\text{m}^2/\text{m}$ )
Bordeaux (RN)	1,8	15
Branco ceará (CE)	2,6 – 3,5	10 – 14
Branco Piracema (MG)	1,8	14
Branco Romano (ES)	2,5	20
Casa Blanca (CE)	1,2	16
Giallo California (MG)	1,3	16
Ouro Branco (CE)	2,9	25
Ouro Brasil (ES)	2,4	18
Preto São Gabriel (ES)	4,5	45
Samoa Light (ES)	2,0	16
Verde Labrador (ES)	2,6	22
Verde Pavão (ES)	2,4	24
Anos 2011 - 2013		
Preto São Domingos (ES)	8 - 10	24 - 30
Preto São Gabriel (ES)	30	24 - 30
Verde Pavão (ES)	5 - 6	16 - 18
Cinza Corumbá (ES)	10-15	16 - 18
Amarelo Ornamental (ES)	15 -20	26 - 32
Bege Pavão (ES)	12	24 - 28
Verde Pavão (ES)	12	24 - 28

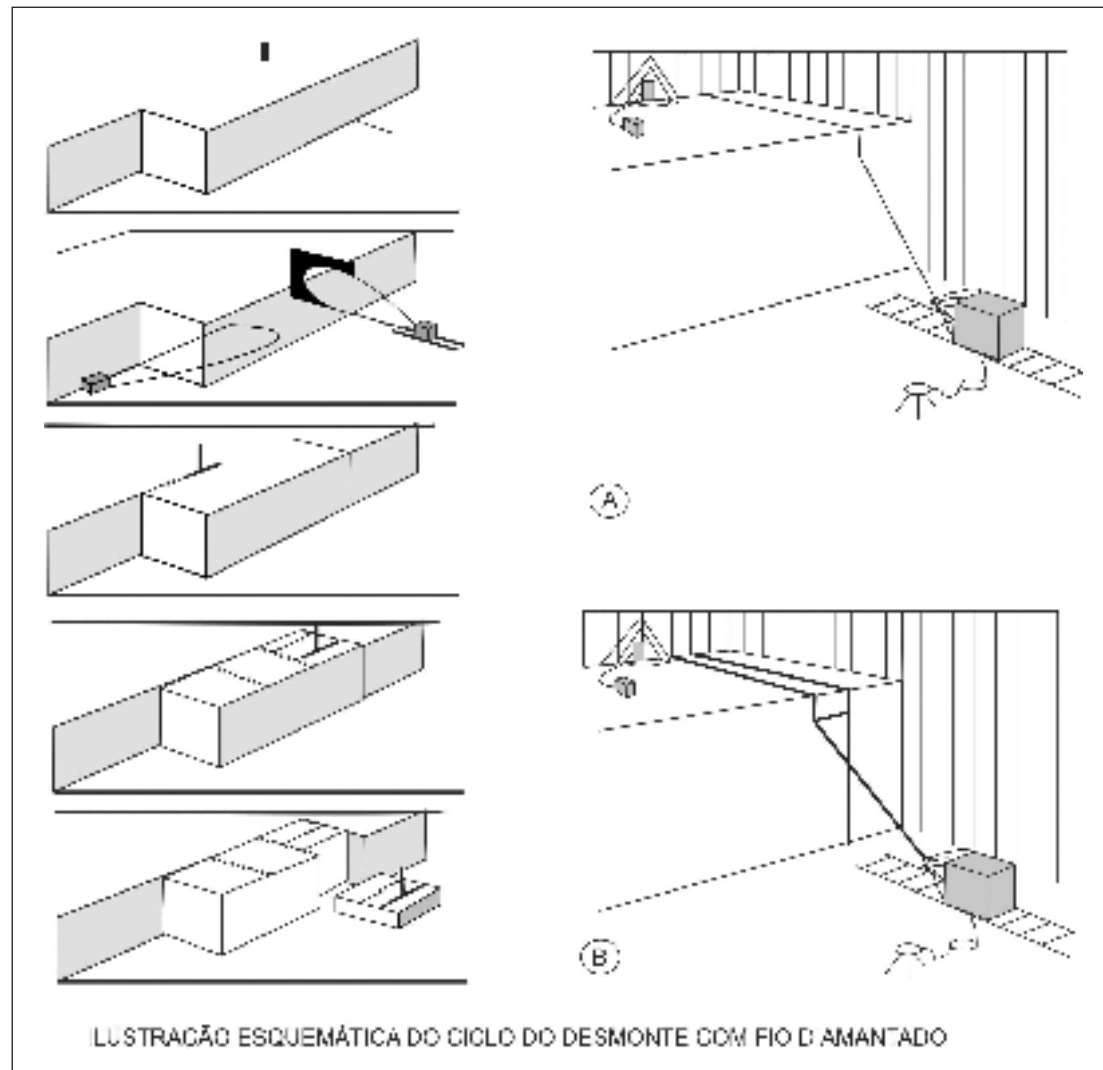
#### Aplicação da tecnologia do fio diamantado

Na realização de cortes com fio diamantado torna-se necessário a realização de furos coplanares na parte interna do maciço, que irão determinar a superfície a ser cortada. Para facilitar o encontro desses furos, utiliza-se normalmente uma perfuratriz denominada de *down-the-hole* ou fundo-furo, destinada à realização dos furos horizontais e verticais, com diâmetro da ordem de 90 mm a 105 mm.



**Figura 53** - Furação necessária para introduzir o fio diamantado. CETEM/MCTI.





**Figura 54** - Exemplos de cortes com diamantado. Adaptado de Jimeno, 1996.

O princípio básico de corte é puxar uma alça de fio diamantado, enlaçada na rocha por dois furos que se interceptam, formando um circuito fechado, em que através do movimento de translação do fio e da constante força de tração exercida sobre ele, promove-se o desenvolvimento do corte.

Em função de sua grande flexibilidade e versatilidade, o fio diamantado pode realizar os mais diversos tipos de cortes necessários e suficientes para a extração de rochas ornamentais. Os principais cortes realizados são verticais e horizontais realizados com a máquina posicionada em cima ou embaixo da banca, frontal ou perpendicularmente, em relação aos mesmos. Porém, com sistemas de polias é possível realizar qualquer tipo de corte como cortes em "L" e cortes cegos.

As atividades de mineração desenvolvidas em pedreiras requerem cuidados especiais. Não devemos esquecer que, por trás de qualquer máquina, equipamento ou material está uma vida humana. Assim, a empresa deve adotar um programa de treinamento e prevenção de acidentes do trabalho. É fundamental o conhecimento completo das questões de segurança da operação.

O posicionamento do operador, em relação à máquina, é o principal fator de salvaguarda na sua segurança, uma vez que as velocidades periféricas do fio diamantado representam as mesmas condições de disparo de um projétil.

Pela sua constituição, o fio diamantado que apresenta suas pérolas separadas somente com molas (fio para mármore) representa maiores riscos de acidentes. Todavia, isto não impede que os modelos plastificados e vulcanizados possam, eventualmente, romper-se representando desta forma um risco potencial.

Outro fator que deve ser levado em consideração, nas operações com fio diamantado, é o perfeito isolamento e/ou aterramento dos equipamentos geradores e/ou transmissores de energia elétrica, pois o ambiente de trabalho é predominantemente úmido. Os equipamentos de proteção individual - EPI devem ser usados obrigatoriamente.

### 5.3. Disco diamantado

A tecnologia de corte com equipamentos com disco é semelhante a cortadora à corrente usada em lavra a céu aberto. Os equipamentos de corte com disco permitem obter pequenos blocos de rochas (bloquetes), geralmente, sendo ainda necessário subdividi-los em placa de rochas. É uma tecnologia de grande limitação, tendo uma escala de profundidade de corte de 20 a 60 cm no máximo. O equipamento consiste basicamente de um disco cortador montado sobre um carrinho. Recomenda-se para o corte em mármore e ardósias disco diamantado, e para o caso de rochas macias (calcário) o disco de metal duro.

Em algumas máquinas os discos podem girar em ambos os sentidos; possuem diâmetros bastante variados, dependendo da rocha e das fraturas sub-horizontais. Exemplo: o caso da pedra Lesinha (calcário), Itália, que utiliza o disco com diâmetro variando de 1,5 a 3,0 m.



**Figura 55** - Cortadora de disco diamantado (Itália). Foto: CETEM/MCTI, 2006.

Outros exemplos são: a Ardósia, em Papagaio (MG) e o Calcário da região do Cariri (CE), que utilizam o disco variando entre 0,35 e 0,50 m.



Figura 56 - Ardósia, em Papagaio (MG) e Calcário do Cariri (CE). FOTOS: CETEM/MCTI, 2005.

## 6. Outras tecnologias de corte de rocha

### 6.1. Cortadora a corrente

As primeiras experiências com cortadoras a corrente de metal duro (vídia), equipadas com ferramentas a base de carbeto de tungstênio, inspiradas naquelas utilizadas na extração subterrânea dos carvões no final da década de 1930, ocorreram em 1965, na Bélgica e na França, para a produção de mármore coloridos.

Os primeiros testes realizados na Itália com a cortadora a corrente foram nos mármore da região de Carrara, com resultados bastante satisfatórios, conseguindo-se velocidade de corte de 5 m<sup>2</sup>/h, porém com frequentes quebras e difícil operacionalidade nas jazidas. O aprimoramento tecnológico proveniente da substituição da corrente de metal duro por corrente diamantada, na fixação mecânica dos elementos de corte, contribuiu para uma relevante difusão da referida técnica nas áreas produtivas de mármore na Itália e em Portugal, passando a ser considerada, a partir da década de 1970 indispensável na abertura de pedreiras subterrâneas.

Normalmente a cortadora a corrente possui braços com 2 a 4 m de comprimento, sendo utilizada em lavra por bancadas baixas de calcários e travertinos, como por exemplo, os calcários da região de Estremenho, em Portugal e do Município de Ouroândia na Bahia, Brasil (Figura 57).

Essa máquina cortadora representa um recurso integrado e/ou de preparação para o uso de outras técnicas. Possui emprego generalizado na abertura de galerias, devido ao recurso de movimentação horizontal e vertical dos braços. A cortadora a corrente é constituída de um braço sobre o qual desliza uma corrente dentada que gira na periferia do mesmo e direciona o corte. Para as rochas menos tenazes utilizam-se dentes de metal duro. Para material mais duro, arredondam-se os dentes, diminuindo o seu comprimento para aumentar a robustez, e substituem-se os mesmos por peças diamantadas. O custo do corte aumenta conforme a tenacidade da rocha.

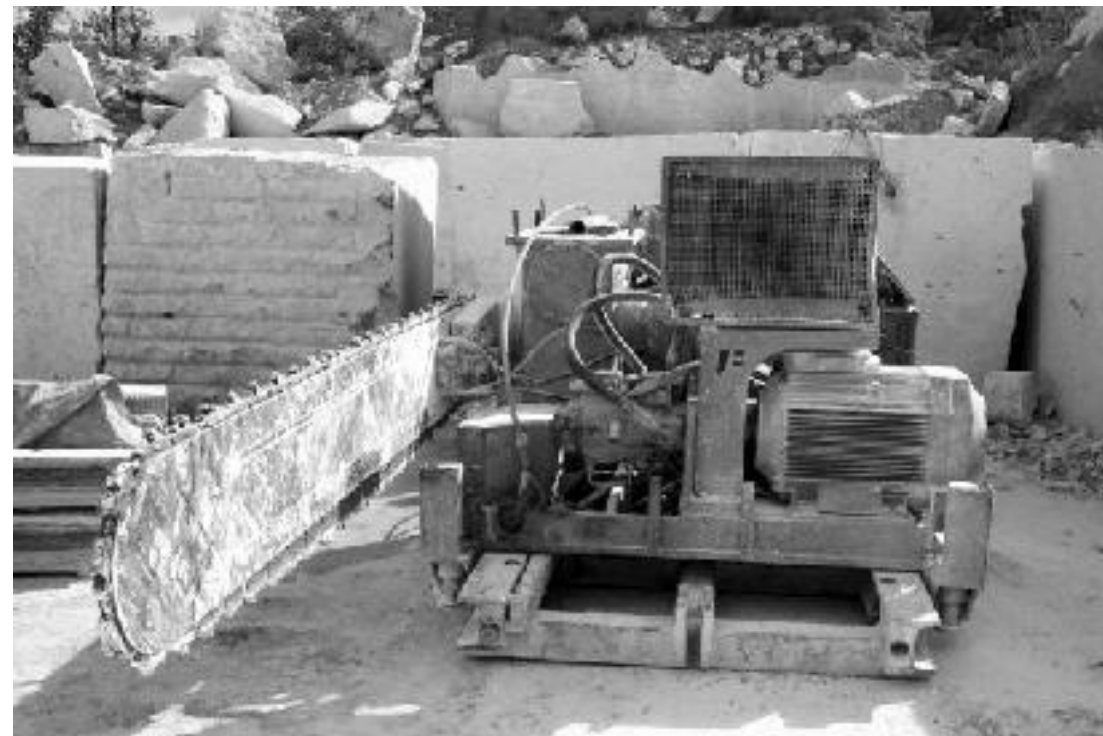


Figura 57 - Cortadora a corrente. Mármore Bege Bahia, na Bahia. Foto: CETEM/MCTI, 2006.

A tabela 6 apresenta os parâmetros de corte de acordo com a sua dureza, em diferentes tipos de mármore.

Tabela 6 - Parâmetros de cortes com cortadora a corrente, de acordo com a sua dureza.

Tipo de mármore		Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)
Classificação de Dureza	Nome	
Macio	Comblanchien	12,0
	Peperino	10,0
	Travertino	7,0
Semiduro	Petit Granit	5,0
	Serpeggiante	4,5
Duro	Vila Viçosa	2,0

Fonte: CETEM, 1999.

Na Europa existem casos em que a tecnologia de cortadora a corrente é utilizada com comprimento de braço acima de 4 metros (Figura 58).

No Brasil, essa tecnologia é utilizada no Bege Bahia em Ouroândia (BA) e nos mármore de Cachoeiro de Itapemirim (ES). Na Itália, é largamente empregada em extrações de mármore e em lavra a céu aberto de bancadas baixas, sendo proibitivo para rochas graníticas em virtude do desgaste excessivo das ferramentas de corte.



Figura 58 - Cortadora a corrente de braço alongado. Foto: CETEM/MCTI, 2006.

## 6.2. Técnicas por perfuração e explosivos

A técnica de corte que se baseia na utilização de explosivos carregados em furos dispostos próximos entre si e que definem um plano de corte. Esta tecnologia encontra-se com seu uso muito abrangente e, de certa forma, preferido pela maioria das empresas voltadas à produção de blocos, devido à sua versatilidade e facilidade de execução, inclusive pelos seus custos, normalmente inferiores àqueles de técnicas alternativas, para o caso de pedreiras cuja produção é médio-baixa. Além dos motivos citados anteriormente, a tecnologia de corte através de perfuração e explosivo, tem como característica principal sua fácil adaptação nas mais variadas configurações de projeto de pedra, mesmo quando as bancadas não obedecem a um padrão de regularidade. Como complementação, esta técnica possibilita a realização de trabalhos para a lavra de matacões.

Esta técnica consiste na realização de certo número de furos paralelos cujos eixos coincidem com o plano de corte. Estes furos são carregados, então, com explosivos dosados com uma carga linear extremamente baixa, destinadas a provocar a ruptura da rocha somente entre os furos. Um aspecto de vital importância, principalmente no que se refere à realização dos cortes primários e secundários, reside nos critérios de escolha do tipo de explosivo e no dimensionamento dos parâmetros que vão definir o plano de fogo, de particular modo, o espaçamento entre os furos (de 10 a 40 cm) e a carga linear por furo (de 2 a 10 g/t). O esquema de desenvolvimento desta técnica é normalmente articulado em fases de subdivisões sucessivas. Este procedimento oferece a vantagem de decidir de maneira mais conveniente os planos de cortes secundários e delimitação dos blocos, levando-se em consideração os defeitos presentes nas várias superfícies a serem inspecionadas.

Na Itália, Portugal, Espanha e no Brasil desmontes semelhantes têm sido executados recorrendo principalmente ao cordel detonante. Inicialmente, os equipamentos de produção mecanizada foram usados e permitiram uma melhoria na precisão da linha de perfuração de modo que a carga explosiva ficou mais controlável. Melhoramentos posteriores resultaram do advento de equipamentos de perfuração hidráulica acompanhados por economia de energia e custos de trabalhos. Como resultado, blocos com mais de 1.000 t podem, agora, ser desmontados sem danos à sua estrutura física e os blocos secundários, em torno de 35 t, podem ser efetivamente manejados entre as etapas de operação da lavra.

