



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**PMI - 500**

**Trabalho de Formatura**

***Perfuratrizes para Minas a Céu Aberto***

Aluno: Marco Antonio de Souza Martins

Orientador: Prof. Dr. Lineu A. Ayres da Silva

Novembro de 1997

EPMI  
TF-1994  
M.366p  
Syrus 1580364

M.1994H

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005904

## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>3. PERFURATRIZES DE SUPERFÍCIE .....</b>	<b>5</b>
3.1. PRINCÍPIO DA PERFURATRIZ DE SUPERFÍCIE .....	6
3.1.1. PERCUSSÃO .....	7
3.1.2. AVANÇO .....	8
3.1.3. ROTAÇÃO .....	9
3.1.4. SISTEMA DE LIMPEZA .....	10
3.2. PERFURATRIZ PNEUMÁTICA X PERFURATRIZ HIDRÁULICA .....	12
3.2.1. EFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO .....	13
3.2.2. ECONOMIA .....	13
3.2.3. ERGONOMETRIA E MECANIZAÇÃO .....	14
3.2.4. FACILIDADE DE TRABALHO .....	15
3.2.5. CONCLUSÕES .....	16
3.3. MECANISMO DE QUEBRA DA ROCHA NA PERFURAÇÃO .....	16
3.4. USO DAS PERFURATRIZES DE SUPERFÍCIE .....	19
3.4.1. PERFURATRIZES MANUAIS .....	19
3.4.2. PACOTES DE PERFURATRIZES PARA TRATORES .....	23
3.4.3. PERFURATRIZES SOBRE PNEUS .....	24
3.4.4. PERFURATRIZES SOBRE ESTEIRAS .....	25
3.4.4.1. ALTA TAXA DE PENETRAÇÃO .....	27

3.4.4.2.	PEQUENO TEMPO DE CICLO .....	27
3.4.4.3.	BOA QUALIDADE DOS FUROS .....	28
3.4.4.4.	ALTA DISPONIBILIDADE .....	28
3.4.4.5.	BAIXOS CUSTOS DE OPERAÇÃO .....	29
3.4.4.6.	PERFURATRIZES HIDRÁULICAS .....	29
3.4.4.7.	PERFURATRIZES PNEUMÁTICAS .....	31
3.5.	TIPOS DE BROCAS .....	22
3.5.1.	BROCA INTEGRAL .....	32
3.5.1.1.	VIDA ÚTIL .....	33
3.5.2.	EQUIPAMENTO SECCIONADO .....	33
3.5.2.1.	ROSCAS .....	34
3.5.2.2.	COMPONENTES .....	34
3.5.2.2.1.	PUNHO .....	35
3.5.2.2.2.	LUVA .....	35
3.5.2.2.3.	HASTE .....	36
3.5.2.2.4.	COROA OU BIT .....	37
<b>4.</b>	<b>PERFURATRIZES DE FURO ABAIXO .....</b>	<b>38</b>
4.1.	PRINCÍPIO DA PERFURAÇÃO DE FURO ABAIXO .....	38
4.2.	MARTELO DE FURO ABAIXO .....	42
4.3.	CARRETAS PARA PERFURATRIZES DE FURO ABAIXO .....	44
4.3.1.	AVANÇO .....	45
4.3.2.	BRAÇO .....	46
4.3.3.	LIMPEZA .....	46
4.4.	ACESSÓRIOS .....	47

4.4.1.	COROAS OU BITS .....	47
4.4.2.	TUBOS .....	49
4.4.3.	PERFURAÇÃO E MEIO AMBIENTE .....	50
<b>5.</b>	<b>PERFURATRIZES ROTATIVAS .....</b>	<b>51</b>
5.1.	PERFURAÇÃO ROTATIVA COM BIT TRICÔNICO .....	51
5.1.1.	TIPOS DE CARRETAS .....	51
5.1.2.	FONTES DE ENERGIA .....	52
5.1.3.	PARÂMETROS DA PERFURAÇÃO .....	52
5.1.3.1.	AVANÇO .....	53
5.1.3.2.	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO .....	53
5.1.3.3.	DESGASTE DO BIT .....	54
5.1.3.4.	DIÂMETRO DO BIT .....	55
5.1.3.5.	LIMPEZA .....	55
5.2.	PERFURAÇÃO ROTATIVA POR AÇÃO DE CORTE .....	56
<b>CONCLUSÕES .....</b>		<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>58</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>		<b>59</b>

## 1. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o de apresentar os equipamentos de perfuração para minas a céu aberto mais utilizados hoje em dia.

Para tanto, as perfuratrizes serão divididas segundo seus princípios de trabalho em:

- perfuratrizes de superfície (*top hammer drills*);
- perfuratrizes de furo abaixo (*down the hole drills*); e
- perfuratrizes rotativas (*rotary drills*).

Devido ao grande uso das perfuratrizes de superfície, será dada especial atenção a estas máquinas. No mercado estão disponíveis modelos de diferentes tamanhos, com graus de mecanização que variam desde as perfuratrizes manuais até aquelas montadas sobre esteiras com cabina de controle e, indiferentemente do tamanho e grau de mecanização, podem ser tanto pneumáticas como hidráulicas. Assim, o presente trabalho irá procurar agrupar cada um destes modelos e apresentar suas principais características e aplicações dentro da mineração.

Ainda sobre as perfuratrizes a percussão, será abordado o método de furo abaixo, que vem ganhando cada vez mais espaço na atividade mineira como um todo. Pelo fato das perfuratrizes de furo abaixo se diferenciarem das de superfície, tanto no tipo de martelo como no tipo de hastes e demais acessórios, elas serão tratadas em um capítulo a parte.

Finalmente, as perfuratrizes rotativas. Neste item serão feitos rápidos comentários sobre os dois métodos de perfuração rotativa; os que penetram a rocha por esmagamento (com o uso de bits tricônicos) e os que penetram a rocha por ação de corte (*drag bit*).

## 2. INTRODUÇÃO

A maioria das perfuratrizes usadas em minas a céu aberto são projetadas para perfurações verticais e inclinadas.

Os quatro componentes envolvidos no processo de perfuração são: avanço, rotação, percussão e limpeza.

Os métodos percussivos - perfuratrizes de superfície e de furo abaixo - utilizam todos estes componentes, enquanto que perfuratrizes rotativas compensam a falta da percussão com um aumento da força de avanço e do torque da rotação.

Os bits penetram na rocha pela energia que é produzida pela perfuratriz. A coordenação da percussão, da rotação, da ação de corte e da força de avanço com as propriedades geométricas do bit é o que possibilita que a rocha seja perfurada.

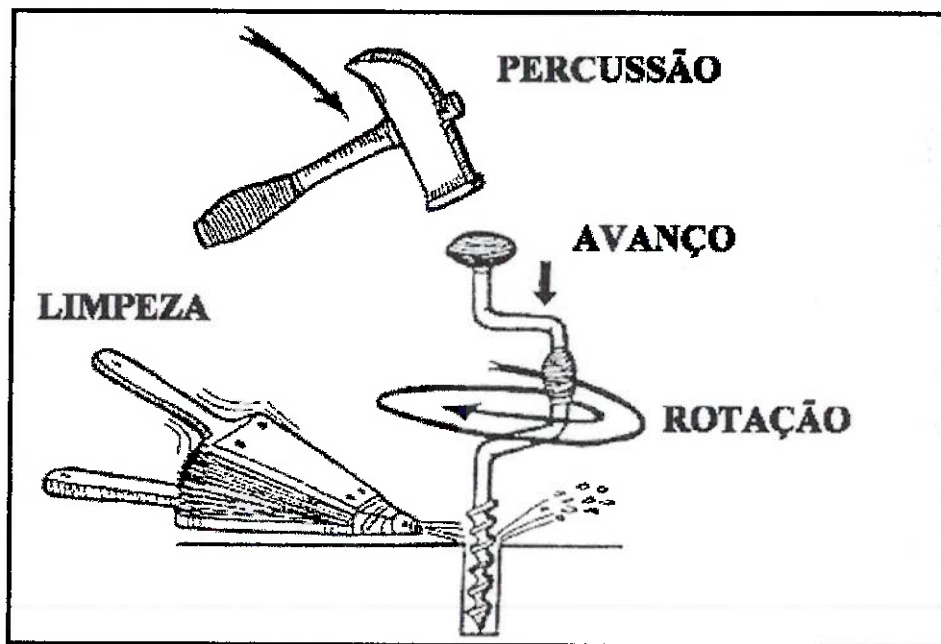


Figura 1 - Os principais componentes envolvidos na perfuração

Atualmente os fabricantes de perfuratrizes estão dando especial atenção para a mecanização e automação da perfuração visando melhorar a higiene e a segurança de trabalho. Perfuratrizes modernas são equipadas com braços, trocadores automáticos de hastes, indicadores de ângulos para melhor alinhamento do furo e sistemas hidráulicos que previnem o bloqueio da coluna durante a perfuração. As cabinas podem ser projetadas com isolamento acústico e com ar condicionado, além de terem todos os controles.

Os diâmetros de haste mais utilizados variam de 64 mm até 381 mm ( de 2 ½” até 15”). Dependendo do sistema de manuseio das hastes, os furos podem ter mais de 30 m de profundidade.

Equipamentos projetados para perfuração em superfície são de vários tipos, trabalhando com diferentes princípios. A seguinte divisão apresenta o agrupamento dos modernos equipamentos de perfuração em superfície baseada nos seus princípios de trabalho:

#### Perfuratrizes de Superfície

- hidráulicas; e
- pneumáticas.

#### Perfuratrizes de Furo Abaixo

- operadas pneumáticamente por compressores de ar portáteis; e
- com carretas que possuem unidade de acionamento hidráulica.

#### Perfuratrizes Rotativas

- que penetram a rocha por esmagamento; e
- que penetram a rocha por ação de corte.

A quantidade de rocha ser escavada e as tabelas de operação normalmente determinam o diâmetro do furo e o tamanho do equipamento de perfuração a ser usado, enquanto que o método de perfuração depende essencialmente das propriedades físicas e geológicas do tipo de rocha a ser escavada. A figura abaixo ilustra os principais métodos de perfuração em superfície e suas respectivas aplicações.



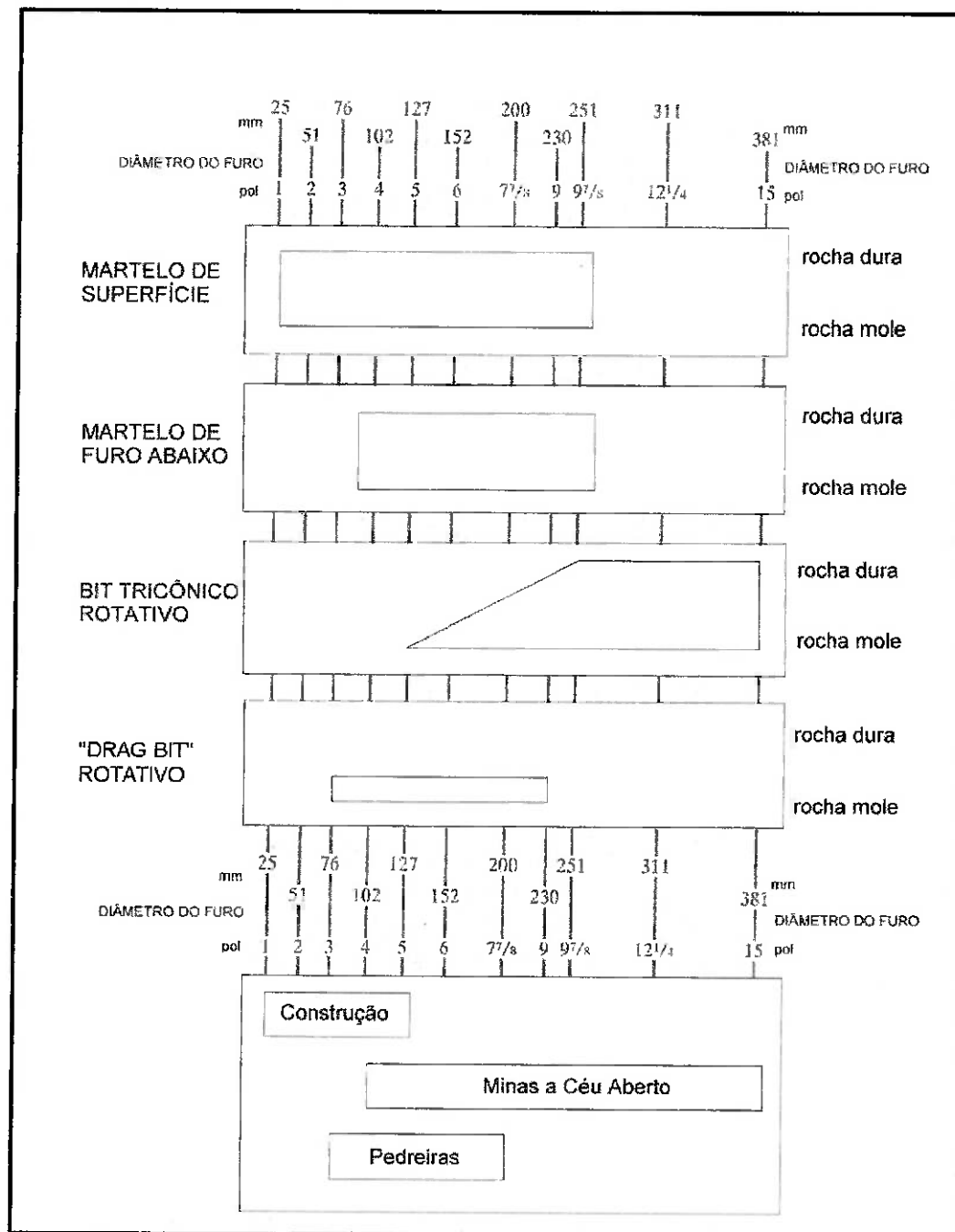


Figura 2 - Métodos de perfuração em superfície e suas aplicações

### 3. PERFURATRIZES DE SUPERFÍCIE

As perfuratrizes de superfície são normalmente usadas em formações rochosas moles a duras e para diâmetros de furo de 22 a 254 mm (7/8" a 10"). Elas podem ser classificadas pelo tamanho e princípio de operação da seguinte forma:

- perfuratrizes manuais hidráulicas ou pneumáticas;
- perfuratrizes pneumáticas manuais com dispositivos de avanço do tipo *airleg*;
- perfuratrizes hidráulicas leves montadas sobre avanços para perfuração mecanizada em diferentes tipos de braços;
- perfuratrizes pneumáticas sobre esteiras acionadas por compressores de ar portáteis; e
- perfuratrizes hidráulicas montadas sobre esteiras ou rodas com unidades de acionamento próprias.

Como visto, as perfuratrizes de superfície usadas a céu aberto podem tanto ser pneumáticas como hidráulicas, sendo, no entanto, uma tendência atual o uso das hidráulicas pelas seguintes vantagens em relação às pneumáticas:

- velocidade de penetração de 2 a 3 vezes maior;
- maior mobilidade;
- maior mecanização e automação;
- menor consumo de combustível (metade);
- maior vida útil das hastes; e
- melhores condições de trabalho para o operador.

A experiência tem mostrado que, devido aos fatores acima mencionados, uma perfuratriz hidráulica pode substituir duas ou três pneumáticas em termos de produção, com custos por metro perfurado reduzidos de 20 a 30 centavos. Se considerarmos uma produção anual de 200.000 t, perfuratrizes hidráulicas representam uma importante alternativa econômica.

A maioria das perfuratrizes do mercado são montadas sobre esteiras (*crawler*) pelo fato de que a superfície das bancadas varia muito, dificultando o trabalho de equipamentos montados sobre rodas (*wagon*). Perfuratrizes sobre estes equipamentos são projetadas para trabalhar com determinados diâmetros de coluna; de 38 a 51 mm usando-se hastes convencionais e de 76 a 165 mm utilizando-se hastes-tubo. O principal objetivo do projeto é combinar o martelo com a haste de modo que se consiga a máxima taxa de penetração com vida útil ótima. Uma perfuratriz de superfície hidráulica designada para diâmetros de 89 a 152 mm pode, normalmente, produzir até 2,5 milhões de toneladas de rocha por ano. Com diâmetro de furo de 127 mm o total perfurado será de 50.000 a 60.000 metros, dependendo da perfurabilidade da rocha e das

condições de trabalho. A tabela abaixo detalha a capacidade de produção de perfuratrizes hidráulicas de superfície em função do diâmetro do furo e do tipo de rocha.

Potência [kW]	Diâmetro do Furo [mm]	Taxa de Penetração [cm/min]			Rendimento por Metro [t]	Capacidade por Turno [t]
		Calcário	Granito	Diorito		
15	76	120	100	80	23	4.600 - 6.900
17	102	100	85	70	40	7.000 - 10.000
22	127	100	85	70	55	9.600 - 13.800
35	165	100	85	70	72	10.800 - 16.200
70	200	100	85	70	98	14.700 - 21.400

Tabela 1 - Cálculo da capacidade de produção para perfuratriz hidráulica de superfície

### 3.1. PRINCÍPIO DA PERFURATRIZ DE SUPERFÍCIE

As perfuratrizes de superfície podem ser tanto hidráulicas como pneumáticas, dependendo do meio de transmissão de energia a ser usado.

Essas perfuratrizes combinam quatro fatores:

- percussão;
- avanço;
- rotação; e
- limpeza.

A energia de percussão produzida no pistão da perfuratriz é transmitida à rocha pela coluna da perfuratriz, quebrando a rocha no fundo do furo por esmagamento.

Nas perfuratrizes de superfície o pistão é acelerado até uma certa velocidade antes dele golpear o punho ou a haste de perfuração. A energia cinética produzida é transmitida ao bit na forma de ondas de choque de compressão, que atravessam a coluna a uma velocidade de aproximadamente 5.200 m/s. Quando a onda de choque atinge o bit, a energia é transmitida à rocha, quebrando-a e produzindo a penetração do bit. Uma pequena parte desta onda de choque é refletida para a coluna.

Os cinco parâmetros que afetam a taxa de penetração são:

- energia de impacto;
- frequência de impacto;
- força de avanço;
- velocidade de rotação; e
- limpeza do furo.

A percussão é formada pela energia e pela frequência de impacto, que determinam a forma da onda de impacto transmitida à coluna.

### 3.1.1. PERCUSSÃO

A frequência de impacto das perfuratrizes pneumáticas varia entre 1.600 e 3.400 golpes/minuto enquanto que nas hidráulicas ela é maior, entre 2.000 e 4.000 golpes/minuto.

A potência de saída é diretamente proporcional à pressão do óleo ou do ar aplicada no circuito de percussão de cada perfuratriz.

Como nas perfuratrizes a percussão a rocha é quebrada por impactos individuais, o bit tem de ser girado entre os impactos. Isto, portanto, determina a mínima frequência dos golpes. Os bits não podem ser girados mais do que a frequência dos golpes sugere, caso contrário a quebra da rocha será por rotação. Por outro lado, se os bits não são girados entre os sucessivos golpes, ter-se-á uma excessiva refragmentação. Portanto, a frequência ótima de golpes se situa entre estes dois extremos.

Quanto maior o diâmetro do bit, menos velocidade de rotação é necessária entre dois golpes sucessivos. A energia de impacto precisa ser ajustada de acordo com o diâmetro do bit e das hastes. Quando se atinge a energia de impacto ótima, a taxa de penetração é alta e a rotação fica suave. Energia de impacto excessiva em relação à velocidade de rotação irá causar uma rotação irregular, sem o aumento da taxa de penetração.

A energia de impacto é normalmente determinada pela dureza da rocha. Se esta dureza varia, a perfuratriz é normalmente ajustada de acordo com a mais dura. Um limite de energia de percussão é determinado pela coluna da perfuratriz. Para um determinado diâmetro tem-se um máximo de energia cinética que pode ser transmitida pelas hastes.

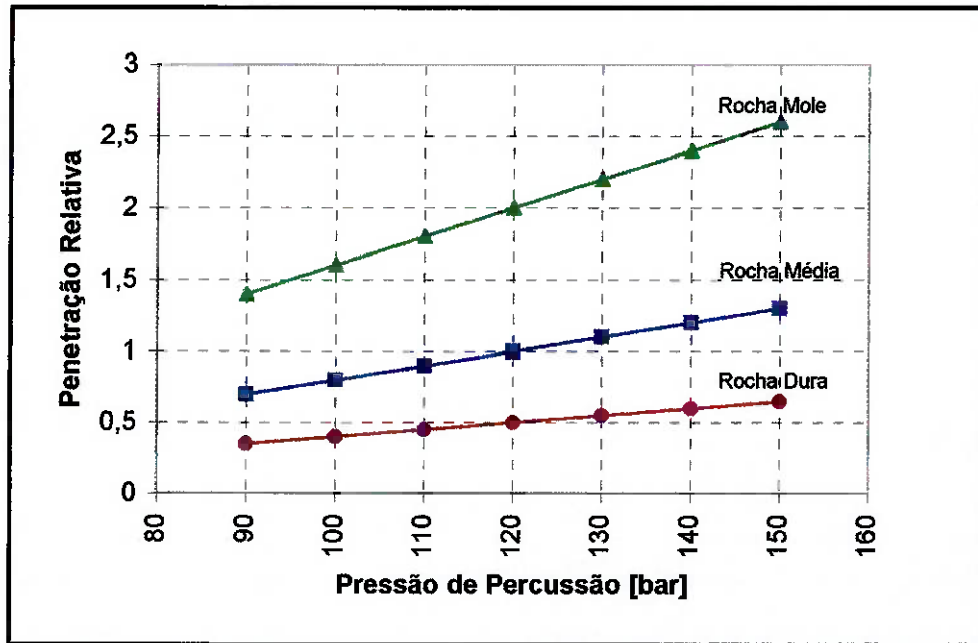


Figura 3 - Taxa de penetração relativa em função da pressão de percussão

### 3.1.2. AVANÇO

O bit precisa estar em constante contato com o fundo do furo para maximizar a transferência de energia de percussão para a rocha. Esta força de avanço depende de :

- potência de percussão;
- condições da rocha;
- profundidade do furo; e
- coluna da perfuratriz.