A experiência nórdica europeia (finlandesa, em particular) é orientada segundo a preferência dos explosivos à baixa velocidade de detonação, ao limite da classe dos deflagrantes, confeccionados em cartucho de pequeno diâmetro de 11 e 17 mm, ligados e centralizados no furo, com relação aos diâmetros internos de 0,3 - 0,5 mm, e fator de desacoplamento variável entre 0,1 e 0,2 mm. A velocidade de detonação é inferior a 4.000 m/s e o desenvolvimento do gás é capaz de promover sobre a superfície controlada uma ação de pressão suficiente para deslocar ou derrubar o volume isolado contra o espaço defronte. A pólvora, por sua vez, é considerada um baixo explosivo, com velocidade de detonação lenta (< 3.000 m/s).

No passado algumas pedreiras preferiam a pólvora negra devidamente dosada, visando romper o bloco sem fragmentação. A direção da superfície de destaque é controlada mediante a criação de uma cava e introdução de uma cápsula de explosivo na fratura ao longo da geratriz diametralmente oposta. Na Itália, vem se generalizando o uso do cordel detonante. O mesmo é considerado um alto explosivo, com velocidade de detonação alta, constituído pelo tetranitrato de penta-critritol (nitropenta), detona com velocidade variando de 6.800 a 7.200 m/s e possui diferentes gramaturas, com a mesma velocidade de detonação: NP-10 = 10g de nitropenta por metro e assim sucessivamente NP-5 = 5g, NP-3 = 3g e NP-2 = 2g. O NP-10 é o cordel que possui a maior energia de choque

e, conseqüentemente, maior capacidade de fraturar a rocha. Dessa forma, normalmente, todos os furos são carregados com um único puxão ao longo da extensão da frente de lavra.

Dependendo das características da rocha, em alguns casos têm sido experimentados esquemas diferentes, consistentes em sequência repetida de furos carregados alternativamente com um único puxão e dois intervalos com furos guias descarregados, deixando inalterados o espaçamento e a quantidade de explosivo. Quando o volume de bancada a destacar é relevante e a espessura excede de 6 a 7 m, a carga linear é aumentada com carregamento duplo. O tiro é sempre simultâneo e pode associar concomitantemente dois e até três planos de destaque. Geralmente acha-se vantajoso associar na operação idêntica os dois cortes principais da bancada, vertical e horizontal, após abertura dos cortes laterais com *flame-jet*.

Foram desenvolvidos, na década de 1990, experimentos instrumentados de modelo de desmonte de rochas em blocos de granitos homogêneos, relativamente grandes, para determinar os efeitos dos resultados sobre as detonações, provenientes da energia dos explosivos (pressão, velocidade de detonação e densidade), bem como os efeitos dos fatores geométricos tal como a distância da carga. Nestes experimentos, verificou-se que a fragmentação por explosão não é controlada por uma única propriedade dos explosivos, tal como a energia, mas por uma combinação de energia com velocidade de detonação, diversidade, grau de acoplamento entre explosivo e a parede do furo, bem como pela velocidade sônica da rocha, fator de potência e geometria da carga.

No decorrer dos experimentos se alertou para os inevitáveis efeitos causados pelos explosivos na detonação quanto à estabilidade de rampa remanescente, em que novas fissuras são formadas e as fraturas já existentes são aumentadas e o material é deixado em uma condição inaproveitável. Não existe uma teoria compreensiva que tenha sido formulada com respeito às detonações. Entretanto, os mecanismos de propagação da onda de cisalhamento, fragmentação e fluxo de gás são suficientemente bem conhecidos para prover fórmulas matemáticas parciais dos vários tipos de detonação, e informação empírica considerável é obtida para ajudar em decisões práticas na frente de lavra.

Os estudos realizados mostram os efeitos da onda de choque emitida e o efeito causado pela expansão do gás pressurizado. Isto produz as duas forças principais na detonação, caracterizada pela presença de uma onda de choque que percorre a coluna de carga com uma velocidade variável, em função do explosivo e das condições de ignição e confinamento. A fase dinâmica de detonação se inicia, justamente, com o aparecimento desta onda de choque percorrendo a coluna de explosivo. A sequência cronológica dos eventos que ocorrem durante o efeito das ondas de choque é basicamente na seguinte ordem: aparecimento das fraturas radiais, reflexão das ondas de choques nas faces livres e retorno das ondas de choque com o aparecimento das fraturas tangenciais.

A técnica mais aplicável à mineração a céu aberto é a de detonação controlada, que é comumente usada para assegurar paredes retentoras de som, e a qual deixa um contorno de corte final perfeito sem nenhum *“overbreak”* ou dano de retorno ao material remanescente. Isto é conseguido deflagrando simultaneamente um número de cargas desacopladas em furos paralelos axialmente perfurados no plano da frente pretendida. A operação é comumente chamada pré-controlada ou pós-controlada dependendo se ela precede ou segue o resto da sequência de detonações.

Pesquisas de detonação controlada realizadas estudaram as ondas de choque e os processos de fragmentação inicial que circunda uma carga detonante. Nestas foram apresentados os resultados dos modelos de explosão em *plexiglass*, com experimentos em rochas para agregados e para fins ornamentais, tendo sido ilustrado a diferença básica entre a detonação de crateras e detonação de bancadas. No experimento ficou evidenciado que o principal efeito da onda de choque no desmonte de bancadas em rochas duras é provocar rachaduras radiais em torno do furo produzido. No

entanto, aquelas já existentes são aumentadas pela onda de tensão que retorna da superfície livre. Estas rachaduras se estendem e o bloco é finalmente destacado sob a influência da pressão do gás no furo produzido. O trabalho feito pelo gás, depois que a onda de choque provoca o destaque é, em grande parte, proveniente da energia total do explosivo que é dependente da densidade da carga.

A detonação controlada é uma técnica criada para fazer o contorno final obtido no desmonte aparecer, como se a rocha fosse cortada com uma faca, deixando o restante praticamente não danificado, sem *“overbreak”*. Através da observação da face criada por esta técnica, pode ser praticamente reconhecida que uma linha de fissura maior é criada de furo a furo os quais foram executados em paralelo no plano projetado da quebra e são poucas as rachaduras nas outras direções.

A tecnologia do corte com cordel detonante foi, por muito tempo, a mais difundida para extração de rochas duras e abrasivas em maciço rochoso, para fins ornamentais, com destaques para a Itália, Espanha e Brasil. No tempo em que a Itália produzia ao norte da Sardenha 10% da produção mundial de granito, o consumo anual de cordel detonante utilizado na extração de blocos em cortes primários e secundários, era equivalente a mais de 12.000 km de extensão. Atualmente, no Brasil, é muito aplicada em cortes de desmonte inicial e no esquadreamento de blocos.

A tecnologia de corte por meio de perfuração e explosivo será ainda utilizada por muito tempo, em função do baixo custo unitário e da flexibilidade operacional, para os casos de rochas cujas características admitam totalmente a aplicação desta técnica. Entretanto, cresce a exigência de oferecer garantias de melhores e mais elevados níveis de produção, segurança do trabalho e integridade do material, principalmente quando o material é destinado ao revestimento de grandes superfícies dispostas verticalmente e, invariavelmente, sujeito a relevantes esforços dinâmicos. Esse aspecto técnico cria margem para o desenvolvimento de tecnologias alternativas, que além de promoverem uma lavra que preserve a integridade do material, melhorem as condições de segurança e higiene do trabalho e ofereçam ainda perspectivas de melhoria e controle dos impactos ambientais (poeira, ruído, vibrações, ondas de sobre pressão etc.), principalmente quando a atividade extrativa desenvolve-se próxima ao centros urbanos.

Para uso desta tecnologia é necessário o uso de perfuratrizes, que realizam furos a distâncias predeterminadas, combinados para criar o corte mediante cargas explosivas. O acionamento das perfuratrizes é feito principalmente por ar comprimido, também existindo no mercado perfuratrizes hidráulicas, em que o fluido de acionamento não é mais diretamente o ar comprimido, mas um fluxo de óleo sob alta pressão (Fig. 59).

Os martelos pneumáticos transmitem a broca percussão e, no intervalo entre duas percussões sucessivas, uma rotação de pequeno arco de círculo. Simultaneamente a esses dois movimentos ocorrem a introdução de ar de limpeza na perfuração.

Os compressores de ar destinados ao acionamento das perfuratrizes podem ser estacionários ou portáteis. São estacionários quando montados sobre bases rígidas e são portáteis quando montados sobre pneus. Podem ser movidos por motor elétrico ou diesel, porém os compressores estacionários, na maioria dos casos, são elétricos, e os compressores portáteis movidos a motor diesel.

Para que ocorra um trabalho efetivo de demolição da rocha e conseqüente desenvolvimento da perfuração é necessário que seja exercido um esforço sobre a perfuratriz. É esse esforço, aliado a percussão e rotação, que faz progredir o furo. O esforço pode ser exercido fisicamente pelo operador, através de martelos manuais, ou mecanicamente por uma corrente ligada a perfuratriz, tracionada no sentido de provocar pressão sobre o equipamento contra a broca e desta contra a rocha, conhecida como talha-blocos.



**Figura 59** - Perfuratriz hidráulica (banqueadora) usada para o esquadrejamento de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

O conjunto talha-bloco é constituído por trilhos, para o deslocamento lateral do suporte, sobre o qual é instalado o martelo, e por quadro de comando, além de lubrificador coligado à tubulação de alta pressão. Este sistema permite a utilização de um ou mais martelos funcionado simultaneamente. O fluido de limpeza pode ser ar ou água. O sistema talha-bloco promove a redução de custos de mão de obra, com aumento da produtividade e uma maior regularidade dos furos realizados. A figura 60 mostra uma máquina talha-bloco (perfuratriz pneumática) esquadrejando blocos.



**Figura 60** - Perfuratriz pneumática. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

### Aplicabilidade das perfurações

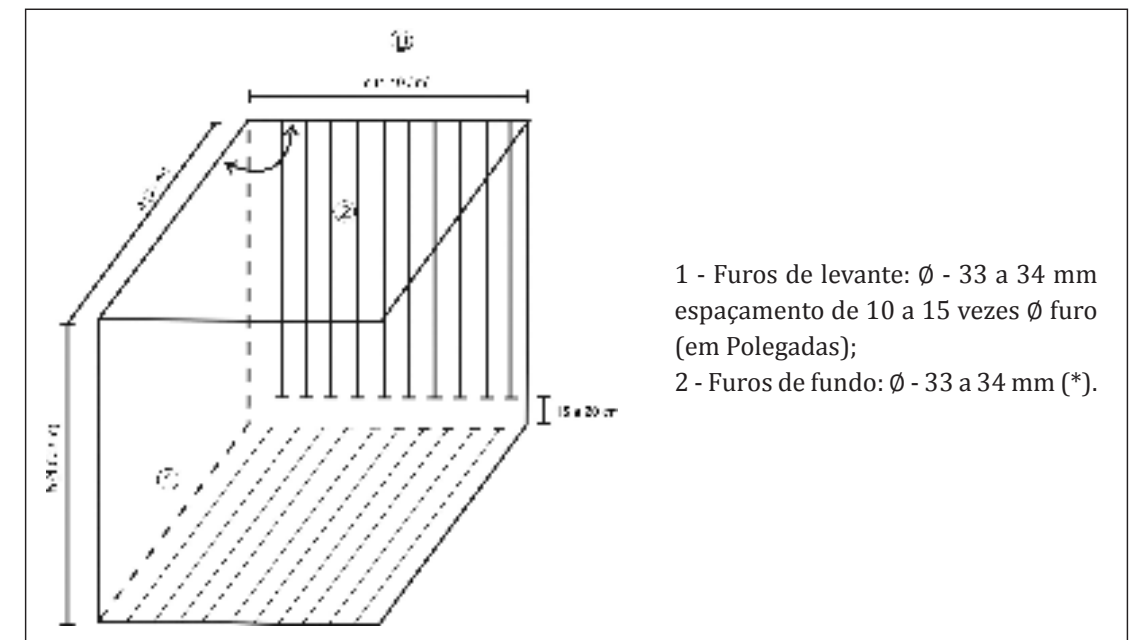
As atividades nas pedreiras de rocha ornamental têm como objetivo final a obtenção de blocos em forma de prisma com volume aproximado em torno de  $8 \text{ m}^3$  a  $12 \text{ m}^3$ . Para tanto são realizadas sucessivas operações de desmonte do maciço rochoso, até se chegar a um bloco com as dimensões desejadas. Em uma primeira etapa de desmonte prepara-se um prisma (painel); para, a partir daí, dar-se o desdobramento do prisma, que nada mais é que a partição do mesmo até a obtenção do bloco padrão.

A perfuração que é realizada para o corte do painel e dos blocos, e que constitui-se em um dos processos de corte não contínuo é feita com a utilização de equipamentos pneumáticos, e a sua precisão (alinhamento, prumo e medida) é fundamental para a determinação da boa qualidade do bloco.

Os furos verticais são chamados furos de bancada, enquanto os furos horizontais são chamados de levante. Os furos de um mesmo plano devem manter um perfeito paralelismo entre si, para propiciar o corte ideal na rocha.

Quando a pedreira ou a jazida já se encontra com atividades de produção e a lavra se desenvolve em um maciço rochoso, os trabalhos são orientados visando a formação de bancadas sucessivas dando uma configuração à pedreira (cava) de anfiteatro (uma grande escadaria).

A produção de blocos de rocha para fins ornamentais requer uma grande quantidade de perfuração. Portanto, o criterioso dimensionamento das necessidades de perfuração, bem como a escolha adequada e a correta utilização dos equipamentos (quanto à operação e manutenção) constituem fatores da maior importância para obtenção das metas de produção com garantia de baixo custo. Nas atividades de lavra, as operações de perfuração podem ser divididas em várias etapas: *perfuração primária*; *perfuração secundária*; e etapa de esquadrejamento ou aparelhamento, que pode ser identificada, também, como *perfuração terciária*, podendo haver outro estágio, que é a perfuração quaternária. Em todas as etapas, os cuidados com o alinhamento e com o paralelismo entre os furos são de grande importância para a qualidade de produção dos blocos. A figura 61 mostra os cortes primários feitos para isolar o quadrote.

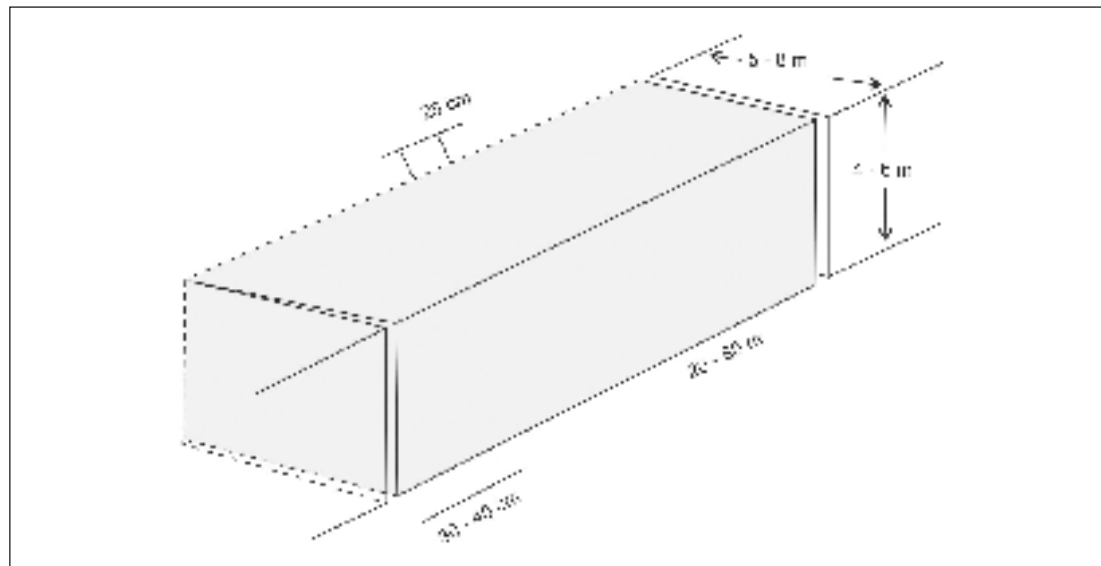


**Figura 61** - Cortes Primários no maciço.

### Tipos de perfuração na produção de rochas ornamentais

**Perfuração primária:** Nesta etapa, o objetivo principal é a produção de blocos (painéis) de grandes dimensões a partir do maciço, podendo chegar às centenas de metros cúbicos, sempre com o cuidado de não danificar a rocha. Neste estágio a principal preocupação é o desenvolvimento das bancadas e a formação das gavetas (Fig. 62). Se não houver orientação da estrutura da rocha, são realizados furos verticais ou de bancadas (podem ter pequena inclinação) e furos horizontais (de levante) com espaçamento adequado (conforme visto anteriormente). Os furos verticais devem terminar em um mesmo horizonte (nível), 15 a 20 cm acima do nível dos furos de levante.

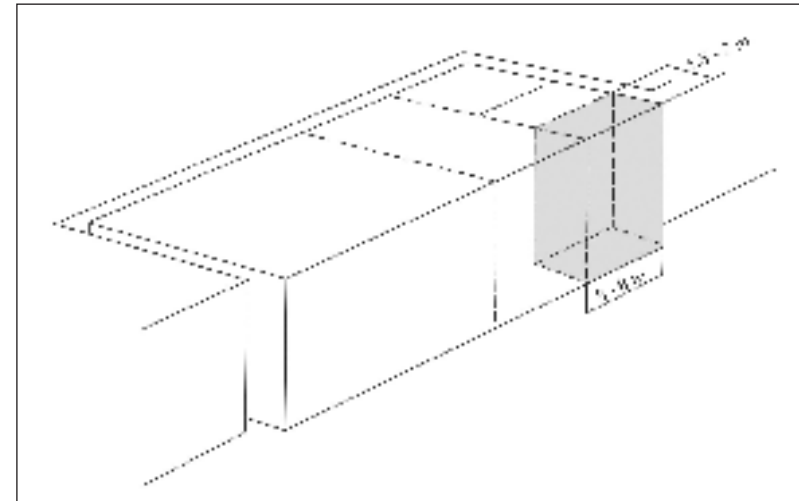
Para realização do desmonte é necessário que as laterais do maciço, no local que vai ser produzido o painel, estejam com alívio. Esse alívio pode ser natural, quando há uma fratura no maciço, ou pode ser produzido por várias técnicas. Pode-se dizer que essa é a fase do processo produtivo que comporta maior grau de mecanização dos trabalhos.



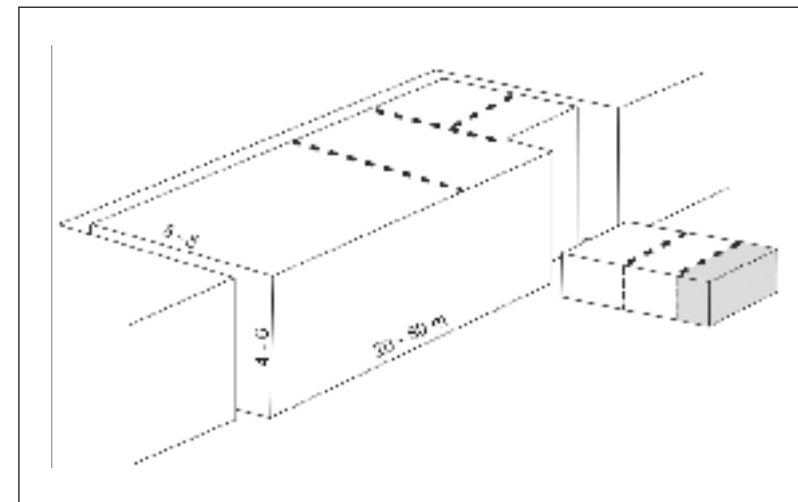
**Figura 62** - Primeiro Estágio/Perfuração Primária. Adaptado de Jimeno, 1996.

**Perfurações secundária, terciária e quaternária:** após a liberação do painel, ocorrida na etapa anterior, tem início a sequência de perfurações e desmontes até se chegar ao produto final que é o bloco com as medidas dentro do padrão de comercialização (figuras 63, 64 e 65). A esta sequência de operações dá-se o nome de desdobramento. São empregadas perfuratrizes de coluna sobre trilhos e perfuratrizes manuais. No último estágio de perfuração recorre-se ao menor diâmetro de perfuração possível, de modo a minimizar as perdas (os blocos são cubados pelas menores medidas); também são utilizadas ferramentas manuais auxiliares (cunhas ou kit quebra pedra, ponteiros etc). Nessas operações, quando necessário o uso de explosivo restringe-se ao cordel detonante.

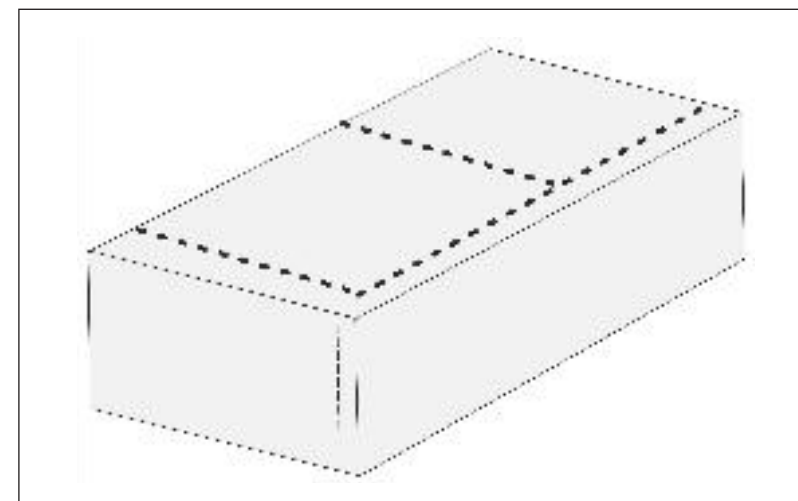
Deve ser dada muita atenção ao posicionamento (alinhamento e nivelamento) e ao travamento das perfuratrizes, não apenas para garantir um bom desempenho do equipamento e assim assegurar a obtenção de um produto de alta qualidade, como também por medida de segurança. Devem ser observadas todas as recomendações pré-operacionais, bem como as técnicas, para operação de cada equipamento.



**Figura 63** - Segundo estágio/Perfuração secundária. Adaptado de Jimeno, 1996.



**Figura 64** - Terceiro estágio/Perfuração de acabamento (para aparelhamento). Adaptado de Jimeno, 1996.

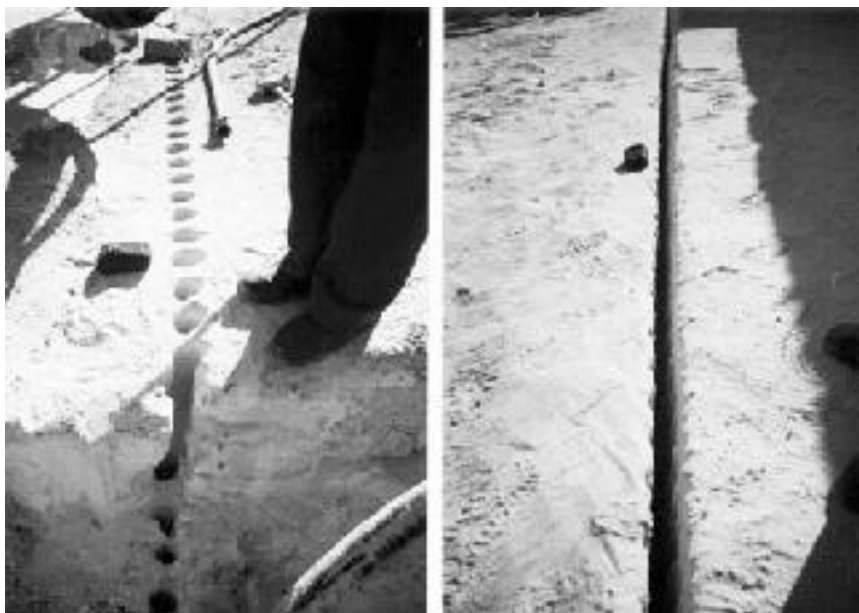


**Figura 65** - Quarto estágio/ Fase de acabamento. Adaptado de Jimeno, 1996.

### 6.3. Tecnologia de perfuração contínua

A perfuração contínua constitui-se em mais uma tecnologia baseada na perfuração sem uso de explosivo e que atualmente apresenta ótimos níveis de eficiência.

Esta técnica comporta a execução dos furos justapostos, de modo tal a obter um plano de ruptura contínuo ou interrompido de aberturas suficientemente fracas, para permitir um fácil destaque por tração (Figura 66). A necessidade de um perfeito paralelismo e com planaridade do furo põe limites evidentes ao longo do comprimento.



**Figura 66** - Detalhe de corte realizado com furos contínuos.

O processo de talho contínuo consiste em dois passos: primeiramente se faz uma série de furos de 64 mm de diâmetro, com espaçamento igual ao diâmetro das furações e, em seguida, o espaço entre os furos é perfurado utilizando bit de 76 mm de diâmetro, obtendo-se uma fenda com aproximadamente 70 mm de espessura.

Esta tecnologia utiliza um equipamento sofisticado e específico para talho contínuo, normalmente em rocha granítica, denominado de “*slot drill*”, que através de rotação contínua e reversível e percussões sobre a broca, promove uma fenda contínua por toda a linha de furos. A rotação reversível facilita a introdução e retirada das hastes, para alongar a broca e retirá-la da perfuração concluída.

Este tipo de perfuração utiliza brocas de extensão, que podem ter seu comprimento aumentado pela adição de hastes, bastando acrescentar uma nova haste rosqueada na última do conjunto já introduzido no furo e prosseguir com a furação.

O bit é o elemento que efetivamente realiza o trabalho de quebra da rocha, sendo calçado com botões de metal duro. Durante a perfuração os botões se desgastam frontal e lateralmente, perdendo sua forma original semiesférica. Portanto, para se manter a velocidade de penetração e a economia no processo, os botões devem ser afiados, quando o achatamento dos mesmos atingir determinados limites práticos (Fig. 67).



**Figura 67** - Bits de perfuração montados nas hastes. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

A tecnologia com furos contínuos apresenta bons níveis de eficiência na abertura de canais, mas o seu emprego é pouco observado nas pedreiras do Brasil, por apresentar um custo x benefício pouco atrativo.

Sua competitividade em relação ao *flame-jet* é bastante evidente nas aberturas de canais, revelando-se extremamente vantajosa. Outra vantagem que apresenta, reside no fato desta representar a solução alternativa ao uso do *flame-jet* nas proximidades de áreas urbanas, ou ainda, quando persistem condições desfavoráveis da rocha, tais como: textura, vitrificação, trincas por superaquecimento, realização de rebaixos etc. Há algumas limitações, em bancadas altas, quando existem irregularidades na superfície de apoio para o equipamento, como é o caso da lavra por painéis verticais.

### 6.4. Técnica de divisão através de cunhas

Uma das técnicas amplamente empregada é aquela que utiliza os dispositivos com cunhas. O emprego de cunhas inseridas em furos alinhados é uma das mais clássicas técnicas de corte, pois desde os tempos da Antiga Grécia, tal prática é utilizada, para provocar a ruptura de uma rocha.

Nas rochas ornamentais, as cunhas são responsáveis pelas operações de subdivisão da rocha de acordo com planos pré-estabelecidos, geralmente, direcionados nos planos preferenciais de orientação dos minerais. Esta técnica de corte é utilizada, principalmente, nas fases finais de recorte e esquadreamento dos blocos ou ainda nas operações de recuperação de blocos na lavra de matacões. Sua limitação encontra-se na execução de cortes em superfícies maiores.

Na Europa (Portugal, Itália e Espanha) a técnica de corte mecânico, através de cunhas, possui emprego principalmente nas operações finais de obtenção dos blocos comercializáveis. Embora esta técnica acarrete irregularidade na superfície cortada, com uma considerável perda no volume vendido, este procedimento possui preferência devido ao seu custo reduzido, até o momento em que o emprego de técnicas mais modernas não lhe retirem a viabilidade econômica. Existem duas tecnologias por meios mecânicos de utilização de cortes de rochas ornamentais através de cunhas: manuais e hidráulicas.

#### Cunhas Manuais

As cunhas manuais, também chamadas de “Pichote”, são constituídas por três elementos a saber: a própria cunha e de duas chapas metálicas (contracunhas) de seção longitudinal em ângulo, entre as quais a cunha é introduzida. Estes elementos quando introduzidos nos furos sob pressão, transmitem uma tensão às paredes dos furos. A sequência desta operação ao longo da linha de furos produz uma linha preferencial de fraturamento, o que conseqüentemente provoca a ruptura do prisma ou do bloco (Fig. 68).

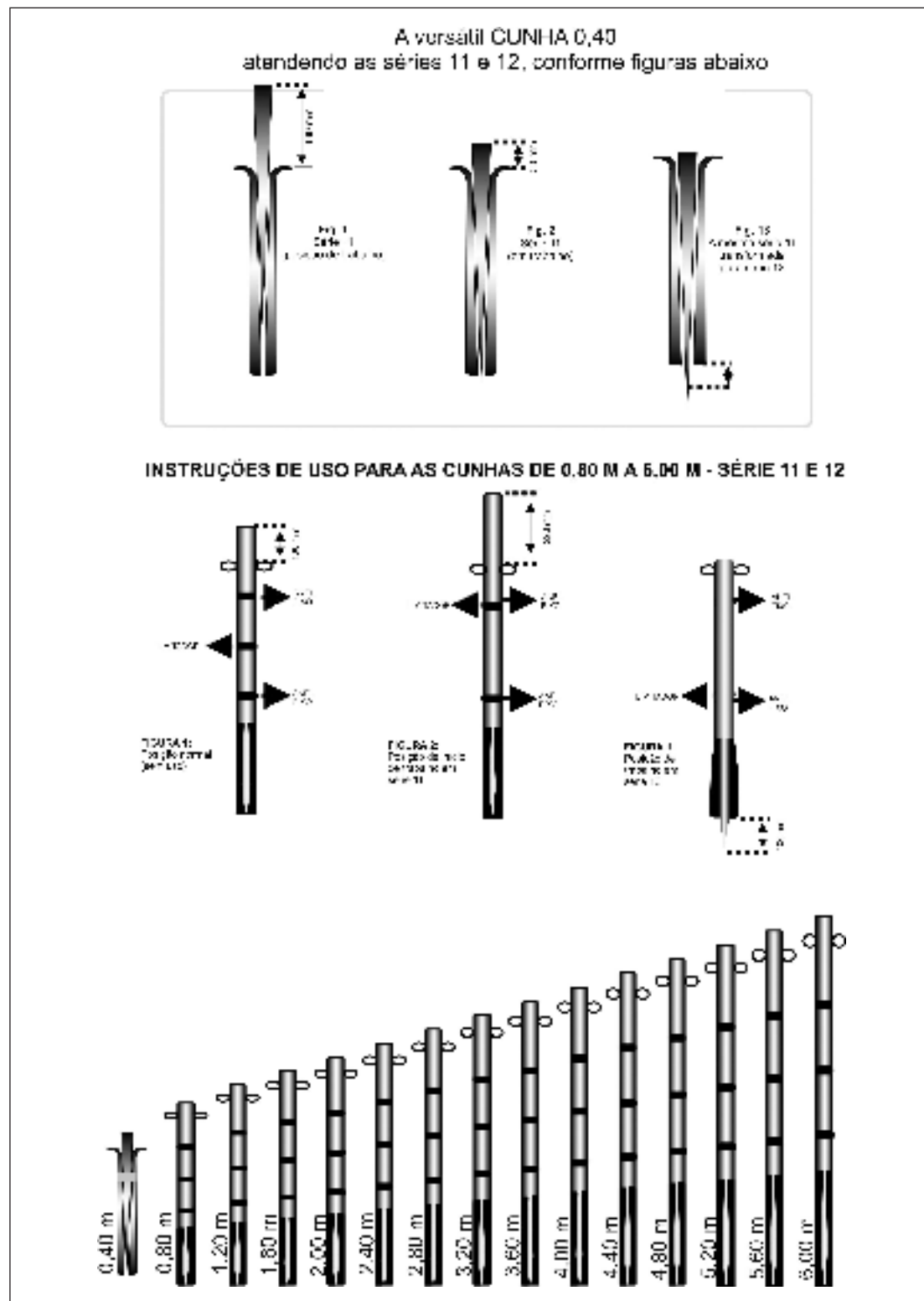


Figura 68 - Instruções de uso para as Cunhas de 0,80 M A 6,00 M – Série 11 e 12.

Existe outro tipo de cunhas manuais, ou seja, as denominadas de: tira fundo, as quais são empregadas em cortes de blocos com grande altura e que apresentam dificuldades de separação ao longo do plano de ruptura previsto. Nestes casos as contracunhas são introduzidas nos furos até uma ter profundidade de tal modo que os esforços à tração no plano de fratura não sejam gerados apenas nas proximidades da superfície (Fig. 69).