Por esta razão as perfuratrizes de superfície são normalmente montadas sobre avanços. Estes promovem a força de avanço necessária através de um motor de avanço que direciona a perfuratriz através de uma corrente. Energia de percussão e avanço precisam estar de acordo.

A força de avanço é normalmente fixada de acordo com as condições da rocha que prevalecem. Abaixo descreve-se as consequências da força de avanço:

#### Força de Avanço Muito Baixa

- grande desgaste nas roscas da coluna de perfuração pela tendência de se afrouxarem; a onda de choque não é transmitida para a rocha e reflete nas juntas produzindo calor, gerando aumento dos picos de carga que causam fadiga na coluna; e
- diminuição da taxa de penetração por causa da pouca transmissão de energia.

#### Força de Avanço Muito Alta

- aumento da resistência de rotação (apertando muito os acoplamentos);
- velocidade de rotação irregular;
- excessivo desgaste na coluna e desvio do furo por arqueamento; e
- aumento da probabilidade de encravamento da haste.

Muitas vezes procura-se aumentar a força de avanço com o objetivo de se aumentar a taxa de penetração. Porém, o aumento da força de avanço irá aumentar a taxa de penetração até um certo ponto, acima do qual esta irá cair.

### 3.1.3. ROTAÇÃO

A rotação tem como principal função girar o bit para uma nova posição entre os golpes. A velocidade de rotação é função do:

- diâmetro do bit;
- profundidade do furo;
- tipo do bit;
- condições da rocha; e
- força de avanço.

Velocidade de rotação muito baixa acarreta numa baixa penetração devido ao encravamento das hastes, à excessiva refragmentação, ao desafraxamento dos acoplamentos e ao desgaste das roscas. Velocidades muito altas resultam em excessivo desgaste na coluna pelo fato de que a quebra começa a ocorrer por rotação e não por percussão, e também aperta demasiadamente os acoplamentos e desgasta o punho. Avanço e rotação devem ser proporcionais.

A rotação entre consecutivos golpes precisa ser adaptada para produzir fragmentos tão grandes quando possíveis - o bit não devem golpear o mesmo ponto do fundo do furo muitas vezes. Em perfurações de superfície a velocidade de rotação é de normalmente entre 80 e 250 rpm. Para

bits de pequeno diâmetro (diâmetros menores que 51 mm) a velocidade de rotação varia entre 200 e 300 rpm, enquanto que para bits de grande diâmetro (diâmetros maiores que 64 mm) a velocidade é menor (50 a 200 rpm) devido à necessidade de redução da velocidade periférica e ao desgaste das pastilhas na periferia.

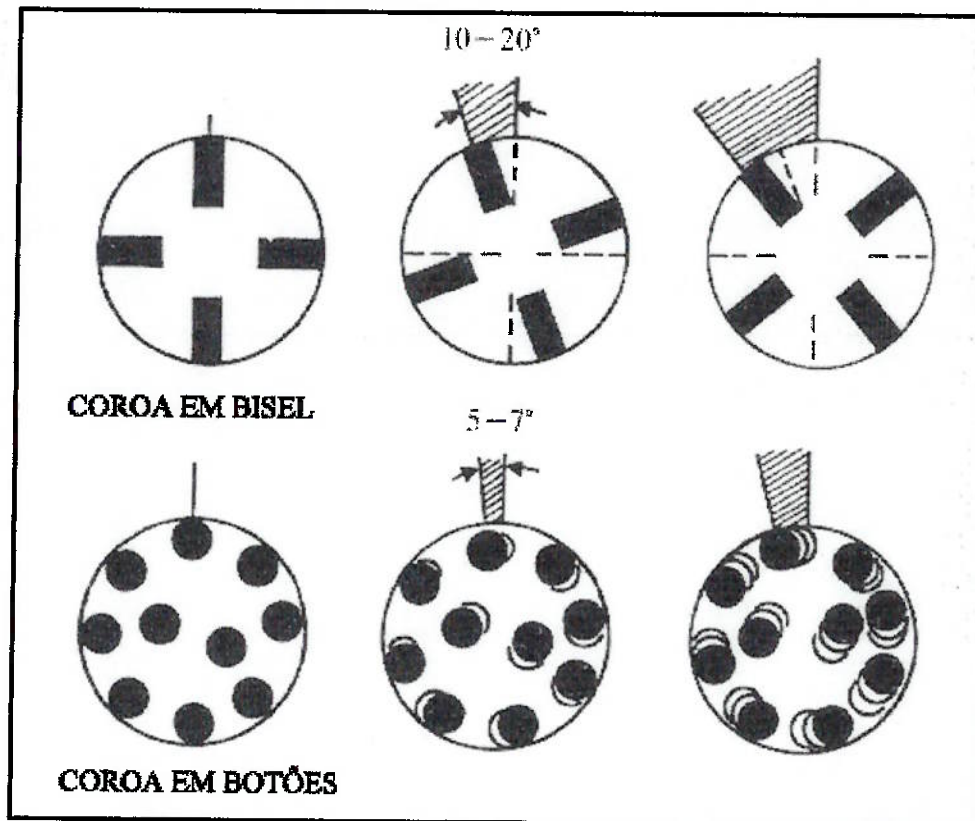


Figura 4 - Velocidade de rotação entre golpes sucessivos como função da taxa de penetração e do diâmetro do bit

### 3.1.4. SISTEMA DE LIMPEZA

Finalidades do fluxo do agente de limpeza:

- apresentar à coroa uma nova superfície de rocha limpa a cada impacto do pistão da perfuratriz;
- e
- retirar continuamente, do interior do furo, o material desagregado.

Além disso, o agente de limpeza exerce a função de resfriamento da coluna, particularmente da coroa, e também de lubrificante das superfícies em contato com a rocha ao longo da coluna, reduzindo o atrito.

Se a limpeza não for suficiente, começa a ocorrer refragmentação, a taxa de penetração cai e os bits sofrem maior desgaste. Em perfurações de superfície a limpeza é conseguida com um fluxo



de ar de um compressor. O ar é forçado para o fundo do furo através de um furo central de limpeza na coluna de perfuração e furos de limpeza no bit. Os fragmentos, misturados ao ar, são forçados para fora do furo através do espaço entre a haste e a parede do furo.

Nos furos de baixo para cima a gravidade favorece a remoção dos fragmentos, enquanto que nos furos verticais a partícula tende a se depositar no fundo do furo. Neste caso a velocidade do agente de limpeza (velocidade anelar) na área situada entre a haste e a parede do furo (área anelar) deve superar a velocidade de queda livre da partícula.

Quando as condições existentes não são suficientes para proporcionar uma boa limpeza, deve-se procurar aumentar a velocidade anelar através de:

- diminuição da área anelar; ou
- aumento da vazão do compressor.

Quanto maior forem a taxa de penetração e o diâmetro do furo, mais fluxo de ar será necessário para a remoção dos fragmentos do furo. Com pressão constante, o fluxo de ar ao longo do furo irá cair com o aumento da profundidade. Assim sendo, para que se consiga uma velocidade de saída de ar constante através de quaisquer coluna e profundidade de furo, o compressor usado para a limpeza precisa ser capaz de produzir suficientes níveis de pressão.

A limpeza pode ser a ar ou com água. Normalmente, quando se adota a limpeza a ar, a velocidade de penetração é de 10 a 30% mais elevada. Ela é empregada em trabalhos de superfície, em pequenas profundidades, com tipo de rocha que permita seu uso e ainda quando não existe nenhuma restrição ambiental.

A limpeza com água é utilizada em perfurações mais profundas, em perfuração de certas rochas ou ainda em poços, túneis e galerias ou em qualquer tipo de serviço com restrições ambientais.

Certos casos exigem o uso de uma mistura de água e ar mais um detergente (limpeza à espuma).

A velocidade anelar deve variar de 15 a 30 m/seg com ar comprimido e de 0,5 a 1,0 m/seg com água. A limpeza com água é longitudinal e a pressão de água deve ser de 0,5 a 1,0 kg/cm<sup>2</sup> menor que do ar para evitar danos à perfuratriz.

Vale ainda dizer que uma excessiva pressão de limpeza favorece a formação de uma almofada de água entre o bit e o fundo do furo dificultando a fragmentação da rocha e ocasionando uma menor velocidade de perfuração pela absorção da energia de impacto.



<b>Capacidade do Compressor [m<sup>3</sup>/min]</b>	3,2	5,2	6,5	6,5	9,3	9,3	9,3	9,3
<b>Diâmetro da Haste [mm]</b>	32	38	38	45	45	51	87	100
<b>Diâmetro dos Acoplamentos [mm]</b>	45	55	55	61	61	72	—	—
<b>Diâmetro do Furo de Limpeza [mm]</b>	12	14	14	17	17	21	61	76

<b>Diâmetro do Furo [mm]</b>	<b>Velocidade de Subida do Ar de Limpeza</b>							
51	43	---	---	---	---	---	---	---
64	22	42	52	---	---	---	---	---
76	15	25	32	37	50	---	---	---
89	---	17	21	24	27	36	---	---
102	---	---	15	17	22	24	68	---
115	---	---	---	12	17	18	34	69
127	---	---	---	---	13	15	19	34
140	---	---	---	---	---	---	16	21
152	---	---	---	---	---	---	---	15

Tabela 2 - Velocidade do ar de limpeza em função do tamanho do compressor de ar e do diâmetro da haste em perfuração de superfície

### 3.2. PERFURATRIZ PNEUMÁTICA X PERFURATRIZ HIDRÁULICA

Hoje em dia os fatores a serem levados em consideração na perfuração de superfície são cada vez maiores. Não é suficiente se saber apenas o diâmetro do furo, a carga e os espaçamentos, deve-se também considerar a vizinhança e a fragmentação requerida.

Operadores de perfuratrizes são familiarizados com perfuratrizes pneumáticas sobre esteiras. Elas tem construção simples e são facilmente operadas. Apesar deles estarem acostumados com estas unidades, elas tem como desvantagem um alto consumo de combustível e pequenas taxas de penetração. Fica então a dúvida entre se considerar ou não uma mudança no método.

A escolha entre uma perfuratriz hidráulica ou pneumática é muito mais complexa que uma simples comparação de performance e consumo de combustível. É uma escolha entre dois sistemas muito diferentes. A escolha deve ser baseada na produtividade, na economia e, hoje em

dia, na ergonomia e na mecanização do sistema.

### 3.2.1. EFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO

Se a principal consideração é uma alta velocidade de perfuração, ou seja, uma elevada taxa de penetração, a escolha da perfuratriz hidráulica é óbvia. É possível se alcançar um incremento líquido na produtividade de até 100%.

A taxa de penetração é, no entanto, apenas um dos ingredientes necessários para uma produção eficiente. O sistema de perfuração também precisa ser rápido e eficiente em operações de não-perfuração. A manobra de um furo para o outro bem como o tempo de posicionamento precisam ser reduzidos a um mínimo. O operador precisa de uma coluna que não exija trabalhos manuais. Primordial é a confiança e a disponibilidade do equipamento. Experiências de campo tem mostrado que o equipamento hidráulico é mais confiável.