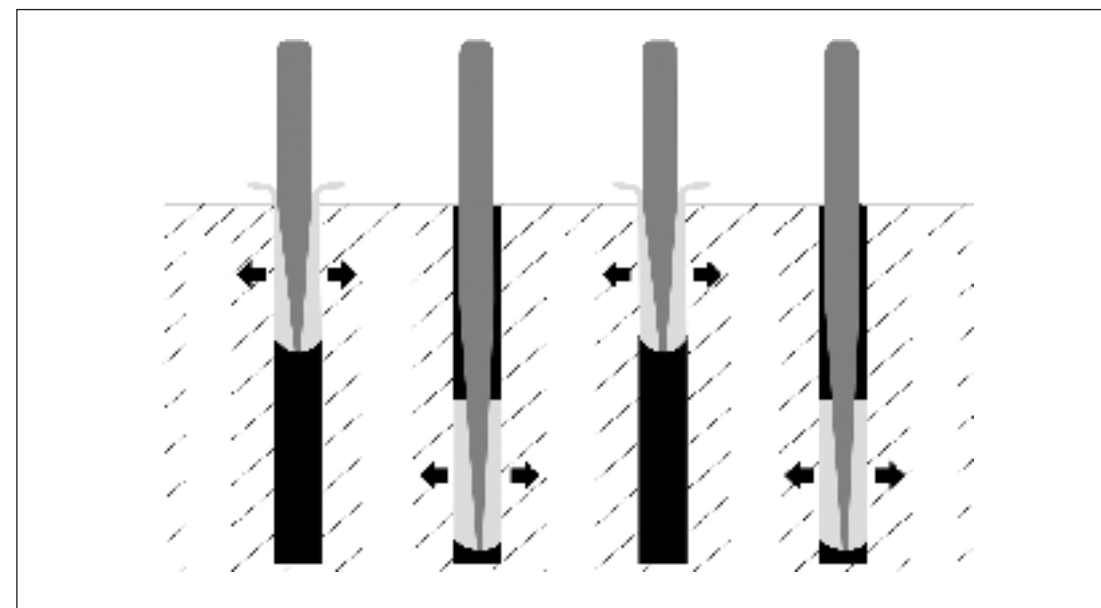


Figura 69 - Cunhas e contracunhas. Elaboração dos autores.

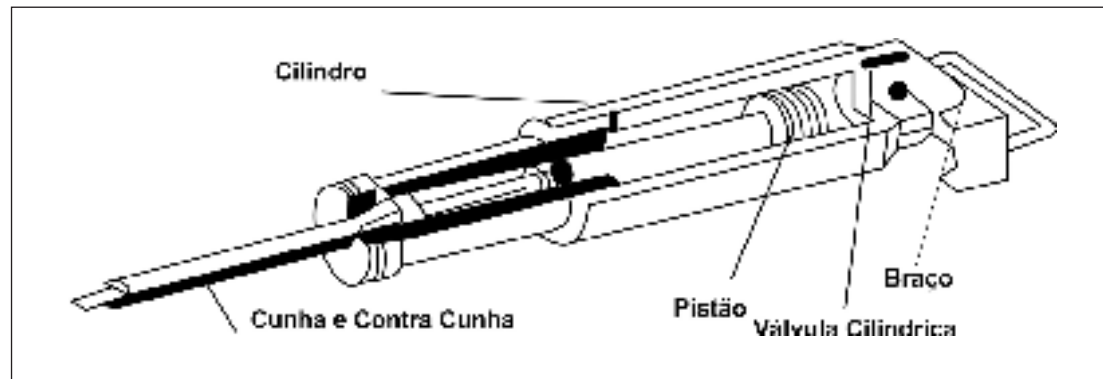
Para facilitar o trabalho das cunhas de modo a que as mesmas possam produzir um plano de corte contínuo e constante deve-se sempre que possível raiar os furos. Raiar um furo nada mais é do que uma operação que consiste em marcar no furo uma linha preferencial de ruptura de modo a que esta seja o mais uniforme possível.

#### Cunhas Hidráulicas

Atualmente também se utilizam às chamadas cunhas hidráulicas em trabalhos de lavra de rochas ornamentais. Basicamente estas cunhas são constituídas por uma bomba hidráulica de alta pressão e por vários cilindros hidráulicos, cada um deles unido a bomba através de mangueiras flexíveis reforçadas de alta pressão, com a bomba sendo acionada por um motor elétrico, ou a diesel, ou pneumático. Cada cilindro é composto de um macaco hidráulico de efeito duplo, que funciona sob uma pressão hidráulica de 50 MPA (Mega Pascal/1 MPA=10 kg cm<sup>2</sup>) e de um conjunto de cunha e contracunha na sua parte inferior. O embolo do pistão ao descer empurra a cunha que se encontra entre as contracunhas na boca do furo, com grande força. Existem no mercado vários tipos de cilindros hidráulicos que possuem forças de ruptura de até 365/t (Fig. 70).

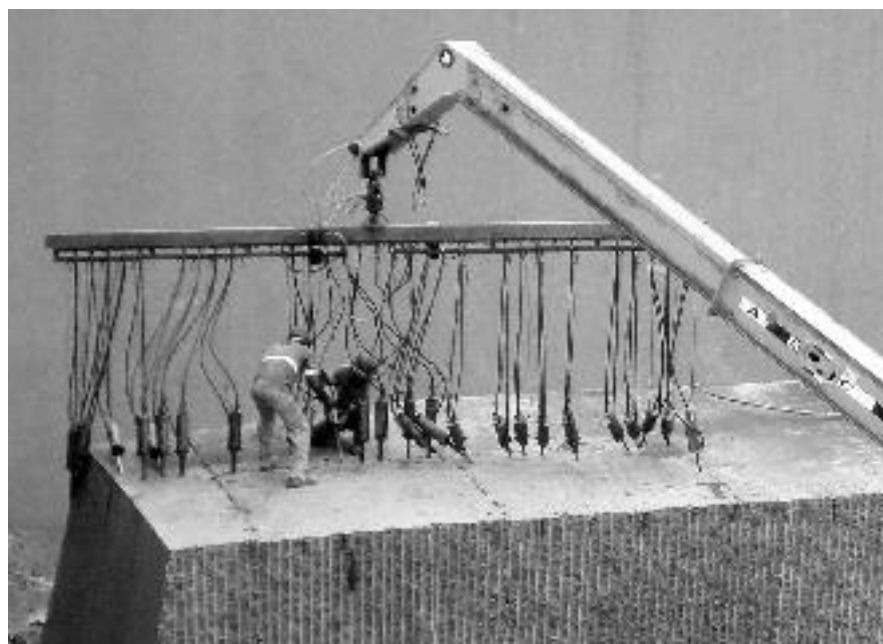
São utilizados dois tipos de cunhas hidráulicas: *Stander* – com ângulo muito agudo, destinadas a rochas mais duras e cuja ação proporciona uma separação relativamente pequena a partir de uma alta força de ruptura e *Para Rochas Medianamente Duras* – com ângulo obtuso, cuja ação proporciona uma separação muito maior que a do tipo anterior (*stander*), a partir de uma força lateral mais baixa.





**Figura 70** - Cunha e contra-cunha hidráulica.

A central hidráulica pode estar locada em uma plataforma de fácil manobra, constituída de um simples chassi feito de tubos e placas de aço, com rodas pneumáticas e acionamento elétrico, a diesel ou a gasolina. Cada central hidráulica pode acionar mais de uma cunha hidráulica, dependendo da potência instalada e da capacidade do tanque do fluido hidráulico. Equipamentos convencionais geralmente podem acionar de uma a oito cunhas. Recentemente foi colocado no mercado um equipamento que pode ser montado em trator ou carregadeira, equipamento este que dispõe de um braço articulado no qual é possível instalar muitas cunhas (Fig. 71).



**Figura 71** - Uso de cunhas hidráulicas montadas em trator com braço. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

As cunhas hidráulicas são fabricadas de acordo ao diâmetro dos furos, ou seja de 24 a 32 mm, com seu comprimento variando de 100 a 400 mm. O peso de cada cunha é da ordem de 8 kg, sendo que cada uma delas trabalha em conjunto a mangueiras de 1,20 m, capazes de suportar pressões de 20 MPA (200 kg/cm<sup>2</sup>).

### 6.5. Técnica de divisão com massa expansiva

A técnica que emprega o uso de agentes expansivos é utilizada no Brasil desde o final da década de 1990, na maioria dos casos, diretamente sobre as painéis e blocos.

No Brasil, este método de desmonte não era utilizado para rochas ornamentais. Neste setor, seu emprego relata pequenos ensaios exploratórios para desmonte de rochas sem a preocupação de preservar o bloco como produto acabado da mina. Entretanto, a partir de 1996, ensaios foram realizados em pedreiras de rochas ornamentais em alguns Estados (Espírito Santo, Bahia e Ceará), e esta técnica mostrou bom resultado no corte de blocos. No entanto para cortes longos de bancada apesar de ter mostrado resultados satisfatórios do ponto de vista técnico, somente tornou-se viável a partir do ano 2000.

Em uso atualmente no mercado nacional, a massa expansiva revolucionou a extração de blocos, contribuindo significativamente para um melhor desempenho operacional nas pedreiras, tanto na extração em maciços rochosos, como na extração de capeados e matacões, e nos mais diversos tipos de materiais, sejam granitos das mais variadas cores e texturas.

Trata-se de um produto em pó com composição química definida em função da temperatura ambiente, e que, antes do uso, deve ser misturado com água, na proporção especificada pelo fabricante. Inserida nos furos, esta massa irá expandir-se liberando espetaculares quantidades de energia, de modo progressivo e gradual, promovendo a ruptura da rocha ao longo da linha de furos.

Para preparação do agente expansivo é necessário apenas um recipiente, com capacidade suficiente para misturar uma quantidade de 10 kg do produto com água, na proporção de 33% em peso, ou seja, 3 litros de água para cada saco de 10 kg dissolvido. O produto deve ser adicionado sempre sob agitação, alcançando-se uma pasta cremosa, fluida e homogênea, sem grumos. Óleo, graxa ou substâncias orgânicas devem estar ausentes no recipiente e na água de mistura. O carregamento deve ser realizado logo após a preparação da mistura, com os furos limpos e assoprados, livre de água e sujeiras (Figs. 72, 73 e 74).



**Figura 72** - Preparação e aplicação de massa expansiva. Foto: José R. Pinheiro, 2003.



**Figura 73** - Carregamento com massa expansiva em furo vertical. Foto: José R. Pinheiro, 2003.



**Figura 74** - Corte de levante efetuado com argamassa expansiva. Foto: José R. Pinheiro, 2003.

A massa expansiva, aplicada ao longo de furos alinhados e devidamente espaçados, exerce nas paredes dos furos uma pressão de expansão, em todas as direções, agindo como um esforço compressivo. As forças dessa compressão induzem reações de tensões trativas, no plano perpendicular àquelas forças compressivas atuantes no plano dos furos, promovendo, desta maneira, a ruptura da rocha por tração.

O tempo de reação, para geração de um corte, varia em função da temperatura ambiente, do espaçamento dos furos, das características petrológicas e mecânicas da rocha, além do seu aspecto textural, e da quantidade e tipo de massa a ser usada. A pressão de expansão exercida pelo produto pode chegar a  $800 \text{ kg/cm}^2$ .

A opção pelo agente expansivo deve-se pela excelente relação custo x benefício que proporciona, ou seja, aumento da produtividade, através de maiores espaçamentos praticados (distância entre furos da mesma linha), com redução dos custos operacionais, além de garantir a regularidade das superfícies cortadas e preservar a integridade físico-mecânica da rocha, obtendo-se como resultado uma maior recuperação de blocos, com diminuição da geração de rejeito.

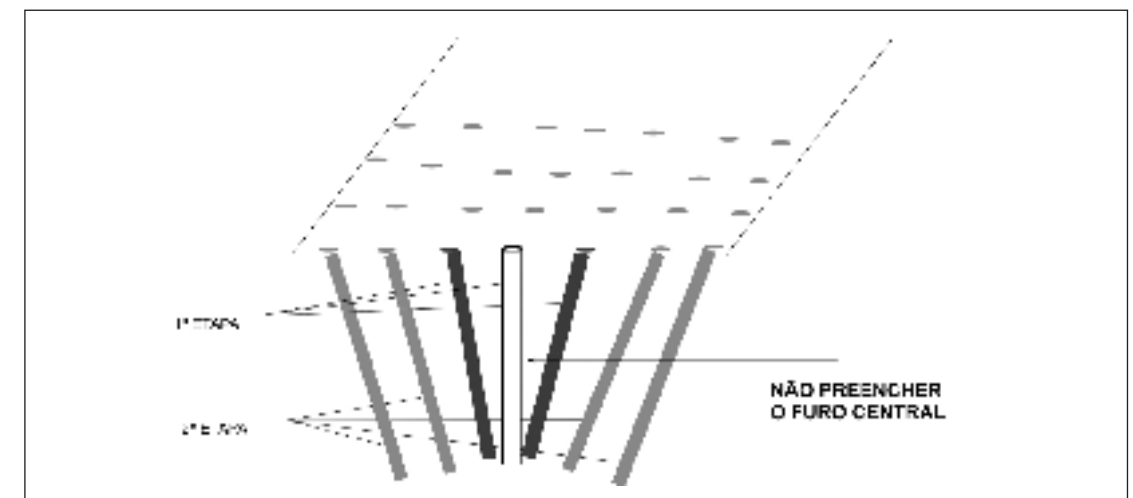
Nas pedreiras de maciço rochoso, a massa expansiva tem sido amplamente consorciada com a tecnologia do fio diamantado, sendo esta última utilizada nos cortes de isolamento de volumes primários de rocha e o agente expansivo empregado no desdobramento de filões/painéis. A viabilidade técnica e econômica deste consórcio é notória.

É uma tecnologia limpa, não poluidora e de fácil emprego, podendo ser destacada a maior segurança dos trabalhadores, comparada ao uso de material explosivo, além de não ser um produto controlado.

A distância entre os furos nos quais se coloca a massa varia em função do diâmetro dos mesmos ou seja de 32 mm a 50 mm e do tipo de material a ser cortado ou demolido. Para a maioria das rochas existentes e para o cimento armado a distância entre os furos varia de 30 a 80 cm em função do diâmetro dos furos.

A seguir será apresentada a aplicação mais comum de uso da massa expansiva, desmonte de bancada em lavra a céu aberto em rocha ornamental. As perfurações de diâmetro aproximado 30 mm podem ser preenchidas de modo alternado, dependendo da resistência da rocha.

O uso de massa expansiva no desmonte de bancadas em processos de lavra a céu aberto em rocha ornamental é um tipo de operação possível de ser realizada com a mesma. Neste caso, contudo, devem ser observadas algumas disposições quanto à inclinação dos furos, segundo o esquema abaixo indicado. Observar que as medidas de espaçamento e afastamento são idênticas. Para rochas graníticas o espaçamento ideal é da ordem de 20 cm, enquanto pra rochas calcárias o espaçamento aconselhável é de 30 cm entre os furos (Fig. 75).



**Figura 75** - Esquema de desmonte com argamassa expansiva. Elaboração dos autores.

## 6.6. Fio helicoidal

A tecnologia de corte por fio helicoidal, aplicada com sucesso no passado em algumas pedreiras norte-americanas e italianas, é considerada hoje obsoleta e encontra utilização ocasional somente em alguns países em desenvolvimento que possuem dificuldades de absorver técnicas de corte mais modernas.

Empregado na realização de cortes primários para extração de mármore desde 1895, o fio helicoidal consiste de três arames de aço trançados helicoidalmente com diâmetro externo de 3 ou 5 mm, responsável pelo transporte de uma mistura abrasiva constituída por areia e água, que atritada diretamente contra a rocha provoca a penetrabilidade do fio na mesma. A areia deve ser bastante silicosa, com granulometria entre 0,5 e 1,0 mm. A polpa abrasiva deve manter uma proporção em peso de 70% de água e 30% de areia. A água age como refrigerador do fio, além de facilitar a circulação do abrasivo.

A partir de meados da década de 1990, no Brasil, grande parte das pedreiras de mármore, principalmente aquelas localizadas no município de Cachoeiro do Itapemirim-ES, buscaram informações tecnológicas, inclusive através de visitas técnicas a países com tradição na extração de mármore, como Itália e Portugal, e, através da análise custo x benefício, substituíram ou estão substituindo o fio helicoidal pelo fio diamantado.

No Brasil, mais particularmente no Estado da Bahia, empresas que exploram o mármore Bege Bahia até pouco tempo atrás ainda utilizavam esta tecnologia, sendo a viabilidade econômica sustentada pelo fato de tratar-se de utilização em rochas macias e com pequena concentração de quartzo, nas quais o corte pode ser feito com relativa facilidade, através do uso de areia quartzosa como elemento abrasivo. Mesmo sendo material macio acabou sendo substituído pelo fio diamantado, com maior velocidade de corte e menor custo operacional. Nas rochas silicáticas, nas quais a concentração de quartzo é nitidamente superior, seria necessário o emprego de carborundo com elemento cortante o que elevaria o custo operacional.

O fio helicoidal baseia-se no movimento, em circuito fechado, de um fio construído por três cabos de aço na forma de hélice, tencionado contra a superfície rochosa a ser cortada (Fig. 76). O fio helicoidal, puxado por um motor, corre através de roldanas a uma velocidade de 10 a 15 m/s e sob tensão de 150 a 250 kg. O plano de corte é orientado através de poços, furos de grandes diâmetro e trincheiras laterais, nos quais se introduz o fio para início do corte. Para a maximização do avanço e resfriamento do fio utiliza-se polpa abrasiva de água com areia. A areia deve ser essencialmente quartzosa e com grãos angulosos, de diâmetro entre 0,1 e 1,0 mm. A mistura da polpa deve manter constante uma proporção em peso, de 70% de água e 30% de areia.



Figura 76 - Uso do fio helicoidal no Mármore Bege Bahia. Foto: CETEM/MCTI, 2007.

O sistema de alimentação da mistura abrasiva é normalmente constituído por dois reservatórios: um com areia e água e outro do qual sai apenas água em quantidade convenientemente controlada, para manter constante o percentagem de sólido da polpa e também uma boa refrigeração do fio. A vazão de água gira em torno de 3 litros/minuto, com alimentação de areia cerca de 2 kg/minuto.

O fio helicoidal é mantido esticado por um equipamento denominado “carro esticador”. Este é uma vagoneta colocada sobre trilhos em um plano inclinado, com uma carga de 2 a 3 t, dotado de uma polia pela qual passa o fio. O devido tensionamento do fio (150 a 250 kg) é necessário, para que este exerça uma pressão mínima sobre o abrasivo contra a rocha, e assim, com o acomodamento da areia no seu vazio helicoidal e, através do seu movimento de translação, o corte venha a ser efetuado.

O conjunto de acionamento do fio helicoidal é composto basicamente de um motor elétrico (10 a 15 hp) a diesel, ligado por correias a uma polia responsável pelo seu movimento de translação, cuja velocidade é de 10-15 m/s.

Após perder o contato com o corpo rochoso, ou seja, sair do corte e retornar, o fio helicoidal passa por um sistema de polias estrategicamente posicionadas, com a função de realizar a completa refrigeração do fio, em contato com o ar. Para tanto, a rede de arame normalmente possui um comprimento considerável, variando de 900 a 1.500 m, conforme a zona de corte (Fig. 77).

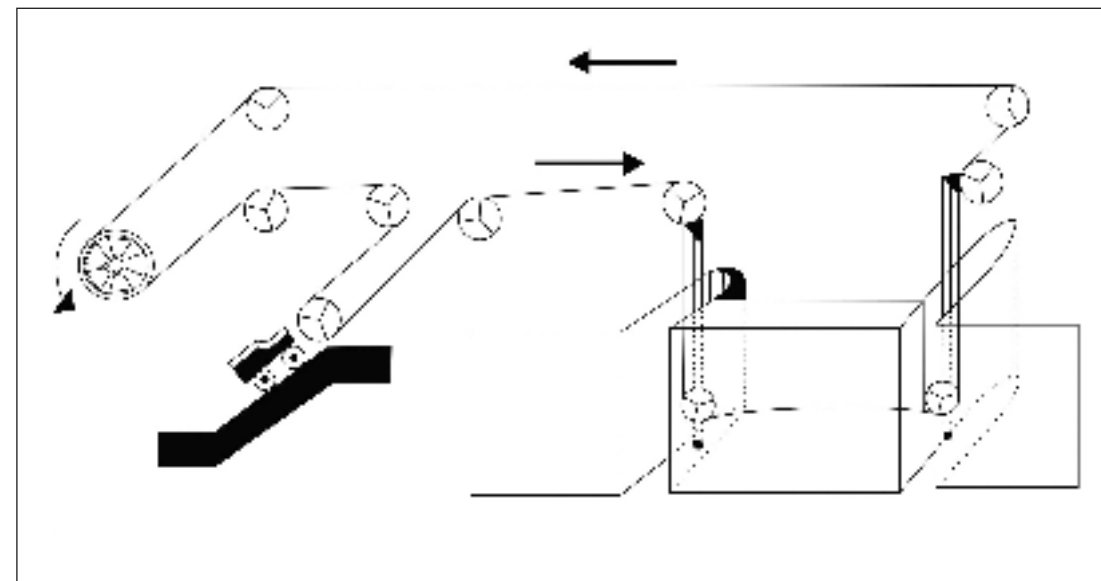


Figura 77 - Esquema da operação de corte com fio helicoidal. Elaboração dos autores.

Devido à baixa velocidade de corte apresentada pelo fio helicoidal (0,5 a 1,0 m<sup>2</sup>/h) associada às dificuldades de controle do mecanismo e com o advento da tecnologia do fio diamantado, as pedreiras de mármore de todo o mundo praticamente o aboliram totalmente. A tabela 7 mostra algumas características de utilização do fio helicoidal nas operações de corte no mármore.

Este tipo de tecnologia foi utilizado por várias décadas nas operações de corte das rochas carbonáticas, até o aparecimento da tecnologia de corte por fio diamantado. As rochas carbonáticas são preponderantemente lavradas com utensílios de corte contínuo, em particular com o fio helicoidal associado ao cortador a corrente diamantada, entretanto, possui limitadas possibilidades de aplicação no caso das rochas silicáticas.

**Tabela 7** - Parâmetros operacionais de corte com fio helicoidal no mármore.

Modalidade Operacional	Parâmetros
Comprimento do fio (km)	1,0 - 4,0
Diâmetro do fio (mm)	3,5 - 5,0
Velocidade periférica do fio (m/s)	6,0 - 18,0
Potência instalada (kW)	10,0 - 40,0
Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)	0,5 - 1,5
Comprimento do corte (m)	10,0 - 20,0
Consumo de água (l/m <sup>2</sup> )	300 - 400
Consumo de abrasivo (kg de areia/m <sup>2</sup> )	100 - 150
Tipo de abrasivo	areia ou carborundo

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari, 1999.

### 6.7. Flame-jet

O *flame-jet* utilizado como tecnologia de corte contínuo, consiste em uma câmara de combustão revestida de material refratário, na qual são inseridos simultaneamente o comburente (ar comprimido = 1.500°C ou oxigênio = 2.500°C) e o combustível (querosene ou óleo diesel) nebulizado que proporciona uma chama análoga àquela produzida pelo maçarico oxiacetilênico. A temperatura de saída do gás varia de 1.200 a 1.300°C, ou mais, no caso da utilização de oxigênio como comburente.

O processo de corte na rocha, isto é, a desagregação, não se obtém por fusão, mas sim pelo fato de a elevada temperatura promover a dilatação dos minerais que, estando em uma situação de confinamento, não pode expandir-se deliberadamente, ocasionando assim, por crepitação, o rompimento de acordo com as superfícies cristalográficas. A aplicação do *flame-jet* é reconhecidamente reservada às rochas plutônicas e particularmente àquelas intrusivas ácidas (granitos) constituídas de minerais com revestimento cristalino completo.

A tabela 8 mostra alguns dados produtivos registrados na utilização do *flame-jet* em rochas graníticas.

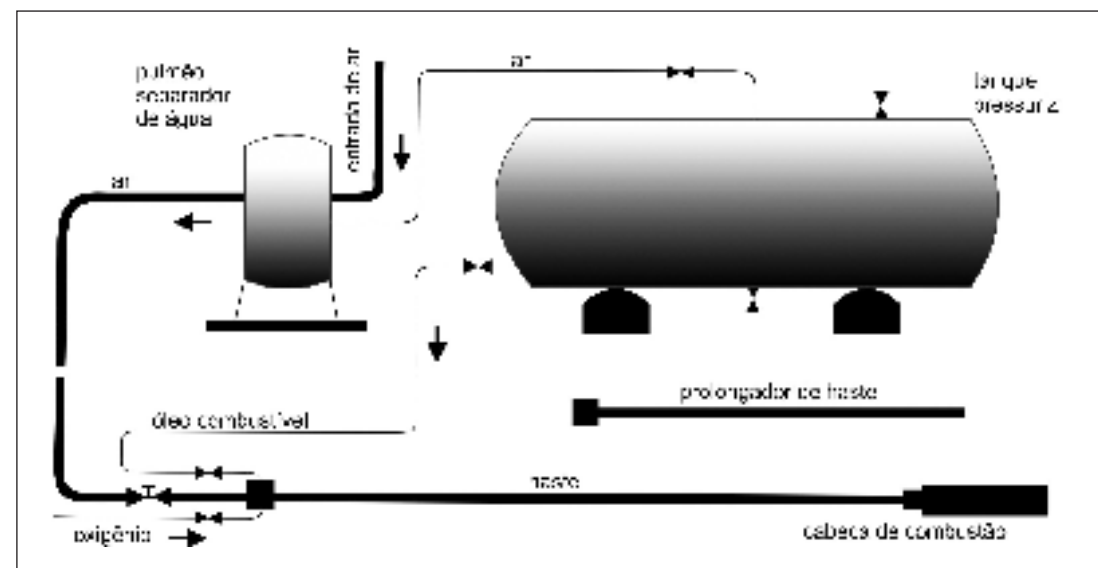
**Tabela 8** - Parâmetros técnicos e operacionais de corte com *flame-jet* nos granitos.

Modalidade Operacional	Parâmetros
Temperatura da chama (°C)	1500 - 2500
Largura do corte (cm)	10
Avanço do corte por passadas (mm)	6,0
Velocidade de corte (m <sup>2</sup> /h)	0,5 - 1,5
Inclinação (graus)	60
Consumo de ar comprimido (m <sup>3</sup> /min)	10
Pressão do ar comprimido (MPa)	0,85
Consumo de combustível (m <sup>3</sup> /h)	0,045

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari, 1999.

Tecnologia utilizada para o isolamento de volumes primários de rocha granítica (cortes verticais e horizontais). O sistema de corte por *flame-jet* consiste na abertura de uma fenda com espessura de 10 cm, largura e comprimento variável, através da chama térmica do maçarico (1.500°C), que provoca na rocha uma dilatação diferencial dos minerais, que estão sob a ação do calor, sendo expulsos sob a forma de cavacos.

O *flame-jet* funciona a base de ar comprimido (vazão de 250 c.f.m.) e óleo diesel (consumo de 35 litros/hora). Utiliza reservatório de óleo pressurizado e é composto de gaste e cabeça de combustão (Fig. 78). O *flame-jet* requer um operador para realizar o corte de maneira contínua. Assim, a precisão do corte depende muito da habilidade do usuário. A velocidade média de corte nos granitos brasileiros varia de 0,7 a 1,0 m<sup>2</sup>/h. Obtêm-se maior sucesso com esta tecnologia em rocha com alto teor de quartzo e pequena incidência de biotita. Podemos citar o baixo investimento inicial como grande responsável pelo seu emprego até os dias de hoje.

**Figura 78** - Esquema de funcionamento do *flame-jet*.

O que limita o uso da chama térmica são as desvantagens que apresenta, tais como: elevado custo operacional, devido a baixa velocidade de corte e ao elevado consumo de óleo diesel; danificação na rocha, com incidência de microfaturas em até 30 cm nas laterais do corte, dependendo do tipo de rocha, provocando numa diminuição na recuperação de blocos; restrições para utilização em alguns tipos de granito; e acentuado impacto ambiental, com geração de barulho excessivo (130 a 140 decibéis) e produção de gás e poeira.

Embora esta tecnologia ainda seja largamente difundida nas pedreiras de granito, suas perspectivas futuras de utilização ficam comprometidas pelas desvantagens apresentadas. Atualmente vem sendo substituída progressivamente pelo fio diamantado.

Esta técnica foi experimentada com sucesso nos Estados Unidos, no taconito de Minnesota. Nas pedreiras mais modernas, o *flame-jet* é utilizado apenas para cortes cegos de abertura lateral das bancadas. A técnica só pode ser aplicada em rochas silicáticas e preferencialmente homogêneas, pois o corte é promovido através de dilatação térmica diferencial, por crepitação dos silicatos e, sobretudo, do quartzo. Concentrações de minerais máficos e vesículas de quartzo, que caracterizam heterogeneidades texturais, podem sofrer vitrificação e prejudicar o corte. Através da lança que suporta o bico de chama, executam-se cortes com até 8 m de profundidade, sendo de 8 a 10 cm a espessura do corte. Pela ação do calor ficam prejudicadas as duas bandas laterais ao corte, havendo assim perda de uma faixa com espessura variável entre 10 a 30 cm (Fig. 79).



**Figura 79** - Emprego do *flame-jet* na realização de corte horizontal. Foto e desenho: CETEM/MCTI.

A introdução do *flame-jet* nas pedreiras de granito ofereceu a possibilidade de solucionar satisfatoriamente o problema da abertura de canais e rebaixos. Entretanto, é uma tecnologia ultrapassada. Embora seja ainda utilizada pelas empresas que visam uma utilização imediata a baixo custo, as perspectivas futuras ficam condicionadas a diversos fatores, como por exemplo: o alto custo operacional (combustível), limitações de uso em função da característica da rocha (anomalias, veios, falhas e fraturas), impacto ambiental acentuado (ruídos, produção de poeira tóxica), necessidade de vínculos organizacionais (espaços amplos para seu desempenho excluindo a possibilidade das demais operações na mesma área).

Os problemas de aplicação do corte com *flame-jet* relacionam-se ao alto nível de ruído (130 a 140 dB), calor e produção elevada de pó. Na Europa, os custos operacionais abrangendo equipamentos, combustíveis e mão de obra são da ordem de US\$ 100.00/m<sup>2</sup>.

Em uma avaliação do setor extrativo do Brasil, enfocando os granitos, através de análises das jazidas e/ou minas, nos seus mais diversos aspectos de tecnologias de lavra utilizadas nas pedreiras do país, destaca-se a tecnologia de corte por *flame-jet* como sendo hoje uma tecnologia obsoleta, a qual os empresários ainda apreciam e utilizam, devido à simplicidade da sua utilização e o baixo investimento para aquisição do equipamento mas, não observam as perspectivas futuras e os seguintes fatores: elevado custo energético, as limitações ou dificuldades de emprego correlacionadas às características da rocha (diferenciações mineralógicas anômalas, veios, falhas e fraturas), a irregularidade das superfícies produzidas, os danos no material, algumas vezes, em grandes extensões, o elevado impacto ambiental e a introdução de mudanças organizacionais nos ciclos de trabalhos de lavra, em virtude da necessidade de amplos espaços para o seu uso, impedindo outras operações na área interessada do corte.

## 6.8. Jato d'água

A tecnologia de corte com jato d'água a alta velocidade, *water-jet*, pode ser considerada como um dos maiores avanços nos campos de corte e desmonte de materiais em virtude de sua flexibilidade e eficiência. Esta aplicação tem sido estendida rapidamente a outros ramos da indústria (VIDAL, 1999).

Na engenharia de minas, a energia hidráulica foi primeiramente usada para escavar rochas macias, usando monitores de baixa pressão. Com o advento da tecnologia de alta pressão começou ser usada a tecnologia *water-jet* para rochas mais duras, abrindo uma nova era na mineração. Posteriormente, seu uso foi ampliado pelo desenvolvimento de jato abrasivo, especialmente para cortes de precisão. Ciccu (1993), com particular referência à rocha ornamental, concluiu, com base nos resultados das investigações de laboratório e julgamento de campo, que o corte com *water-jet* era viável e seguro comparado ao de *flame-jet* e mesmo ao desmonte com explosivos, com vantagens adicionais em termos de engenharia de segurança, automação e impacto ambiental. Sua aplicação na indústria mineral começou na década de 1960 em países como Alemanha, Rússia, Polônia, Inglaterra, China e Estados Unidos, para o desmonte em vários tipos de depósitos minerais.

Os primeiros testes em pedreiras de granito ornamental foram realizados no distrito de Elberton (Georgia, EUA) na década de 1970. Nessa década e na seguinte, diversas empresas e instituições de pesquisa trabalharam no desenvolvimento de sistemas de corte de rochas ornamentais com jato d'água, cujos principais problemas eram o desgaste dos bocais e as bombas necessárias. Em 1984, a Universidade de Missouri-Rolla (UMR) reproduziu o complexo megalítico de Stonehenge em seu campus, utilizando exclusivamente *water-jet* para cortar o granito utilizado. Hoje esta tecnologia é pouco utilizada na extração de blocos, sendo aplicada apenas em algumas pedreiras de granito, nos Estados Unidos e de arenito, na França.

O jato d'água de alta pressão é aplicável para rochas com textura sacaroide, do tipo granular ou granuloblástica. O corte se processa por arranque (escarificação) dos grãos, desagregando a rocha no plano desejado (SUMMERS, 1989). Pesquisadores estudaram a caracterização minero-petrográfica de algumas amostras de granito americano, submetido a ensaios de corte com a tecnologia *water-jet*, e observaram que a dimensão média do grão e a presença de fissuras nos contatos intergranulares são as características de maior influência sobre a desagregação da rocha estudada (AGUS et al., 1990). Bortolussi (1993) estudou a dependência do mecanismo de corte com jato d'água em relação à porosidade, em um granito de granulação fina da região da Sardenha (Itália) e verificou, para o material estudado, que existe uma boa correlação entre o resultado do corte e os dados relativos à porosidade. Encontrou uma relação do tipo quadrática entre a velocidade superficial de corte e a porosidade relativa aos poros de dimensão inferior a 1 mm.

A experiência industrial para o corte de rocha, tipo granítica, recomenda uma pressão do jato d'água da ordem de 70 a 270 MPa, sendo a precisão e rendimento proporcionais à pressão. Este tipo de corte aplicado para rochas mais cristalinas, como quartzitos, necessitará de mais altas pressões, até 400 MPa.