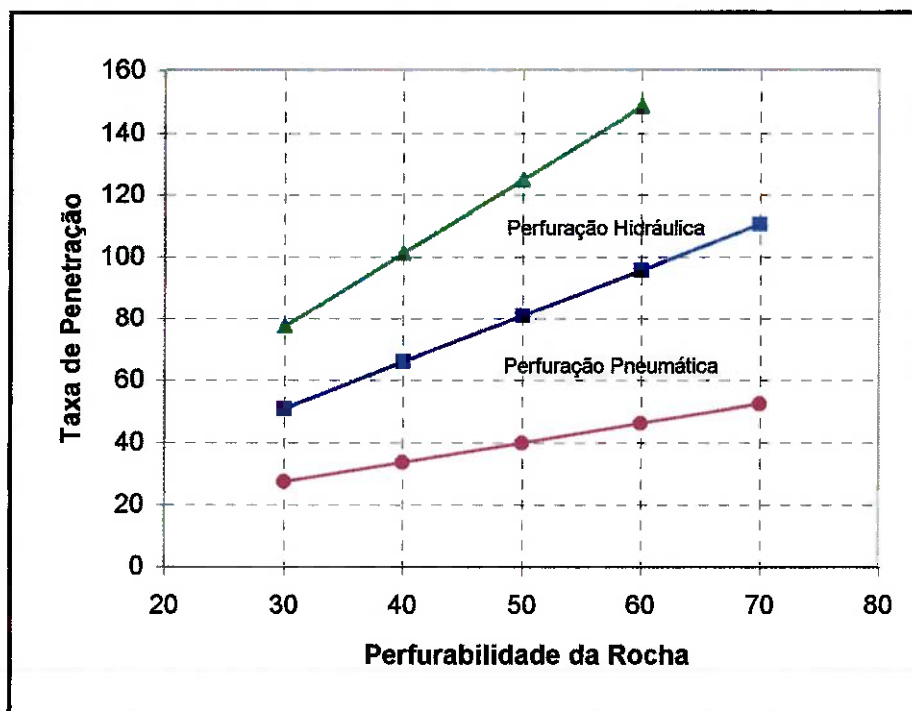


Figura 5 - Taxa de penetração entre perfuratrizes de superfície pneumáticas e hidráulicas

### 2.2.2. ECONOMIA

Com o equipamento hidráulico é possível se combinar perfurações mais rápidas e custos mais

baixos.

Primeiro, custo de energia. A produção de energia hidráulica é simplesmente mais eficiente que a de ar comprimido. Portanto, o tamanho e, conseqüentemente, o requerimento de combustível no equipamento hidráulico é menor. Custos de energia por metro perfurado são frequentemente menores que 1/3 do necessário com sistemas de perfuração pneumáticos.

Segundo, o custo das hastes. A forma do pistão numa perfuratriz determina a forma da onda de choque transmitida à coluna. A forma desta onda determina a fadiga da coluna. A figura abaixo ilustra pistões pneumáticos e hidráulicos típicos e a onda de choque resultante. O resultado é um incremento da vida útil das colunas usadas em perfuratrizes hidráulicas de até 20%.

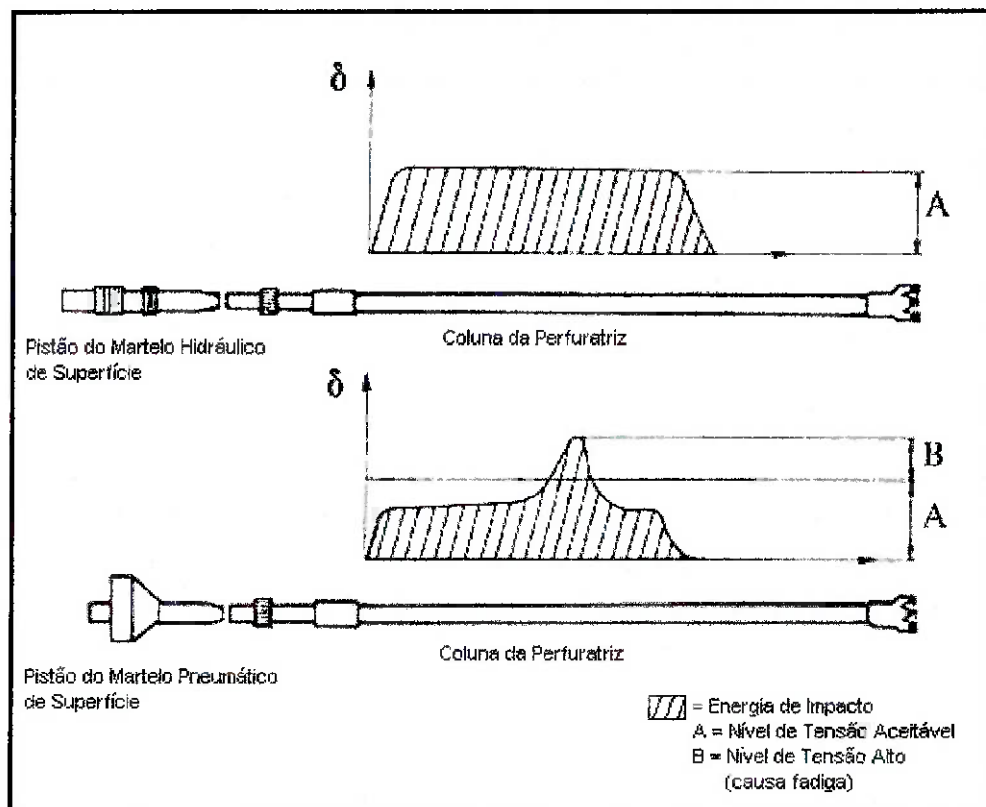


Figura 6 - Forma da onda de choque e níveis de tensão em perfuração de superfície

Terceiro, custos de trabalho. A maior eficiência de perfuratrizes hidráulicas significa que uma menor força de trabalho é requerida.

### 3.2.3. ERGONOMETRIA E MECANIZAÇÃO

Todas as perfuratrizes hidráulicas oferecem, em geral, bons ambientes de trabalho. Automação e

mecanização são relativamente fáceis e disponíveis e isto reduz a fadiga do operador, melhorando a performance. Com o incremento alcançado na taxa de penetração é importante se reduzir as operações de não-perfuração a um mínimo. O usual é se encontrar equipamentos com manuseio manual das hastes em colunas pneumáticas, mas não nas hidráulicas. Tendo-se uma troca automática de hastes, pode-se facilmente se instalar uma cabina de operação. O nível de ruído das perfuratrizes hidráulicas é consideravelmente menor que em perfuratrizes pneumáticas e é equivalente aos níveis alcançados em perfuratrizes de furo abaixo.

### 3.2.4. FACILIDADE DE TRABALHO

Muito frequentemente, a melhoria na perfuração obtida com perfuratrizes hidráulicas são contrariadas por medos relacionados à facilidade de se trabalhar com estas unidades. Há sempre um medo que componentes hidráulicos adicionem dificuldades. Isso não é necessariamente assim, como pode ser ilustrado pela comparação dos principais componentes, mostrado na tabela seguinte.

Principais Componentes	Características de uma Coluna Hidráulica
Carreta	Construção idêntica às colunas pneumáticas, mas com motores hidráulicos ao invés de motores a ar
Bombas Hidráulicas	Equipamento idêntico aos usados para o acionamento do movimento do braço em colunas pneumáticas
Controles Hidráulicos	Como acima
Braço	Como acima
Avanço	Princípio idêntico, mas com uso de um motor hidráulico ao invés de um pneumático

Tabela 3 - Comparação entre unidades de perfuração pneumática e hidráulica

A maior diferença é a própria perfuratriz. Entretanto, se corretamente projetada, ela não irá acarretar dificuldades de manutenção, nem irá ser mais sensível que outros equipamentos hidráulicos usados na mina. Já estão disponíveis equipamentos hidráulicos que operam com sistemas de filtros de 20 $\mu$ .

Uma perfuratriz hidráulica não irá se diferenciar grandemente em seu desenho básico que a pneumática. Do ponto de vista de trabalho a maior diferença é que os retentores de óleo devem ser trocados regularmente como em todos os sistemas hidráulicos. Mas, mesmo assim, a vida de um retentor de óleo no equipamento hidráulico é aproximadamente o dobro da vida da bucha do mandril da perfuratriz pneumática.

### 3.2.5. CONCLUSÕES

Em todos os casos, existem, definitivamente, vantagens operacionais, ambientais e de custos nas operações com perfuratrizes hidráulicas. O equipamento tem sido aprovado na própria produção e é agora largamente aceito como uma ferramenta importante em minas e em construções.

Quando se avalia uma perfuratriz hidráulica ou pneumática para um novo ou existente empreendimento, o seguinte deve ser considerado:

- tamanho da operação;
- tipo da operação;
- tipo de rocha;
- localização geográfica;
- trabalho;
- vida útil esperada do projeto; e
- disponibilidade e custos de energia.

A perfuratriz hidráulica é uma ferramenta necessária em lugares com aumento de serviço, material e custo de energia. No entanto, há sempre um custo inicial de capital mais elevado associado às perfuratrizes hidráulicas. A economia de energia e a alta produção, ano após ano, diminui o custo total de operação muito rapidamente.

### 3.3. MECANISMO DE QUEBRA DA ROCHA NA PERFURAÇÃO

A energia cinética gerada pelo pistão da perfuratriz é transmitida, sob a forma de uma onda de impacto, através da coluna da perfuratriz para a rocha. Essa energia é responsável pela quebra da rocha.

A energia de impacto do pistão multiplicada pela frequência de impacto produz a energia de percussão. A forma e o comprimento da onda vão depender da forma, dimensões e da velocidade do pistão. Essa velocidade está relacionada com o seu curso e a pressão do fluido de acionamento da perfuratriz.

O pistão ao se chocar com o punho gera a onda de impacto que é de compressão e se transmite a uma velocidade de cerca de 5.200 m/s. Quando essa onda atinge o bit, parte se transfere para a rocha e é responsável pela sua quebra, enquanto parte se reflete ainda como onda de compressão. No momento em que não há contato perfeito entre o bit e a rocha, essa onda é transmitida através da coluna como onda de tração (perda de energia).

Descontinuidades na coluna de perfuração, tais como acoplamentos, mudança do tipo de material construtivo e variação das seções retas, causam perda de energia, pois fazem com que a



onda se subdivida nesses pontos sendo uma parte refletida e a outra transmitida para a rocha. Pode-se estimar que a perda de energia em uma coluna de perfuração seja aproximadamente da seguinte ordem: 15% no primeiro terço, caindo para 7% no segundo terço e se estabilizando em 5% na parte final.

Além disso a energia também é consumida devido ao atrito interno do material, fazendo com que haja uma perda de 0,3% por metro de furação, transformada em calor e especialmente significativa se há roscas desgastadas e acoplamentos mal fixados.

O comprimento das ondas de impacto através das ferramentas é presentemente bem conhecido, o que já não ocorre na transmissão dessas ondas na rocha.