O sistema de corte é composto por um conjunto de bombas hidráulicas e motor de alimentação, de alta pressão, de uma haste que sustenta o bico injetor e de uma estrutura de suporte e movimentação. A estrutura de suporte serve também como guia da haste e tem a função de regular os movimentos que devem ser executados, uma vez que o corte é realizado por passadas sucessivas (ALENCAR et al., 1996). O jato de água filtrada e pressurizada sai por uma ponta de diâmetro de 0,5 a 1 mm e, para a execução do corte, deve se manter uma distância do bico de jato até a rocha de 2 a 10 cm (CICCU, 1992).

O jato d'água, mediante o movimento oscilatório da ponta, abre canais na rocha que permitem a penetração da haste até o fundo e seu posterior movimento transversal ao longo do plano de corte. As tabelas 9 e 10 apresentam alguns valores de velocidade de corte e energia específica, em função do diâmetro do bico e da pressão da alimentação, na aplicação da tecnologia do *water-jet*, para corte de rocha ornamental.

**Tabela 9** - Parâmetros da velocidade de corte em função do diâmetro de saída, para diversas pressões de trabalho (69, 138, 207 e 276 Mpa).

Diâmetro (mm)	VELOCIDADE DE CORTE (m <sup>2</sup> /h)			
	69 MPa	138 MPa	207 MPa	276 MPa
0,254	0,03	0,05	0,08	0,10
0356	0,06	0,11	0,16	0,21
0,508	0,13	0,24	0,34	0,44
1.016	0,55	1,04	1,50	1,95
1.270	0,89	1,68	2,43	3,15
1.524	1,32	2,48	3,59	4,66

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari. Extraído de Alencar *et. al*, 1996.

**Tabela 10** - Valores de energia específica em função do diâmetro de saída, para diversas pressões de trabalho (69, 138, 207 e 276 Mpa).

Diâmetro (mm)	ENERGIA ESPECÍFICA (kW/m <sup>2</sup> /h)			
	69 MPa	138 MPa	207 MPa	276 MPa
0,254	88	97	170	200
0,356	84	127	161	191
0,508	80	121	153	182
1,016	72	109	139	164
1,270	70	105	134	159
1,524	68	103	131	155

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari. Extraído de Alencar *et. al* (1996).

Algumas vantagens da técnica com *water-jet* residem em seu menor impacto ambiental pela redução de poeira e resíduos, na segurança dos trabalhadores e na evidente redução do custo operacional de mão de obra que significa a principal incidência das outras técnicas, com exceção do *flame-jet*. Embora devam ser controlados rigorosamente os parâmetros operacionais, como pressão e vazão d'água, velocidade rotacional dos jatos, velocidade de translação etc., isto é hoje feito com equipamentos computadorizados, de forma que não é necessário manter um operador dedicado ao equipamento durante o corte.

A grande vantagem é a seletividade da tecnologia que permite extrair blocos diretamente do maciço, em qualquer local e em qualquer direção de corte, com auxílio de suportes simples. Isso significa que podem se alcançar taxas de recuperação, na pedreira, próximas aos 100%, com grandes benefícios ambientais.

Com tais condições, estimava-se no final do século XX, que a tecnologia *water-jet* seria, nas pedreiras a céu aberto a mais utilizada hoje, porém, por diversas razões isto não aconteceu. Acreditamos que o principal motivo tenha sido o desenvolvimento do fio diamantado que permite produções em grande escala, inatingíveis com jato d'água. Outro motivo pode ter sido, além do alto investimento inicial, o alto custo energético do *water-jet* para obter as pressões necessárias para os cortes e o custo de manutenção, também elevado.

Por outro lado, a flexibilidade e seletividade do jato d'água podem ser muito úteis no futuro, especialmente em ambientes subterrâneos, onde o uso desta tecnologia eliminaria a necessidade de remoção de estêreis, dentre outras vantagens.

A tabela 11 mostra alguns parâmetros operacionais da tecnologia *water-jet* em algumas pedreiras de granito dos Estados Unidos, Canadá e França (ALENCAR *et al.*, 1996).

**Tabela 11** - Parâmetros operacionais em pedreiras de granito com *water-jet*.

Pedreira (Localidade)	Potência (kW)	Pressão (Mpa)	Vazão (l/min)	Vel. de corte (m <sup>2</sup> /h)
Colorado (USA)	30	310	7	1
Georgia (USA)	130	100	60	1,20 – 2,5
S. Dakota (USA)	115	100	41	1,5
Québec (Canadá)	150	138	76	1,7
França	280	240	60	1,5

Fonte: DIGITA - Universidade de Cagliari. Modificado de Alencar *et. al*, 1996.

## 6.9. Aplicação da tecnologia mista

A lavra das rochas ornamentais, em particular o granito, geralmente é feita utilizando combinações de diversas tecnologias com o objetivo de maximizar o resultado econômico e conferir a necessária flexibilidade ao ciclo produtivo. No entanto, considerações a critério de racionalidade sugerem o emprego de métodos mais destrutivos, como aqueles baseados no uso de explosivo e do *flame-jet* para a execução dos cortes primários, no que se refere ao destaque da bancada de grande volume, deixando os outros métodos para a subdivisão sucessiva e em particular as operações de retalho e esquadreamento dos blocos. Parece não muito lógico, por exemplo, utilizar o *flame-jet* como uma técnica única para extração direta dos blocos do maciço, enquanto que a proporção do volume utilizável, levando em consideração a extensão da zona danificada, resulta dessa forma inaceitável. Analogamente, sabe-se que é aconselhável evitar o uso do explosivo para subdivisão de volumes inferiores de 40 a 50 m<sup>3</sup>.

Considera-se pouco racional utilizar tecnologias caracterizadas de elevada precisão (fio diamantado e "*water-jet*") para os cortes primários, deixando a qualidade das superfícies do bloco final com o uso de técnicas mais grosseiras, como aquelas baseadas na perfuração para a etapa de acabamento sucessivo. Vale ressaltar que o estabelecimento e a gestão da lavra, bem como a escolha tecnológica, dependem de fatores de natureza diversa (característica da jazida, condições, topografia do lugar, posição geográfica, área para operação, meio ambiente etc.) que possam orientar a escolha versus soluções diferentes.

O processo produtivo mais frequentemente utilizado consiste no emprego em etapas sucessivas de extração e subdivisão, respectivamente ao destaque do maciço em bancadas de volumes de

rocha da ordem 500 a 2.000 m<sup>3</sup> e o corte em painéis de 50 a 100 m<sup>3</sup>. A seguir, o retalho final dos blocos de volumes de 8 a 15 m<sup>3</sup>. Nos cortes primários e secundários da abertura da frente de lavra é utilizado o fio diamantado. A subdivisão da bancada em fatias pode ser também executada com explosivo leve como o cordel detonante, mas parece preferível recorrer aos dispositivos de massa expansiva e cunhas para não produzir danos e ter um melhor aproveitamento do material.

Os blocos obtidos por meios das tecnologias tradicionais, invariavelmente, apresentam-se com suas faces rugosas, de acordo com a técnica utilizada. Este aspecto incide negativamente sobre o volume comercial do bloco. As dimensões tomadas correspondem ao menor lado de cada face, que por sua vez, vem descontado geralmente de 5 cm e, portanto, o paralelepípedo inscrito possui um volume muito inferior ao correspondente de todo o bloco. O volume de rocha desprezado, de acordo com o valor de mercado aplicado, pode assumir em alguns casos um valor econômico considerável. O procedimento de valorização se reflete nas operações sucessivas onde a irregularidade do bloco incide desfavoravelmente a começar do transporte que é medido por peso. No caso de um melhor nível de acabamento dos blocos, pode-se minimizar tais problemas que poderão refletir diretamente na fase de serragem e polimento.

Com base na experiência obtida nestes últimos 20 anos, sugere-se a utilização da tecnologia de fio diamantado em substituição a perfuração descontínua com explosivo e *flame-jet* na extração de granito de elevado preço comercial. Em caso de granito de baixo valor comercial, isto também é justificado quando são necessários cortes de áreas maiores para o desmonte de grandes volumes. Atualmente os custos elevados são facilmente amortizados, quando o emprego de tecnologia de fio diamantado implica no aumento da recuperação na lavra se tornando superior ao custo do corte (VIDAL, 1999).

## 7. Técnicas de tombamento de painéis e movimentação de blocos

A atividade extrativa de rochas ornamentais, além dos equipamentos principais de corte empregados na tecnologia de lavra, necessita do emprego de máquinas robustas para auxiliar no processo de obtenção do bloco – produto de pedreira. As máquinas funcionam nas diversas operações das etapas de lavra a seguir:

- Obtenção de painéis e blocos da pedreira, e movimentação dos rejeitos;
- apoio a movimentação de blocos para carregamento, ou para corte em monofio na pedreira.

Como se sabe, as principais operações produtivas de uma pedreira de rocha ornamental se destacam as tecnologias de perfuração, corte e desmonte. Entretanto, existem outras operações, não menos importantes, essenciais e complementares, que utilizam equipamentos específicos, bem como ferramentas e acessórios adequados. São as operações de movimentação de carga (tombamento, estocagem e carregamento de blocos/remoção de estéril e rejeitos) e acabamento (aparelhamento) dos blocos.

### 7.1. Tombamento de painéis

O tombamento de painéis e a movimentação de blocos são etapas de operação da lavra que se iniciam uma vez isolados os filões do maciço. Os filões são tombados em “camas” constituídas, na sua maioria, por solo e fragmentos de rocha, previamente preparados com o objetivo de amortecer o impacto de queda. Do filão tombado, também chamado painel, são esquadrejados os blocos.

Geralmente, para o tombamento desses volumes de rocha previamente isolados do maciço, são utilizadas ferramentas ou dispositivos de equipamentos constituídos por:

### Macaco hidráulico e braço extensor de bancada:

Este tipo de macaco hidráulico funciona com um cilindro hidráulico que é acionado mediante uma central móvel que permite acionar simultaneamente dois ou mais cilindros de diferentes tamanhos.

A operação consiste em colocar os cilindros entre o maciço rochoso e o painel ou bloco obtido no corte, através da realização de dois pequenos furos para início da operação. Uma vez que a mudança começa, desliza um dos lados do cilindro através do recorte ampliado, dando continuidade ao impulso para alcançar a reversão completa do bloco. A figura 80 mostra o macaco hidráulico empurrando o painel para o tombamento.



Figura 80 - Macaco hidráulico. Foto: José R. Pinheiro, 2003.

Este equipamento é adequado para empurrar painéis ou blocos com uma base de 2,8 a 3 m de largura e altura de 9 e 10 m, respectivamente. Para blocos maiores pode ser utilizado o braço extensor (Fig. 81).

A maior ou menor altura do painel ou bloco não influencia o esforço de despejo, ele sempre será maior do que a largura da base, pelo menos 150%. Caso contrário, o painel deslizaria em vez de tombar.

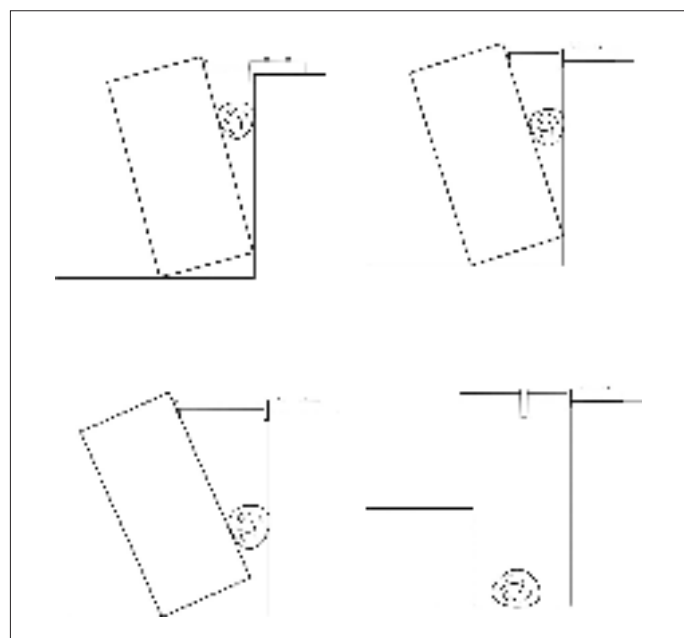
Assim, para um painel de 3,2 m de largura e 6 m de altura, o comprimento máximo para que se consiga o tombamento com o menor macaco hidráulico é de 8m.



**Figura 81** - Braço extensor.  
Extraído de DyD, 2013.

Na figura 82 é mostrado um esquema com as etapas de funcionamento deste equipamento.

1. Expansão do braço mecânico para empurrar o painel até 0,80 m, depois colocar uma pedra na abertura.
2. Retração do braço mecânico à posição inicial para instalação de um prolongador de 0,70 m.
3. Expansão do braço mecânico para conseguir um afastamento do painel de 1,50 m; depois a retração do braço e posterior do prolongador de 0,70 m por um de 1,40 m.
4. Expansão do braço mecânico para conseguir uma abertura de 2,10 m. A operação anterior será repetida até o terceiro prolongador que permite uma abertura de 2,80 m e em consequência disso o tombamento do painel.



**Figura 82** - Tombamento do filão. Elaboração dos autores.

Para que o macaco hidráulico não caia na abertura durante a operação, quando se quer tombar painéis com mais de 2,0 m de largura, é necessário que o equipamento seja fixado ao terreno, uma vez que o braço com os prolongamentos é mais pesado que o cilindro hidráulico.

### Colchão inflável

O colchão inflável consiste em uma almofada metálica ou de outro material que se introduz no corte posterior do filão para empurrar o painel. Para cada painel colocam-se vários colchões que são, depois, preenchidos com ar comprimido ou água aumentando seu volume e produzindo a separação do filão antes isolado.

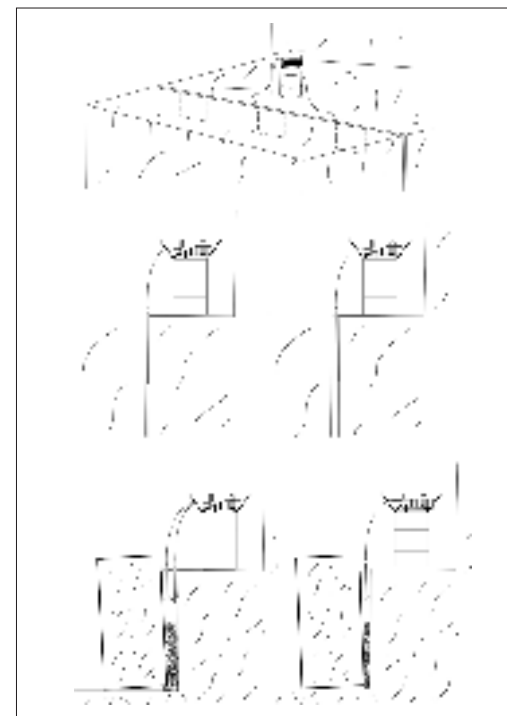
Os colchões infláveis hidráulicos são acionados por meio da injeção de água, e são conectados a uma central acionada por um motor elétrico que permite o uso de três ou mais colchões.

Normalmente as dimensões são 100 x 100 cm, com uma espessura inicial a 4 mm e um peso de 8 kg. Sua constituição é totalmente metálica.

Os colchões são preenchidos com água a 3,0 Mpa de pressão, fornecendo um empurrão de 300 t por colchão e um deslocamento de 20 cm. A espessura dos colchões infláveis é perfeita para que o colchão seja colocado no interior do corte produzido pelo fio diamantado ou cortadora de braço.

Já os colchões infláveis pneumáticos trabalham com a injeção de ar comprimido na faixa de 0,3 a 0,8 Mpa de pressão e possuem uma pressão de ruptura de 3,0 Mpa. A constituição dos colchões pneumáticos é mais complexa, e são fabricadas com neoprene e armadas com uma malha de cabo de aço. Seu peso é, portanto, superior aos colchões infláveis hidráulicos, estando entre 19 e 40 kg. Tem espessura entre 2,5 e 3 cm, com deslocamento de 41 a 52 cm, e um empurrão de 42 a 60 t.

O preço dos colchões pneumáticos são muito mais elevados quando comparados com os hidráulicos. A operação dos dois equipamentos é a mesma. Os colchões são introduzidos não inflados nos cortes previamente feitos por fio diamantado, cortadora de braço. Sua pequena espessura permite que os colchões sejam introduzidos e deslizem sem dificuldade através dos cortes. Uma vez dentro dos cortes, são preenchidos com ar comprimido ou água de modo que se consiga fazer o tombamento do painel com pode se ver nas figuras 83 e 84, a seguir:



**Figura 83** - Fluxograma esquemático da utilização do colchão inflável.





**Figura 84** - Colchão inflável.  
Foto: CETEM/MCTI, 2012.

### **Moitão**

É uma técnica muito utilizada para tombamento e movimentação de bloco. Moitão é um sistema constituído de roldanas móveis, cujo objetivo é multiplicar a força física do operador, e deslocar grandes pesos.

No caso da derrubada de painéis ou blocos o moitão é usado para diminuir a distância entre o cabo de aço que é passado pelo painel e fixado no piso da praça da pedreira, fazendo com que essa operação não necessite de máquinas robustas. A figura 85 exemplifica o moitão.



**Figura 85** - Exemplo da prática do "moitão" para o tombamento do painel. Fotos: Granitos FUJI, 2009.

### **Manobra**

A manobra é uma técnica muito utilizada na movimentação de blocos principalmente. Consiste de um sistema híbrido em que se utiliza o sistema de roldanas móveis acoplado a máquinas robustas para realização de transporte de blocos ou tombamento de painéis. A figura 86 mostra um trator de esteiras puxando o painel com auxílio de roldanas móveis.



**Figura 86** - Trator de esteira puxando o painel. Foto: José R. Pinheiro, 2003.

### **Máquinas robustas**

As máquinas robustas são capazes de movimentar grandes volumes de rocha. São elas: trator de esteira, escavadeiras, retroescavadeiras, pá carregadeira, guincho de arraste, entre outras.

As pás mecânicas utilizadas nas minas são carregadeiras de esteira ou de pneus, com potência mínima de 140/150 HP. Cada uma dessas pás apresenta vantagens e desvantagens segundo as diferentes condições de operação. A carregadeira de esteira é lenta; seu alcance de ação não supera uma centena de metros no caso de obras contínuas (sua utilização em distâncias maiores se torna pouco econômica). Por outro lado, sua articulação chega a 90°, o que o torna preferível quando os espaços disponíveis são pequenos, bem como nas situações em que a estabilidade do solo é dificultada (por acúmulo de água, terrenos moles etc.), ou onde a altura disponível é limitada (nas fases iniciais de escavações subterrâneas). Os carregadores com pneus têm menor capacidade de tração no solo, porém grande capacidade de carregamento, com grande flexibilidade de utilizações e amplo alcance de ação. As máquinas mais comumente utilizadas atualmente têm potências não inferiores a 250 HP nas minas médias e pequenas, e superiores a 400 HP nas minas de maiores dimensões. As capacidades das caçambas são de 3 a 12 m<sup>3</sup>.

A pá carregadeira é uma máquina automática equipada de um dispositivo de carga (caçamba), situado em posição frontal. É utilizada para derrubar painéis na fase de desmonte, sendo equipada com uma lança própria. Na fase de remoção, é utilizada para carregar os caminhões com os estereis (equipada com caçamba) ou transportar os blocos de rocha para a zona de alcance da grua ou, mesmo, para o parque de blocos (equipada com patolas). As figuras 87 e 88 apresentam diferentes situações de movimentação de blocos na praça da pedreira.



**Figura 87** - Pá carregadeira usada na movimentação de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



**Figura 88** - Retroescavadeira usada na movimentação de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

O guincho de arraste é utilizado para pedreiras de baixa produção de blocos. É movido por motor geralmente a diesel, com o auxílio de roldanas móveis, acopladas aos cabos de aço. A figura 89 exemplifica o guincho de arraste para puxar os blocos. A figura 90 mostra a pá carregadeira realizando a mesma função do guincho.



**Figura 89** - Guincho de arraste. Foto: José R. Pinheiro, 2003.



**Figura 90** - Carregadeira com arraste de bloco. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Quase sempre as pás são parte das escavadeiras – máquinas decisivamente potentes com base de esteira ou de pneus, cuja utilização se mostra cada vez mais indispensável. As escavadeiras podem transportar grandes massas rochosas com uma mobilidade e uma capacidade de articulação que as pás normais não têm, o que as tornou máquinas absolutamente necessárias nos últimos anos, pelo menos nas minas de grandes dimensões e níveis de produtividade. Dentre as várias funções auxiliares de que dispõem, devemos nos lembrar da possibilidade de montagem do martelo demolidor, o que significa uma oportunidade bastante cômoda no tratamento de fachadas instáveis e na redução do peso dos detritos de maiores dimensões. Dentre outras coisas, o martelo demolidor se revela um instrumento precioso nas operações de abatimento mecânico em minas de rochas com estratificações naturais bastante proeminentes, que podem ser explotadas em ciclos regulares e que não permitem a produção de blocos.

A escavadeira e a retroescavadeira são usadas geralmente para movimentação de solos para limpeza das frentes de lavra do maciço rochoso. A figura 91 mostra uma retroescavadeira limpando o terreno.

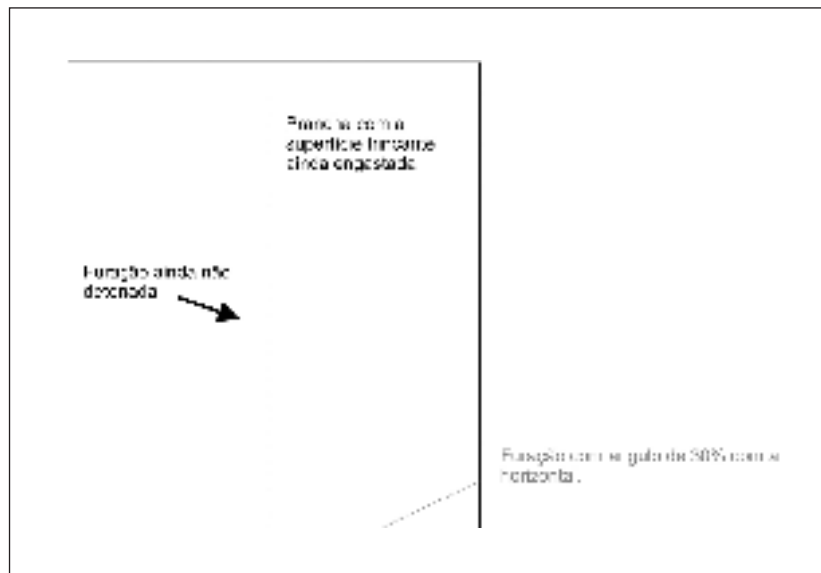


**Figura 91** - Escavadeira hidráulica. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

#### Boca de lobo

Logo após o isolamento do filão, do maciço rochoso, é iniciado o processo de tombamento que consiste na utilização de explosivos com a metodologia de chamada de “boca de lobo”. Este método visa a instabilização do filão com a diminuição da área de parte inferior do mesmo.

Para que esta operação seja realizada com sucesso é necessário, primeiramente, que a prancha não esteja completamente isolada, sendo que sua superfície trincante esteja ainda presa à rocha, porém, já perfurada. Na base da prancha com mais ou menos, 0,5 m de altura, será confeccionado um plano de fratura com uma inclinação de 30° em relação ao plano horizontal, de modo que ultrapasse metade da espessura da prancha de acordo com a figura 92 a seguir:

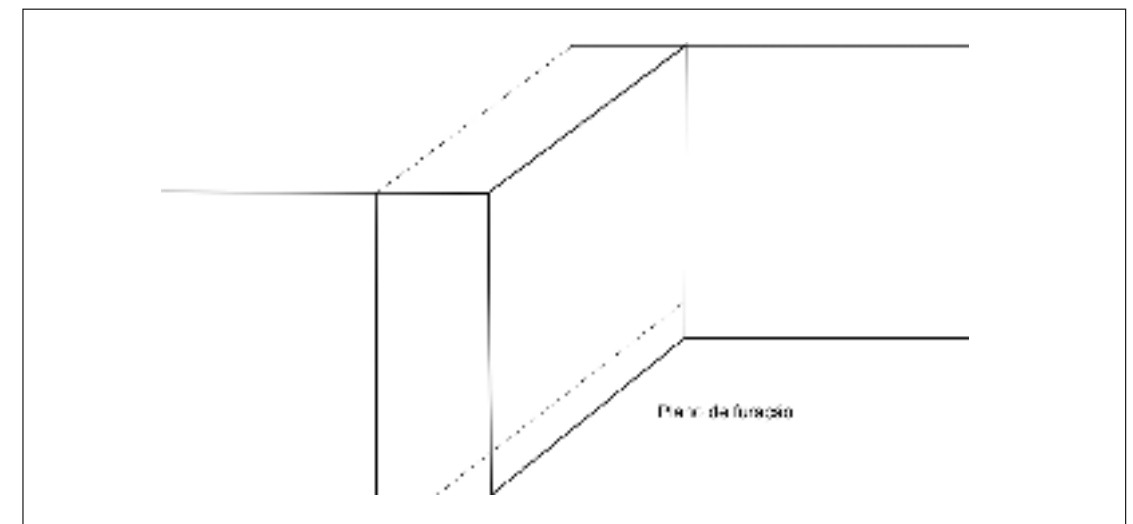


**Figura 92** - Vista esquemática da inclinação de furação em relação a horizontal.

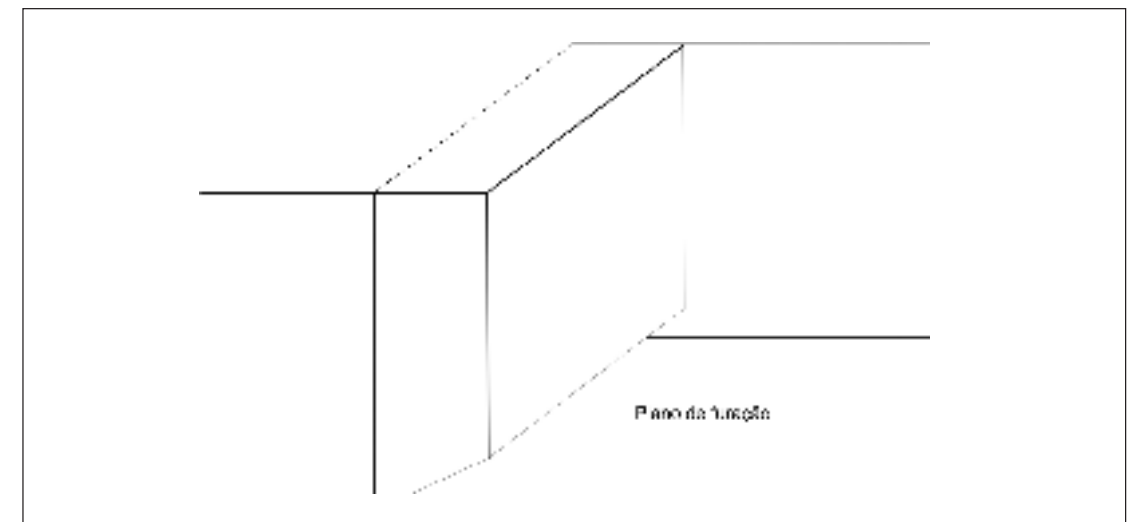
A furação deverá ser feita com um espaçamento de 0,2 metros entre os furos para a formação do plano de fratura. Ao término da confecção do plano de fratura inclinado no pé da prancha será realizado o carregamento e a detonação seguido da limpeza, formando assim, a boca de lobo.

Logo em seguida são realizados os procedimentos para o isolamento da prancha, através do carregamento e detonação do plano de fratura no plano trincante da rocha com o uso de explosivos ou a utilização de macacos hidráulicos conjugados com o corte de fio diamantado. No caso do uso de explosivos serão confeccionados furos espaçados entre si, formando um plano de fratura na qual, o mesmo será detonado de acordo com seu plano de fogo.

Já com o uso de fio, a máquina fará o corte na superfície trincante e o próprio peso do da prancha será utilizado para o tombamento da mesma, conforme as figuras 93 e 94.



**Figura 93** - Imagem ilustrativa do plano de furação para a confecção da boca de lobo.



**Figura 94** - Vista esquemática da prancha após a detonação e limpeza da boca de lobo.

Após as operações mencionadas o tombamento da prancha é inevitável, uma vez que origina o desequilíbrio da prancha até esta cair numa “cama” previamente confeccionada com o material terroso estéril, ou seja, sem matéria orgânica. A cama tem uma dupla função: amortecer o impacto da queda da fatia derrubada, minimizando a quantidade de fraturas induzidas pelo choque, e ajudar posteriormente a operação de esquadrejamento, permitindo a passagem do fio adiantado, caso haja necessidade, sem que seja necessário proceder a nova furação. A cama é normalmente construída com solo e pequenos fragmentos de rocha.

## 7.2. Movimentação de blocos

A movimentação de blocos é entendida como sendo toda a operação que envolve o levantamento, carregamento, descarregamento, transporte e colocação no pátio.

A movimentação de blocos começa desde o local de esquadrejamento até a saída da pedreira, após a operação de tombamento do painel de cima para baixo da bancada e em seguida o esquadrejamento dos blocos.

Após o esquadrejamento, a movimentação dos blocos até o local de embarque é feita por arraste, através de cabos de aço tracionados por guincho ou através de zorra (prancha metálica sobre a qual se coloca o bloco) puxada por pá carregadeira; por tombos sucessivos, com emprego direto de pá carregadeira, retroescavadeira, ou mesmo trator de esteira adaptado para este fim; ou conduzidos por garfo, montado diretamente numa pá carregadeira de maior potência.

Deixando de lado algumas ferramentas que normalmente estão presentes nas minas, mas que não são continuamente empregadas nas atividades mais comuns voltemos nossa atenção às pás carregadeiras mecânica, às guias derrick, às escavadeiras e aos cabrestos.

Os aparelhos de elevação com guias derrick ainda são bastante difundidos embora consolidados quanto aos procedimentos de utilização, e sem grandes inovações técnicas recentes, as guias desenvolvem funções insubstituíveis em minas cuja geometria não permite com facilidade o uso de outros maquinários, ou então não permitem acesso (minas subterrâneas em forma de poço). No entanto, são bastante comuns mesmo em minas a céu aberto onde, apesar de poderem ser operadas sobre amplos raios de ação (cerca de 40 a 50 m e 220° a 360°), têm como principal limitação a instalação fixa – isto é, a necessidade da instalação ser modificada conforme a evolução da mina.

Por fim, devemos mencionar os guinchos, um pouco obsoletos, utilizados para arrastar, puxar, deslocar blocos e outras ferramentas mais ou menos volumosas em todos os tipos de situações.

Para movimentação de blocos são utilizados: Pá carregadeira com implementos, como os mostrados na figura 95, trator e retroescavadeira, conforme descrito nas máquinas robustas do item tombamento de painéis.

### Grua Fixa tipo Derrick

Sistema de elevação de blocos e outros materiais do fundo das pedreiras formado por uma haste fixa a um mastro giratório, capaz de operar 360°. É utilizada essencialmente, para içar da pedreira os blocos de rocha aproveitáveis, embora possa servir para remover estêreis e para transportar para o interior da pedreira alguns equipamentos.

### Pau de carga

Sistema simples para a elevação e carregamento de blocos, consistente em um poste (de madeira ou metálico) com uma polia no topo. Pode ser fixo ou girar.

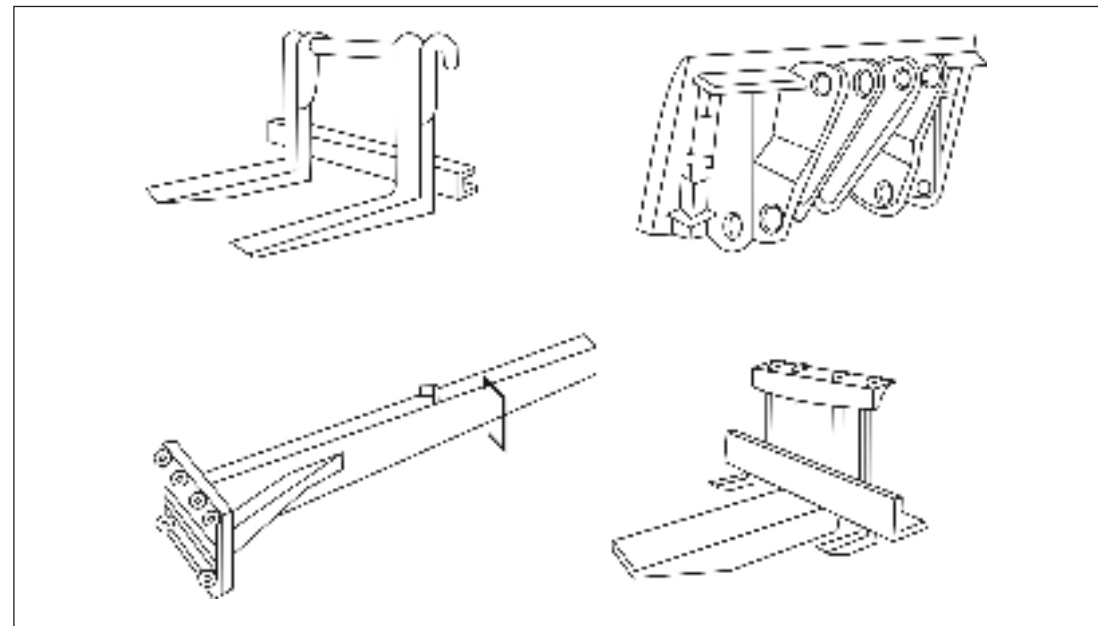


Figura 95 - Tipos de implementos de pá carregadeira para movimentação de blocos.