Modelos para a quebra da rocha durante a perfuração são difíceis de reproduzir pelos métodos correntes.

Na perfuração, o bit não age sobre a rocha íntegra, a não ser no primeiro golpe, o que mostra a dificuldade de transpor para o caso de perfuração real os resultados de provas de penetração estática ou dinâmica realizados em laboratório.

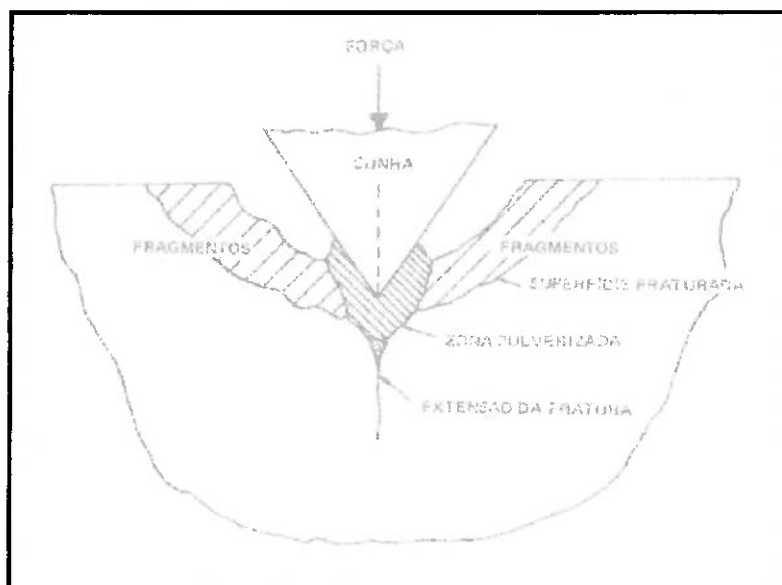


Figura 7 - Modelo físico de penetração

Na vizinhança imediata do bit, a rocha é quebrada em forma de finos (zona pulverizada), como resultado das altas tensões desenvolvidas e que causam deformação, colapso da estrutura da rocha e compactação local.

Uma zona fraturada é também criada ao redor da zona pulverizada. As fraturas se iniciam na delimitação entre as duas zonas e a fragmentação ocorre quando algumas dessas fraturas alcançam a superfície livre da rocha. Neste momento a carga na rocha sofre um decréscimo momentâneo, devido à diminuição ou perda do contato do bit-rocha. A existência de um avanço adequado restabelecerá o contato do bit com a rocha, retomando o processo de quebra. À

medida que a profundidade de penetração aumenta há tendência do aumento do tamanho dos fragmentos e por conseguinte maior força de avanço torna-se necessária.

Para que se reinicie o ciclo de fragmentação, é necessário colocar o bit em uma nova posição. Isto é feito por meio da rotação que posiciona o bit em uma nova superfície da rocha, ainda sã. Além do mais o bit ao girar no fundo do furo, quebra irregularidades localizadas e também pulveriza fragmentos de rocha abaixo dele.

O ângulo de rotação entre dois impactos é função da frequência de impactos e da velocidade de rotação. Por outro lado, depende também da rocha, do diâmetro do furo e da geometria de bit. O efeito da distância entre dois impactos sucessivos na fragmentação de rocha é mostrado na figura abaixo.

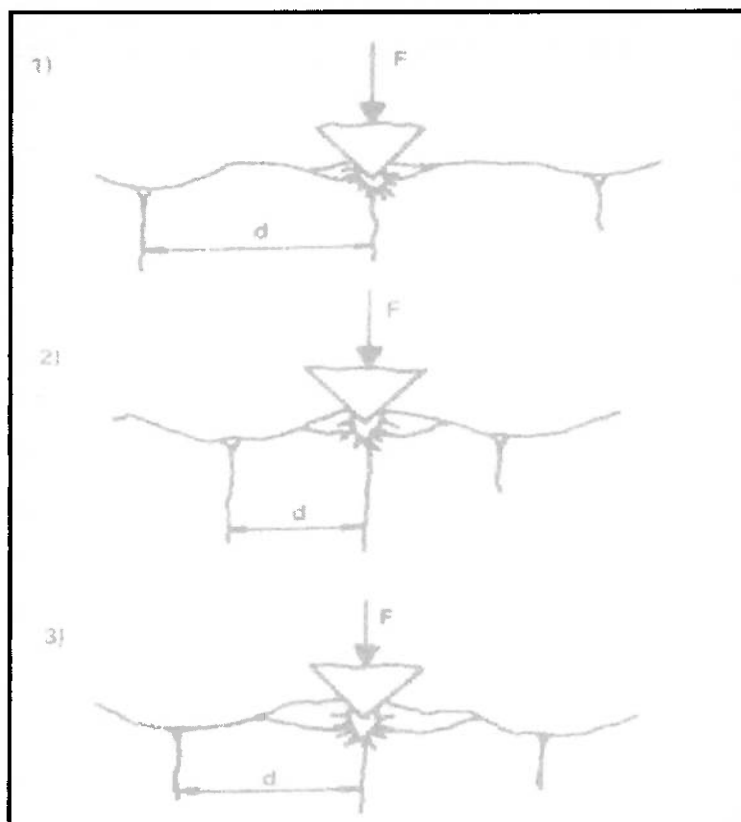


Figura 8 - Efeito da distância entre impactos

Na posição 1 a distância é muito grande, resultando em uma cratera pouco profunda e fragmentação ineficiente.

Na posição 2 a distância é muito pequena, formando-se fragmentos prematuros, com aproveitamento parcial da energia de impactos.

Já na posição 3, com uma distância adequada, é criada uma cratera mais profunda, com fragmentação eficiente.

No decorrer do processo é necessário retirar do furo os fragmentos de rocha, para que o bit

possa atuar numa nova superfície, sem refragmentação, ou seja, sem perda de energia. Essa função auxiliar é feita pela limpeza, por meio de fluidos, como ar ou água.

A quantidade relativa de finos e sua granulometria são parâmetros de consumo de energia envolvida na perfuração. Se a granulometria permanece constante, significa que a perfuração se desenvolve em condições ótimas, já que a razão de finos para o total de rocha fragmentada é pequena.

### 3.4. USO DAS PERFURATRIZES DE SUPERFÍCIE

Perfuratrizes de superfície são utilizadas no mundo inteiro em pátios de construção, pedreiras e minas a céu aberto para perfurar rochas moles a duras com diâmetros de furo de 22 a 254 mm (7/8" a 10").

Elas podem ser classificadas pelo tamanho e grau de mecanização do seguinte modo:

- perfuratrizes manuais;
- pacotes de perfuratrizes para tratores;
- perfuratrizes sobre pneus; e
- perfuratrizes sobre esteiras.

A energia cinética de saída de uma perfuratriz de superfície e sua faixa de aplicação geralmente determinam seu tamanho e grau de mecanização. Assim, quando o diâmetro do furo e a profundidade aumentam, a energia de saída da perfuratriz e o tamanho das hastes aumentam.

#### 3.4.1. PERFURATRIZES MANUAIS

Nas seguintes operações se costuma utilizar perfuratrizes manuais:

- furos de pequenos diâmetros (22 a 34 mm);
- alturas de bancadas pequenas;
- áreas de trabalho pequenas, onde a quantidade de perfuração é pequena; e
- áreas ou parte delas onde se tem condições ruins de piso.

Perfuratrizes manuais são ferramentas desenhadas para perfuração de furos de pequenos diâmetros e para perfurações rasas ou de pequenas quantidades.

Devido ao tempo dispensado em perfurações com estas perfuratrizes, pois elas tem pequena energia de percussão e de avanço, elas são somente usadas quando o uso de equipamentos maiores é impraticável ou antieconômico. Nas perfuratrizes manuais o avanço é conseguido pelo peso do operador ou por um peso extra colocado na própria perfuratriz. Entretanto, a pressão



de avanço nessas perfuratrizes também pode ser obtida por meio de dispositivos.

Em um destes dispositivos, avanço de coluna (*jack-leg, air-leg*) a perfuratriz se apóia em um pistão que se desloca por ação de ar comprimido, no interior de um cilindro, fornecendo assim a pressão de avanço para a perfuração.

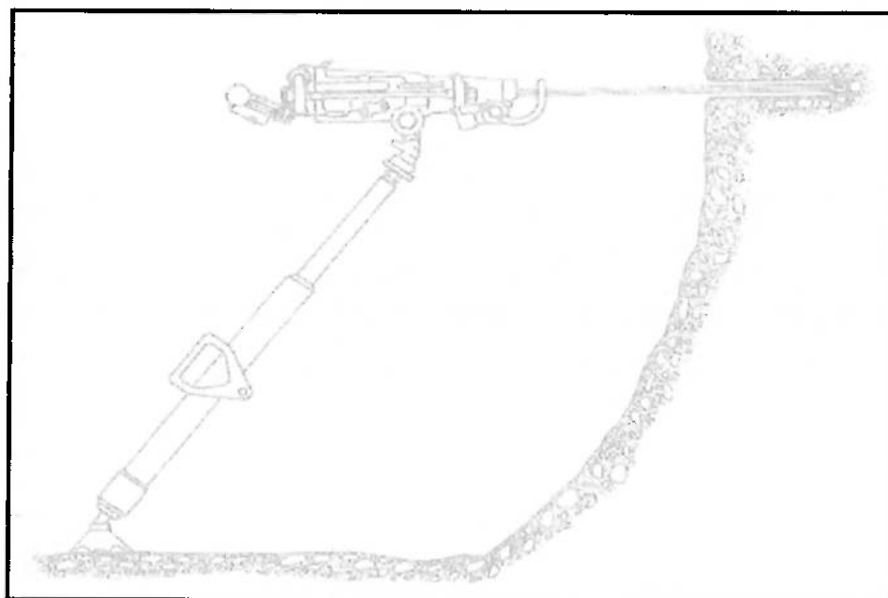


Figura 9 - Perfuratriz com avanço de coluna

Perfuratrizes manuais usam hastes integrais de 400 a 600 mm de comprimento. Elas são arrançadas em série onde o diâmetro do furo diminui com o aumento do tamanho da haste para prevenir encravamento das hastes no furo.

Intervalo de Diâmetro de Furo	22 - 45 mm
Diâmetro das Hastes Integrais	19 - 25 mm
Profundidade do Furo	até 6 m
Peso da Perfuratriz	10 - 30 kg
Taxa de penetração*	0,15 - 0,25 m/min

\* para furo de 35 mm em granito médio-duro

Tabela 4 - Características típicas das perfuratrizes manuais

Perfuratrizes manuais são tradicionalmente pneumáticas. A energia é provida por um compressor de ar portátil ou por uma unidade compressora sobre carreta.

Hoje em dia tem-se, também, perfuratrizes manuais hidráulicas. Elas tem mostrado sua

superioridade sobre as pneumáticas especialmente em fatores como estes:

- consumo de combustível;
- custos das hastes;
- eficiência de saída; e
- condições de trabalho.