O carregamento dos blocos é realizado predominantemente com o emprego de “pau de carga”, auxiliado por guincho de arraste, pá carregadeira ou trator de esteiras (Figs. 96 a 98). Também podem ser empurrados diretamente para cima dos caminhões, através de rampa previamente construída com esta finalidade (Fig. 99). O uso de derrick para içamento e carregamento de blocos, muito comum em pedreiras da Europa, quase não é observado no Brasil (Figs. 100 a 102).



Figura 96 - Pau de carga usado na movimentação de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2013.



**Figura 97** - Pau de carga usado no carregamento do caminhão. Foto: CETEM/MCTI, 2012.



**Figura 98** - Guincho para içamento de blocos. Foto: CETEM/MCTI, 2006.



**Figura 99** - Carregamento de blocos com o auxílio de pá carregadeira. Foto: CETEM/MCTI, 2011.



**Figura 100** - Exemplo de Grua Derrick, em Portugal. Foto: CETEM/MCTI, 2007.



**Figura 101** - Exemplo de Grua Derrick, em Carrara, Itália. Foto: CETEM/MCTI, 2007.



**Figura 102** - Grua em pedra de mármore, no Brasil. Foto: CETEM/MCTI, 2012.

Em pedreiras em cava muito profundas, como a mostrada nas figuras 103 a 105, são necessários outros meios de carregamento não só de blocos, mas também das ferramentas e utensílios de trabalho e dos estêreis da mina, como elevadores de caminhões.



**Figura 103** - Elevador utilizado para retirar estêreis da cava, em Portugal. Foto: CETEM/MCTI, 2007.



**Figura 104** - Detalhe da subida do elevador utilizado para retirar estéreis. Foto: CETEM/MCTI, 2007.



**Figura 105** - Chegada do caminhão de estéreis no topo da cava. Foto: CETEM/MCTI, 2007.

## 8. Bibliografia e referências

ADAM, Jean-Pierr. Roman Building: Materials and Techniques. Routledge, 2003, ISBN: 0415208661, 360p.

AFONSO, J.C.A. Influência da Fraturação Natural na Mineralização do Desperdício em Pedreira de Rochas Ornamentais, Tese de Mestrado; Universidade de Lisboa; Lisboa; Portugal; 1991.

AGUS, M. et al. Aspetti di meccanica del taglio dei graniti con le tecnologie innovative. In: III CONVEGNO DI GEOINGEGNERIA SCAVO IN ROCCIA: IL FUTURO ED IL FUTURIBILE, Torino, 1992. p. 264-274.

AGUS, M. et al. Caracteristiche minero-petrografiche e disgregabilità dei graniti con la tecnologia water jet. In: Caracterização tecnológica na engenharia e indústria mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1990. p. 181-183.

ALENCAR, C.R.A. et al. Estudo econômico sobre rochas ornamentais, tecnologias de lavra e beneficiamento. v.3, Fortaleza, IEL/FIEC, agosto-1996.

ALMEIDA, F. Manual de Conservação de Cantarias. IPHAN/Programa Monumenta, 2005 - 2ª Edição, 87p.

ALMEIDA, S.L.M. & Luz, A.B. Manual de Agregados para a Construção Civil. CETEM, 2011.

AZAMBUJA, J.C. & SILVA, Z.C.G. Perfil Analítico dos Mármore e Granitos, Boletim n°. 38, v.l. DNPM, 1977. p. 43-44.

BERRY P. et al. Industrial viability of soft technologies for hard stone quarrying. Proc. XV World Mining Congress, Madrid, 1992. p. 533 - 542.

BIASCO, G. Diamond Wire for Quarrying Hard Rocks. Stone, IDR n°. 5, 1993. p. 252-255.

BORTOLUSSI, A. et al. Il taglio al monte del granito con il filo diamantato: Risultati dell'esperienza sarda. Atti delle giornate di studio, Convegno Internazionale. Anais Cagliari, 1989. p. 243-247.

BORTOLUSSI, A. Studio dell' influenza della porosità nel taglio dei graniti con la tecnologia water-jet. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. Anais. São Paulo, 1993. p. 713-723.

BORTOLUSSI, A. et al. Influenza delle caratteristiche petrografiche e struttural sulla resa di cava e la distribuzione del volume del blocchi. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., Cagliari, 1990. Anais. Cagliari, 1990b. p. 9-19.

BORTOLUSSI, A. et al. Escavazione e Preparazione du Blocchi di Granito. Carrara, Zingno 1988a, in Marmi Graniti, Pietre, vol. 29º, nº 162. p. 17-33.

BORTOLUSSI, A. et al. Improved Technology and Planning in Modern Stone Quarrying. In: Mine Planning and Equipment Selection, Balkema, Rotterdam, 1988b. p. 107-119.

BORTOLUSSI, A. et al. Oganizzazione razionale dell'attivitá di cava mediante tecniche di simulazione. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., Cagliari, 1990a. Anais. Cagliari, 1990, p. 351-361.

BORTOLUSSI, A. et al. Prestazioni e usura del filo diamantato nel taglio dei graniti. In: CONGRESSO

INTERNAZIONALE DI GEOINGEGNERIA. Torino, 1989. Anais. Torino, 1989, p. 195-200.

CARANASSIOS A. Applicazione di tecnologie avanzate per il taglio del granito. Cagliari, 1993. Tese de Doutorado – Università Degli Studi di Cagliari.

CARANASSIOS, A. et al. Prospective di innovazione tecnologica nelle cave di granito brasiliane. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. Anais. São Paulo, 1993. p. 357-377.

CARANASSIOS, A.; CICCUCI, R. Tecnologia de extração e valorização das rochas ornamentais. Rochas de Qualidade, São Paulo, n.º 109, p. 58- 77, 1992.

CARANASSIOS, A.; PINHEIRO, J. (2003). O emprego do fio diamantado na extração de rochas ornamentais: curso básico para operadores. Cachoeiro de Itapemirim. CETEMAG.

CARANASSIOS, A.; STELLIN JÚNIOR, A.; AYRES DA SILVA, L. A. Considerações acerca do estado de tensões dos maciços na lavra de rochas ornamentais. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 3., Verona, 1994. Anais. Verona, 1994. p. 283-285.

CARUSO, L.G. Pedras Naturais – Extração, Beneficiamento e Aplicação. Rochas & Equipamentos. Documentos. 3.º. Trim., n.º. 43, 1996. p. 98-156.

CHIODI FILHO, C. Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais. Série Estudos e Documentos, CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, 1995.

CHIODI FILHO, C.; ONO. P. A. Tipos de lavra e técnicas de corte para desmonte de blocos. Rochas de Qualidade, São Paulo, n. 120, 1995. p. 93- 106.

CICCUCI, R. et al. Studio dell' Organizzazione di una cave di Granito in Sardegna. IV Convegno Nazionale su Attività Estimativa e Defesa del Suolo, Saint-Vincent, setembro 1986.

CICCUCI, R. Coltivazione e valorizzazione dei lapidei silicei quarrying and processing of eruptive rocks. ATTI DELLE GIORNATE DI STUDIO, Convegno Internazionale Su: Situazione e Prospettive Dell' Industria Lapidea, A.N.I.M., Anais. Cagliari, 1989, p. 165-177.

CICCUCI, R. et al. Moderne tecnice di estrazione dei lapidei ornamentali i problemi di impacto ambientali in Italy. In: Simposio EPUSP sobre controle ambiental e segurança em mineração, São Paulo, Anais, São Paulo, 1989b. p. 51-65.

CICCUCI, R. Tecnologia avanzate per la coltivazione e la lavorazione dei lapidei. In: 1ª CONFERENZA EUROPEA SULLE CAVE - EUROCAVE, A.N.I.M., Anais.. Saint Vincent, 1992, p. 211-220.

CICCUCI, R. Warterjet in ornamental stone engineering. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. Anais. São Paulo, 1993. p. 407-424.

CICCUCI, R. Granite slotting in the quarry using water jet. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL, 1, LISBOA 1995. Anais. Lisboa, 1995.

CLUI - CENTER FOR LAND USE INTERPRETATION – Base de dados de uso da terra. Disponível em: <http://clui.org/ludb/site/danby-quarry>. Acessado em 20 nov. 2012.

CRESPO, A. Novas tecnologias para extração de rochas ornamentais. Rochas & Equipamentos, Lisboa, n. 24, 1991. p. 122-136

DANIEL, P. Granite Quarrying – Cut, Wast & Costs. IDR, n.º. 1, 1986b. p. 1-4.

DANIEL, P. More Granites Succumb to Diamond Wire. IDR, n.º. 5, 1986a. p. 187-194

DANIEL, P. Slate without waste. Quarrying, IDR, n.º. 4, 1993. p. 200-203

DE BEERS, Syndrill Cuts Costs in Stone Extraction. Stone, 1995. p. 53-55

DEL SOLDATO, M. & PINTUS, S. Historical-geological study of extraction activities and techniques in eastern Liguria. Lunigianese Academy of Science, vol. XLV-XLVII, La Spezia, 1985.

DINIS DA GAMA, C. O Futuro das Pedreiras Subterrâneas. Boletim de Minas, Vol. 38 - n.º 4. Instituto Geológico e Mineiro, 2001. Versão Online no site do IGM ([http://www.igm.pt/edicoes\\_online/boletim/vol38\\_4/artigo1.htm](http://www.igm.pt/edicoes_online/boletim/vol38_4/artigo1.htm)).

DINIS DA GAMA, C., COUTO, R.T.S., COSTA E SILVA, M.M., BERNARDO, P.A.M., BASTOS, J.N., GUERREIRO, H.J.P., NEVES, A.P.F., PEREIRA, A.J.C., PEREIRA, H.C. & HORTA, J.M.M.. Estudo da Viabilidade Técnica da Exploração Subterrânea de Mármore no Anticlinal de Estremoz (Coordenador: Dinis da Gama). Instituto Geológico e Mineiro – IGM, Departamento de Prospecção de Rochas e Minerais Não- Metálicos, Portugal, 2001. Disponível em: <http://www.igm.ineti.pt/departam/nmetalicos/projectos/concluidos/subterraneos/relatorio/default.htm>

DUARTE, G. W. Uso e desempenho do fio diamantado em maciço rochoso. Rochas de Qualidade, São Paulo, n. 115, 1993. p. 93-97

DUARTE, G.W. Método de lavra determina a eficácia do rendimento. Rochas de Qualidade, São Paulo, n. 138, 1998. p. 91-110

FILGUEIRA, M. Produção de Fios Diamantados “in situ”. UENF, 2000. Tese de Doutorado. Centro de Ciências e Tecnologia, Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes.

FILIPPI, E. The soft stones of Vicenza and Nanto. Marmi Pietre Graniti, July-August, 1980. p. 79-96.

FORNARO, M. & BOSTICCO, L. Underground Stone Quarrying in Italy: partes 1, 2, 3 e 4. Revista Marmomacchine International. Ano 2, n.º 6, 7, 8 e 9, 1994.

FORNARO, M. et al. Studio sperimentale del funzionamento del filo elettodeposto nel taglio delle oficalciti. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 1., Cagliari, 1990. Anais. Cagliari, 1990, p. 307-331.

GUEDES, M.F.H. Apreciação Técnico-Econômica dos Diferentes Processos de Destaque de Blocos para Fins Ornamentais. Rochas & Equipamentos, p. 106-126, 1992.

HAWKINGS, A.C. ET ali. The Diamond Wire Saw in Quarrying Granite and Marble. Dimensional Stone, 1990.

HIGH WIRE DEBUT. Diamonds in Industry. Ed. De Beers, 1995. p. 25.

KALVELAGE, M. R. Modelamento Informatizado da Lavra de Rochas Ornamentais – Granito Casablanca. UFPB, 2001. Dissertação de Mestrado – Pós-Graduação em Engenharia de Minas.

KOPPE, J. C; NOVA, P. A. C.; COSTA, J. F. C. L. Projeto e recuperação de área degradada por lavra de granito ornamental em Viamão/RS, Brasil. In: CONGRESSO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE MINAS, 2., São Paulo, 1993. Anais. São Paulo, 1993, p. 395-404.



LÓPEZ JIMENO, C. (editor) Manual de Rocas Ornamentales: Prospección, explotación, elaboración y colocación. LOEMCO (Laboratorio Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción), Madrid, 1996.

Manual de Perfuração de Rochas (Teórico/Prático); Sandvik do Brasil; São Paulo.

Manual de Perfuração de Rochas; Kurt Herman; Editora Polígono; São Paulo; 1969.

Manual de Perfuração e Desmontes; Atlas Copco do Brasil; São Paulo; 1969.

Manual de Utilização de Trasteg ( Massa Expansiva); Asa Branca Mármore e Granito Ltda; Rio de Janeiro; 1999.

Manual para Perfuração de Rochas; Atlas Copco do Brasil: São Paulo; 1967.

MARCON, Douglas Bortolote; PEITER, Carlos César; FERNÁNDEZ CASTRO, N. Utilização de fio diamantado na lavra de granitos comerciais. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2012, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

MARLES, T. Norse Saga. IDR, n°. 1, 1990. p. 6-7.

MELLO, Jr, L. A. A Indústria de Rochas Ornamentais. UNICAMP, 1991. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências.

MODERN technology to uncover earth's stone. Stone World. New York, august, 1993, p. 75-82.

MOYA, M. M. UNICAMP, 1995. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências.

NANOSANCHEZ (Own work) [Public domain], via Wikimedia. Canteras romanas de arenisca de la ciudad de Carthago Nova, actual Cartagena (España) - 2009. Disponível em: Commons[http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACanteras\\_romanas3.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACanteras_romanas3.jpg). Acessado em: 20/06/2013.

Perforaciones y Voladuras para Operaciones Mineras; Lúcio Veja Rodrigues/José Murillo; Libreria Editorial Juventud; La Paz/Bolivia; 1990.

PINZARI, M. Quarrying Stone by Diamond Wire in Italy. IDR n°. 5, 1989. p. 231-236.

PRIMAVORI, P. Technological developments in machinery and installations for extracting and processing stone materials. Directory 2002. Associazione Italiana Marmomacchine, Milano, Itália, 2002. p. 41-196.

RUSSO, S. Máquina para corte com água a alta pressão em pedra de granito ou mármore. Rochas & Equipamentos, Lisboa, n. 33, 1994. p. 39-43.

SCHAFFNER, J., BLASER, E. Building Owner Saves Money. Diamond in Industry. Ed. De Beers, 1995. p. 2-3

SCHMIDT, H. Nápoles subterránea. Edición del 24 al 31 de octubre de 2004. Disponível em <http://www.elsalvador.com/hablemos/2004/241004/241004-3.htm>

SILVA, R. E. C. Estudo de Pré-Viabilidade para uma Potencial Lavra Subterrânea de Rocha Ornamental. UFRJ, 2005. Tese de Doutorado – Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza – Instituto de Geociências – Departamento de Geologia.

SMITH, M. Dimensional stone blasting in Finland. Mining Magazine, october 1987. p. 312-317.

SOUZA, D. V, VIDAL, F. W. H, FERNÁNDEZ CASTRO, N, Estudo comparativo da utilização de teares multilamina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

STELLIN Jr, A., CARANASSIOS, A. Extração de Rochas Ornamentais. Brasil Mineral, São Paulo, n°. 89, 1991. p. 30-34.

SUMMERS, D. A. Water jet use in quarrying. ATTI DELLE GIORNATE DI STUDIO, Convegno Internazionale Su: Situazione e Prospettive Dell' Industria Lapidea, A.N.I.M., Anais Cagliari, 1989, p. 9-14.

THOREAU, B. Diamond Impregnated Wire for Sawing Hard Abrasive Stones. IDR, n°. 2, 1984. p. 94-95

TOMARAS, P. Mármoles de la antigua Grecia que se siguen empleando hoy – Partes I y II. Disponível em <http://www.litosonline.com/articles/60/ar6003s.shtml>, 2005.

TRANCU, T. C. Diamond Wire Machine Cuts Marble – Quarrying Costs. IDR, 1980. p. 329-331.

TURCHETTA, S. Tecnologie di Lavorazione Delle Pietre Naturali. 2003. 261p. Tese (Doutorado) – Università Degli Studi di Cassino, Italy (Europa).

VIDAL, F.W.H. A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará. São Paulo. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. EPUSP, Departamento de Engenharia de Minas. 178p.

\_\_\_\_\_ Estudo dos elementos Abrasivos de Fios Diamantados para Lavra de Granito do Ceará. São Paulo, USP, 1999. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas.

VIDAL, F.W,H et al Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará. Fortaleza, CETEM/UECE/DNPM/FUNCAP/SENAI, 2005. 176p.

WRIGHT, D. N. Últimos Avanços em Corte com Fio Diamantado. Seminário sobre Diamante e CBN na Indústria, 18-19 de março de 1991, São Paulo.

ZUCCHETTI, S., SANDRONE, R & SIMONETTI, O. Applicative, technical and geolithical study of “Finale Stone” (Savona). Min. of the 1st Int. Conv. on Quarrying Stone and Lithoid Materials, Turin, 1974.