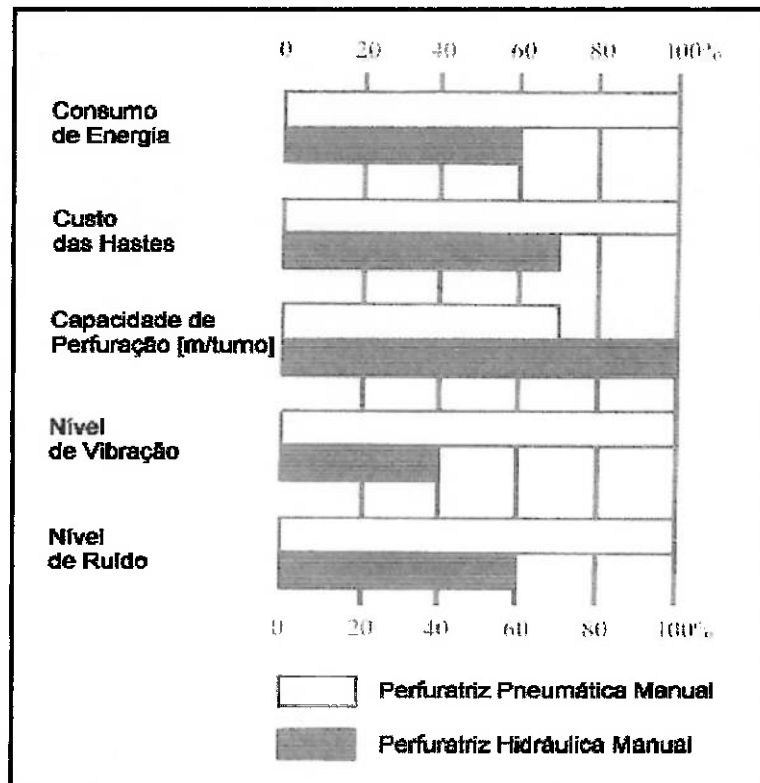


Figura 10 - Perfuratriz manual pneumática x hidráulica

Além de menores custos operacionais e melhor eficiência de saída, perfuratrizes manuais hidráulicas oferecem sua superioridade no ambiente de trabalho. Menores vibrações e níveis de ruídos e a ausência do ar de exaustão contribuem para aumentar a eficiência do operador.

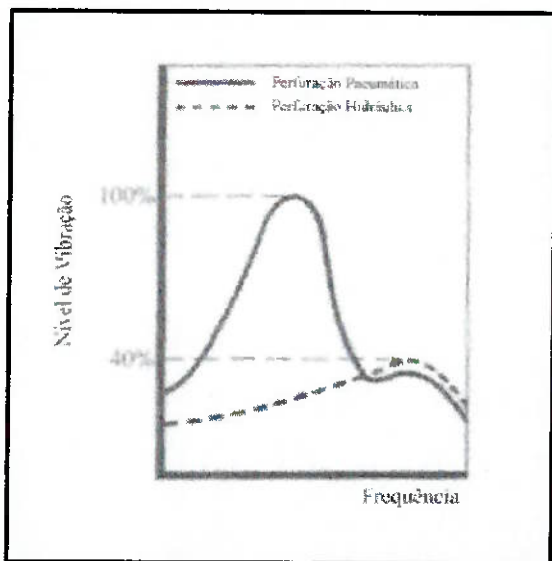


Figura 11 - Nível de vibração em perfuração manual

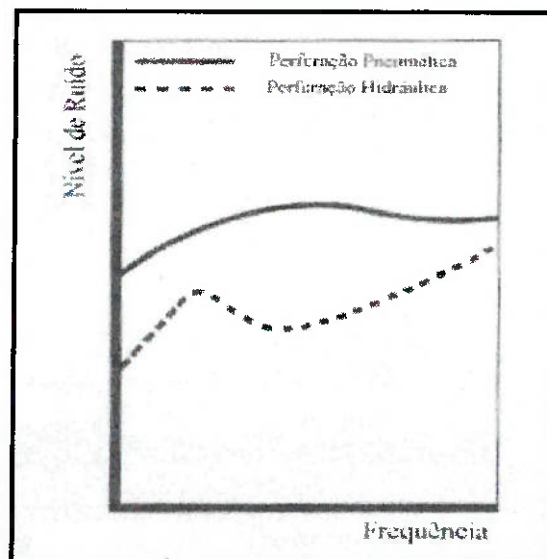


Figura 12 - Nível de ruído em perfuração manual



Figura 13 - Perfuratriz hidráulica manual

### 3.4.2. PACOTES DE PERFURATRIZES PARA TRATORES

Perfuratrizes manuais mais pesadas são ferramentas equipadas com dispositivos de avanço montados sobre braços para que se atinja uma maior força de avanço. Como estes dispositivos de avanço, que são normalmente avanço sobre correntes, tornam o sistema muito pesado para transporte manual, eles são montados sobre o braço de uma retroescavadora, ou sobre uma carreta leve com propulsão, ou sobre uma carreta que possa ser rebocada. Isso facilita o acesso a praças de perfuração acidentadas e inclinadas. A flexibilidade da operação depende da versatilidade do braço e o avanço é normalmente ajustado de acordo com as condições da rocha para se obter a máxima penetração.

Pacotes de perfuratrizes mecanizadas hidráulicas não exigem unidade de acionamento externa, assim como a requerida taxa de escoamento do óleo pode ser produzida pelo sistema hidráulico da carreta.

O compressor requerido para a limpeza ( $1$  a  $3 \text{ m}^3/\text{min.}$ ) é menor em tamanho e em potência requerida e pode, portanto, facilmente ser conectado na carreta. Controladores da perfuração podem ser montados na cabina da carreta. Isso faz com que a operação seja mais eficiente e segura. O operador não é afetado pelo barulho nem pela vibração e pode trabalhar por períodos mais longos continuamente.

Um pacote de perfuratriz hidráulica projetada para ser fixada no braço de uma retroescavadora consiste nos seguintes componentes:

- perfuratriz hidráulica;
- avanço sobre correntes para hastes de até 4,8 m de comprimento;
- retentor de hastes com controle remoto;
- suporte para o avanço sobre correntes;
- braço giratório;
- coletor de pó;
- compressor de ar para limpeza, lubrificação do punho e coletor de pó; e
- painel de controle.

Existem várias colunas de perfuratriz deste tipo usadas em trabalhos onde um equipamento mais pesado é caro demais para se investir e onde apenas produções menores são requeridas. Estas máquinas são usadas para diâmetros de furo de 22 a 89 mm, com hastes integrais ou seccionadas de 19 a 38 mm.

As aplicações destas unidades são em:

- construção de estradas;
- preparação de fundações;
- perfuração de trincheiras; e
- perfuração secundária.



Figura 14 - Pacote de perfuratriz para trator para furos de diâmetro de 27 a 51 mm

#### 3.4.3. PERFURATRIZES SOBRE PNEUS

Perfuratrizes de superfície sobre pneus (*wagon drills*) são projetadas para perfurações de bancadas com diâmetros de furo de 27 a 64 mm em pequenos pátios de construção ou pequenas pedreiras. Elas são acionadas por ar comprimido de um compressor portátil sobre carreta rebocável no local de trabalho.

O avanço sobre correntes pneumático é posicionado manualmente no local a ser perfurado e a base sobre pneus é mecanicamente levantada por uma manivela manual para a perfuração.

Estes equipamentos são usados em pequenas pedreiras onde o investimento em outros mais pesados não podem ser justificados ou a quantidade de perfuração é tão pequena que a produção pode ser atingida com tal equipamento. A maioria das perfuratrizes sobre pneus podem, alternativamente, ser equipadas com uma cabeça rotativa para perfuração de furo abaixo.

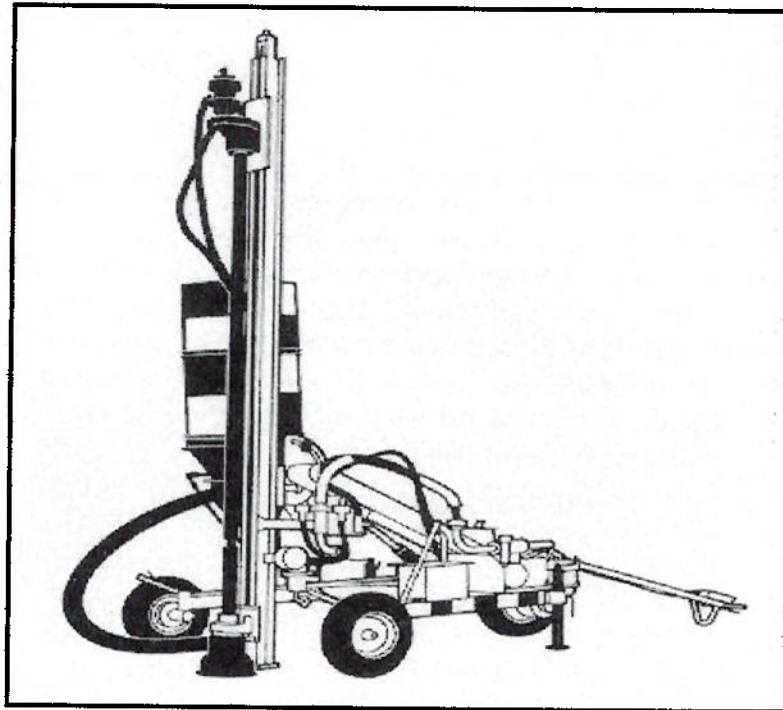


Figura 15 - Perfuratriz sobre pneus para perfurações  
leves em bancadas

#### 3.4.4. PERFURATRIZES SOBRE ESTEIRAS

A mecanização é o único caminho para se aumentar a produção em perfurações de bancadas. Por isso as perfuratrizes sobre esteiras (*crawler drills*) tem se tornado o tipo mais popular das máquinas de perfuração de superfície no mundo.



Uma típica perfuratriz sobre esteiras de superfície consiste nos seguintes componentes:

- perfuratriz;
- avanço sobre correntes com um retentor de aço ou trocador de hastes;
- braço;
- base de esteiras oscilante;
- acionamento por motor diesel, bomba hidráulica e compressor de ar para a limpeza; e
- sistema de controle.

Uma perfuratriz sobre esteiras de superfície moderna deve preencher as seguintes exigências, para fazer com que a operação seja produtiva e econômica:

- alta taxa de penetração;
- tempo de ciclo baixo;
- boa qualidade dos furos;
- alta disponibilidade; e
- baixos custos operacionais.

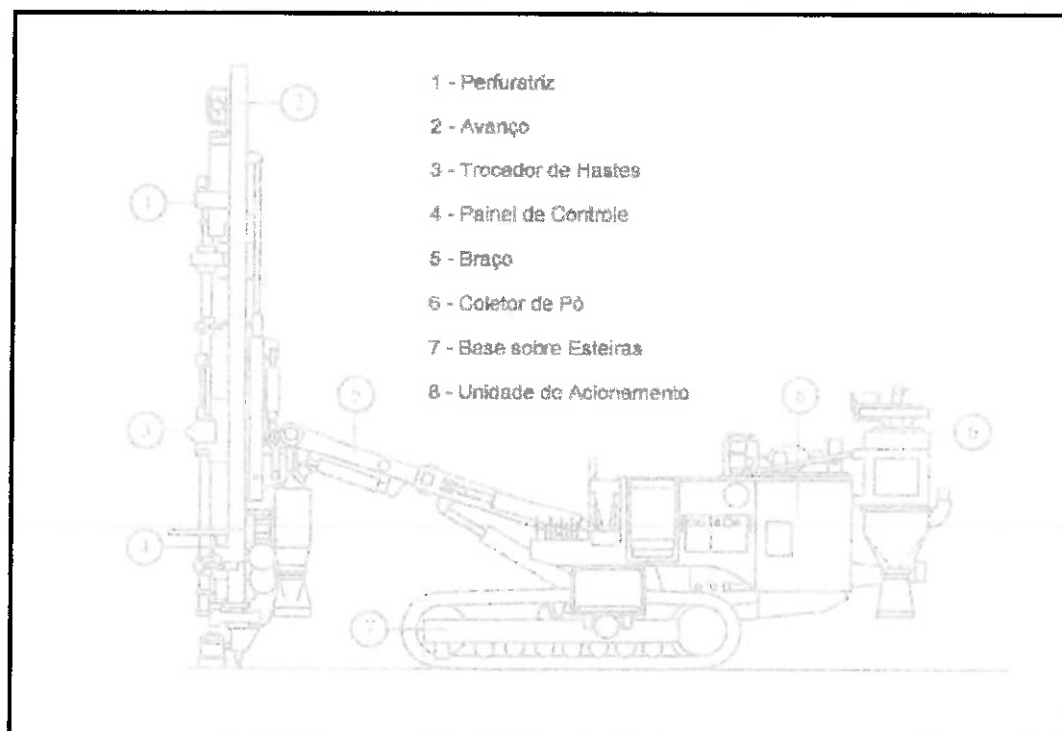


Figura 16 - Principais componentes de uma unidade de perfuração de bancadas

#### 3.4.4.1. ALTA TAXA DE PENETRAÇÃO

Uma alta taxa de penetração só pode ser alcançada se o projeto da perfuratriz (dinâmica entre pistão e percussão) é otimizado com a haste em mente para possibilitar a máxima transferência de energia para a quebra da rocha sem prejudicar a haste.

Bons projetos de perfuratrizes também incluem a otimização do quociente entre energia de entrada e de saída. A limpeza do furo é um parâmetro que influí muito na taxa de penetração. Como apenas uma determinada quantidade de ar pode ser impulsionado através de determinada haste, é importante que o compressor seja selecionado para combinar as hastes, o diâmetro do furo e a profundidade do furo normalmente usados pela perfuratriz.

#### 3.4.4.2. PEQUENO TEMPO DE CICLO

Equipando-se a perfuratriz com uma base móvel, incluindo um compressor de ar para a limpeza, se minimiza o tempo consumido na movimentação da coluna de um furo para outro. Com um braço versátil mais furos podem ser perfurados por um mesmo alinhamento da coluna e o alinhamento do avanço para a correta inclinação é mais rápido. Colunas mecanizadas trabalhando com trocadores de hastes torna mais fácil e rápida a troca, especialmente quando se tem hastes de extensão mais pesadas.

Uma cabina de operação ajuda na perfuração pela motivação que ela proporciona ao operador.

A experiência tem mostrado que normalmente apenas 35% do tempo de trabalho é usado para a penetração da rocha nas bancadas. Perfuratrizes equipadas com as facilidades acima citadas podem facilmente fazer com que se tenha penetração da rocha em até 65% do tempo de trabalho.



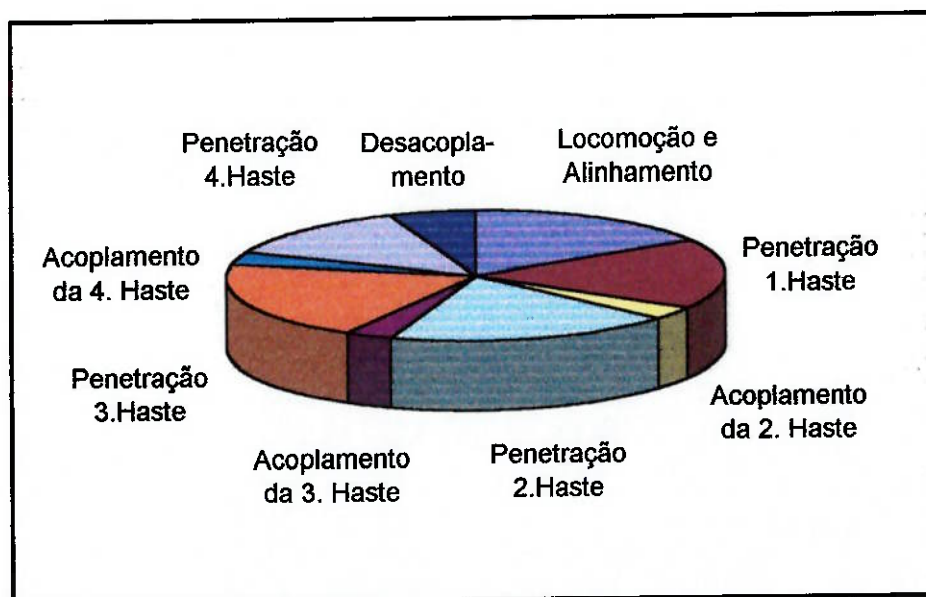


Figura 17 - Típico ciclo de perfuração eficiente

### 3.4.4.3. BOA QUALIDADE DOS FUROS

Normalmente, quando se calcula o plano de fogo da bancada, deve-se considerar um desvio do furo de 3 a 5%. O que causa este desvio são os erros de emboque e de alinhamento e as estruturas da rocha.

Erros de emboque e de alinhamento podem ser minimizados com o uso de braço versátil e adequados indicadores de ângulos, mas o endireitamento do furo só pode ser conseguido utilizando-se as hastes mais duras possíveis.

A haste de maior diâmetro para um determinado diâmetro de furo irá manter a penetração na direção correta, as paredes estáveis e limpas e aumentar a limpeza do furo.

### 3.4.4.4. ALTA DISPONIBILIDADE

Para se conseguir um ótimo tempo de perfuração o sistema de perfuração tem de ser simples para poder ser utilizado em condições normais de trabalho pelo pessoal. Isso vale para a perfuratriz e para a carreta. Uma grande disponibilidade de objetos reserva é garantida quando os componentes são largamente usados em várias partes do mundo.

#### 3.4.4.5. BAIXOS CUSTOS DE OPERAÇÃO

Custos de operação de perfuratrizes incluem hastes, trabalho, combustível e custos de manutenção. Custo de hastes é minimizado com a correta combinação entre perfuratriz e hastes. Isso garante uma elevada vida útil da haste. Os custos de trabalho podem ser minimizados fazendo-se a coluna independente das outras fontes de energia. Um homem sozinho deve ser capaz de operar a coluna. Custo de combustível é otimizado pela escolha de um motor diesel de tamanho ideal para o acionamento da perfuratriz. Custos de manutenção são minimizados quando a disponibilidade do sistema de perfuração é a mais alta possível.

#### 3.4.4.6. PERFURATRIZES HIDRÁULICAS

A experiência tem mostrado que o futuro na perfuração em bancadas é realmente o uso de equipamento hidráulico. Uma perfuratriz hidráulica pode normalmente substituir 2 ou 3 unidades pneumáticas, e ainda tem um custo por metro perfurado que é da ordem de metade das pneumáticas.

As perfuratrizes hidráulicas projetadas para a perfuração de bancadas com diâmetros de furo de 35 a 151 mm são da classe de potência de 10 a 22 kW e perfuratrizes de superfície usadas em perfurações de 152 a 251 mm de diâmetro de furo demandam uma energia cinética de saída de 35 a 70 kW. A energia cinética que pode ser transmitida para a penetração é principalmente restringida pela coluna disponível para a perfuração.

Perfuratrizes hidráulicas são montadas em avanços sobre correntes que podem manusear hastes de até 6 m de comprimento.

Trocadores de hastes são necessários sempre que hastes de diâmetro de 38 mm ou mais são usadas. Ao invés de erguer centenas de quilos de hastes por dia o operador faz a adição e o desacoplamento das hastes com um trocador automático simplesmente operando controladores hidráulicos. Trocadores de hastes podem armazenar hastes para perfurações de mais de 30 m de profundidade.

Os braços podem ser telescópicos, fixos ou articulados. O uso tem mostrado que os telescópicos dão a melhor performance, visto que:

- vários furos podem ser feitos com um mesmo alinhamento da coluna;
- marcar o furo e alinhar o avanço é rápido e fácil com a extensão do braço; e
- é robusto o suficiente para suportar um trocador de haste.

Braços articulados são usados comumente em perfurações hidráulicas leves em terrenos acidentados.

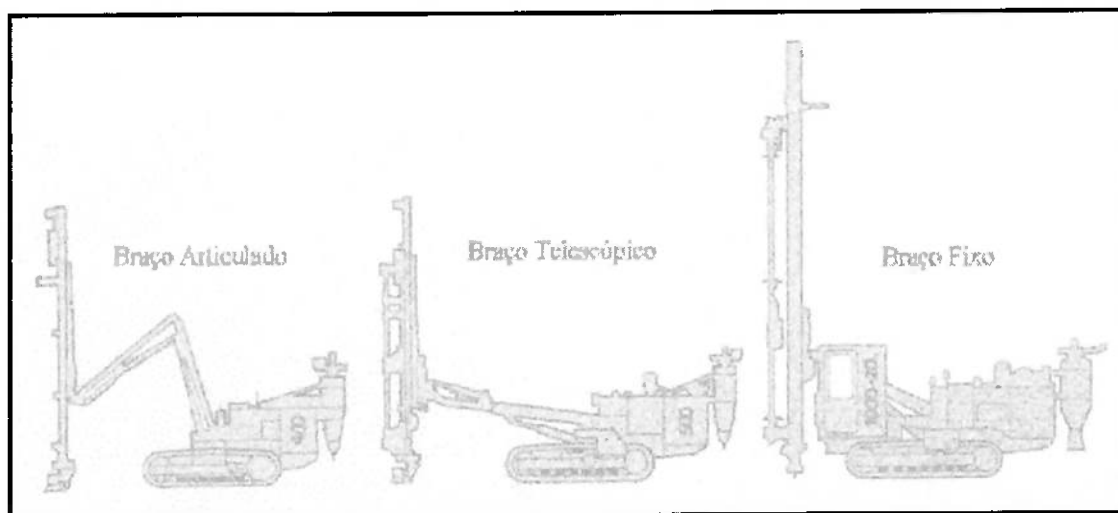


Figura 18 - Tipos de braços para colunas de perfuração em bancadas

A unidade de acionamento das perfuratrizes consiste num motor diesel que aciona um compressor de ar para a limpeza e uma caixa de câmbio e embreagem. Seu tamanho é normalmente determinado pela aplicação da coluna de perfuração; diâmetros de furos maiores precisam ser perfurados por hastes e perfuratrizes mais pesadas e mais ar é necessário para a limpeza do furo.

Os sistemas de controle em perfuratrizes de superfície são usualmente hidráulicos, visto que a experiência tem mostrado que estes são o sistema mais simples e portanto de manutenção fácil na praça de trabalho.

As principais características de um sistema de controle moderno inclui, por exemplo:

- sistema anti-encravamento automático; e
- controle automático de limpeza.

Ultimamente tem se dado mais atenção à segurança e higiene de trabalho em perfuração de bancadas. Coletores de pó são, hoje em dia, equipamentos padrões em perfuratrizes de superfície hidráulicas. O princípio é o de sugar o pó da boca do furo por um vácuo produzido pelo ventilador do coletor de pó. A corrente de ar succionada criada é, normalmente, três vezes a da corrente de ar produzida para a limpeza para assegurar uma coleta eficiente do pó. Partículas mais grosseiras são separadas num ciclone primário e somente as mais finas serão succionadas para o coletor principal. O pó é então coletado na superfície de filtros que são automaticamente limpos por sopro durante a troca de hastes e manobras da coluna.

Cabinas tem sido usadas muitas vezes em equipamentos mais pesados, e a tendência é a de se usa-las também em equipamentos mais leves. Cabinas modernas são a prova de som com níveis de ruído no interior de aproximadamente 80 dBA. Elas também tem aquecedores ou ar condicionado e todos os controles do equipamento de perfuração estão em seu interior.

Faixa de Diâmetro do Furo [mm]	Diâmetro da Haste de Perfuração [mm]	Potência da Perfuratriz [kW]	Potência da Unidade de Acionamento [kW]	Peso da Máquina [t]	Capacidade de Perfuração [Mm³/ano]
27 - 45	19 - 25	6 - 8	20	2	0,2
35 - 76	25 - 32	8 - 12	80	8	0,4
51 - 89	32 - 38	12 - 15	110	10	0,5
64 - 102	38 - 45	15 - 18	125	11	0,6
89 - 152	45 - 100	18 - 22	180	14	1,0
140 - 178	127	35	250	32	2,0
178 - 251	152 - 165	70	450	65	3,0

Tabela 5 - Perfuratrizes de superfície hidráulicas no mercado

#### 3.4.4.7. PERFURATRIZES PNEUMÁTICAS

Perfuratrizes pneumáticas sobre esteiras são normalmente equipadas com bases leves ou médias a pesadas, e os tipos de braços são os fixos, os articulados e os telescópicos. Essas perfuratrizes são convenientes para hastes de diâmetros de 23 a 85 mm em pequenos pátios de construção ou pedreiras onde a quantidade total de perfuração não é muito grande. Perfurações de grandes diâmetros são restritas principalmente pelo fato de que as colunas são muito pesadas para um manuseio manual e pelo fato de que os sistemas pneumáticos não são facilmente mecanizáveis ou automatizáveis.

A performance de uma perfuratriz de braço duplo é normalmente de 40 a 50% maior que uma equipada com braço único. As com braço duplo são, no entanto, disponíveis somente em unidades mais leves, tendo como fator restritivo o consumo total de ar da perfuratriz. Perfuratrizes pneumáticas com braço duplo são designadas para perfurações com diâmetro de furo de 27 a 64 mm enquanto que as versões com braço único para diâmetros de furo de 51 a 89 mm. Perfuratrizes pneumáticas sobre esteiras leves tem sido usadas para cortes de rodovias, perfurações de trincheiras, preparação de fundações e outras onde a altura das bancadas é relativamente baixa (3 a 10 m). Unidades mais pesadas tem sido usadas na perfuração em pedreiras com diâmetros de furo de 51 a 85 mm e alturas de bancadas de até 20 m.

Perfuratrizes pneumáticas sobre esteiras usam ar comprimido para a perfuratriz, para o avanço sobre correntes, para o motor elétrico e para o coletor de pó, enquanto os braços e os sistemas de oscilação são acionados hidráulicamente por uma pequena unidade de acionamento a bordo.

O consumo de ar das perfuratrizes pneumáticas varia de acordo com o tamanho do martelo e a faixa de aplicação. Perfuratrizes leves podem ser acionadas por um compressor de ar de 15 a 20 m<sup>3</sup>/min (7 bar) enquanto as mais pesadas requerem até 25 m<sup>3</sup> de ar por perfuratriz. Comparadas com as perfuratrizes hidráulicas projetadas para a mesma faixa de diâmetro de furo, o custo de energia é normalmente três vezes maior.

Tipo de Haste	Seção da Haste	Diâmetros de Haste (mm)	Diâmetros de Furo (mm)
Integral	Hexagonal	19, 22, 25	22 - 45
Secionada	Hexagonal, Circular	25, 28, 32, 38, 45, 51	38 - 127
Tubo	Circular	76, 87, 100, 127, 152, 165	89 - 251

Tabela 6 - Uso dos diferentes tipos de hastes em perfuração de superfície

### 3.5. TIPOS DE BROCAS

#### 3.5.1. BROCA INTEGRAL

É uma peça única, de aço especial, perfil sextavado, dotada de um furo longitudinal e composta de punho, colar, haste e coroa.

O comprimento útil é a soma dos comprimentos do colar, da haste e da coroa.

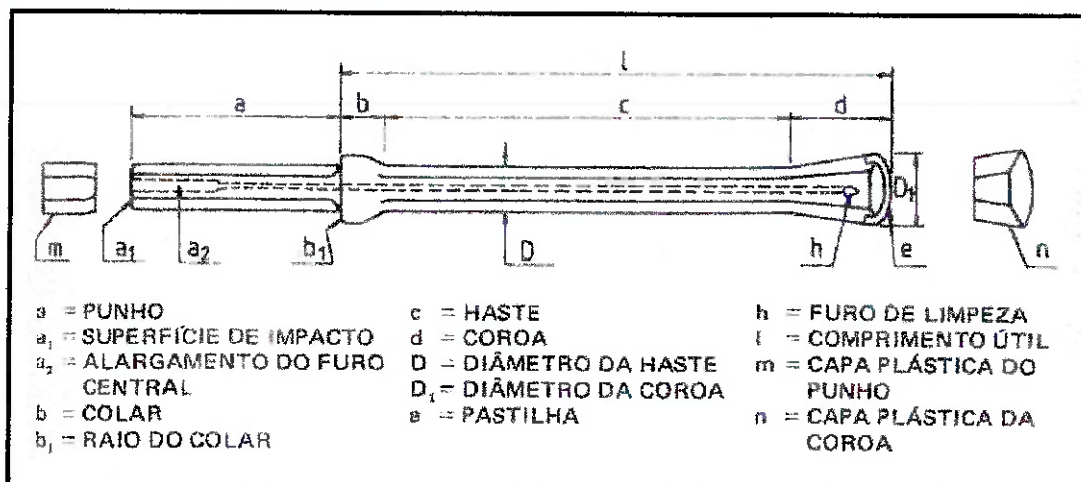


Figura 19 - Broca Integral

As de punho longo (108mm) oferecem melhor alinhamento ao conjunto perfuratriz-broca.

Na coroa é inserida uma pastilha de metal duro (carboneto de tungstênio e cobalto). O carboneto de tungstênio determina a dureza da pastilha. Quando maior seu teor, maior a dureza e a resistência ao desgaste, sendo, no entanto, menores a tenacidade e a resistência a choques. O cobalto, em contrapartida, determina a tenacidade da pastilha. Altos teores representam altas tenacidade e resistência ao impacto, em detrimento da resistência ao desgaste.

#### 3.5.1.1. VIDA ÚTIL

É difícil a previsão da vida útil da ferramenta, dada a complexidade dos fatores com influência em sua duração. Para se tirar o máximo proveito na operação com a broca integral deve-se ter conhecimento destes fatores, que são:

- tipo e estrutura da rocha;
- manuseio e armazenamento da broca;
- características da perfuratriz;
- estado de conservação da perfuratriz;
- operação da perfuratriz; e
- cuidados com a afiação da broca.

Apenas como indicação, pode-se adotar como vida útil da broca integral valores de 100 a 200 m quando se perfura granito.

#### 3.5.2. EQUIPAMENTO SECCIONADO

Permite:

- realização de furos com diâmetro acima de 42 mm;
- profundidades de perfuração superiores a 6,4 m;
- maior facilidade para uso em locais confinados; e
- maior mecanização do serviço de desmonte.



### 3.5.2.1. ROSCAS

A função da rosca é atender a objetivos conflitantes:

- manter o equipamento seccionado bem fixado quando em serviço, pois uma má fixação é responsável tanto pela perda de energia e diminuição da velocidade de perfuração quanto pelo superaquecimento nas áreas acopladas; e
- fazer com que a operação de desacoplamento se processe fácil e rapidamente.

Existem dois tipos de roscas:

- rosca corda ( diâmetros de até 32 mm); e
- rosca FI ( diâmetros maiores que 38 mm).

### 3.5.2.2. COMPONENTES

O equipamento seccionado é composto por:

- punho;
- luva;
- haste; e
- coroa ou bit.

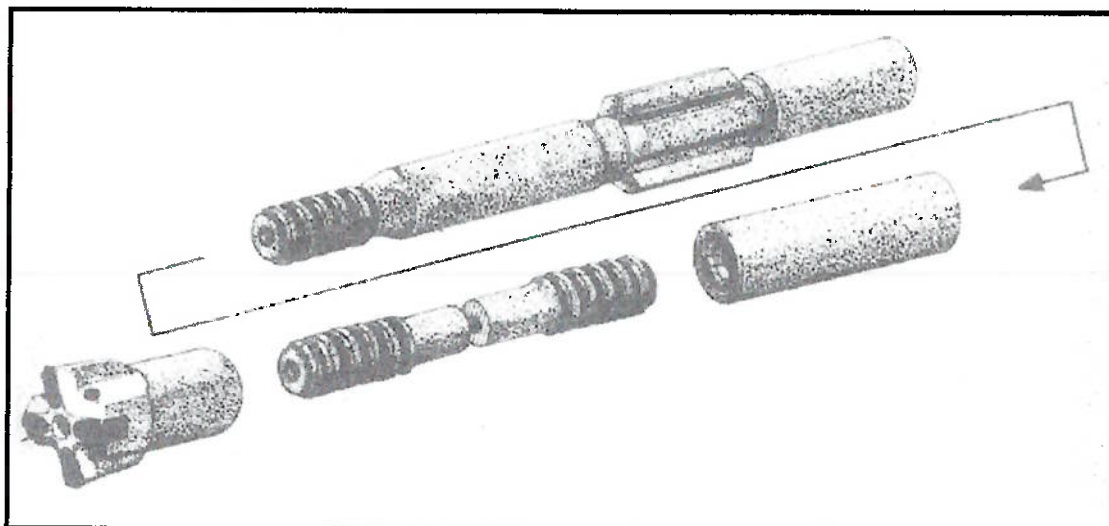


Figura 20 - Componentes do equipamento seccionado

### 3.5.2.2.1. PUNHO

Existem dois tipos principais de punhos:

- com alimentação longitudinal; e
- com alimentação lateral.

Punhos com alimentação longitudinal são utilizados em perfurações onde as pressões requeridas de limpeza são as usuais, ou seja, de 6 a 7 kg/cm<sup>2</sup>.

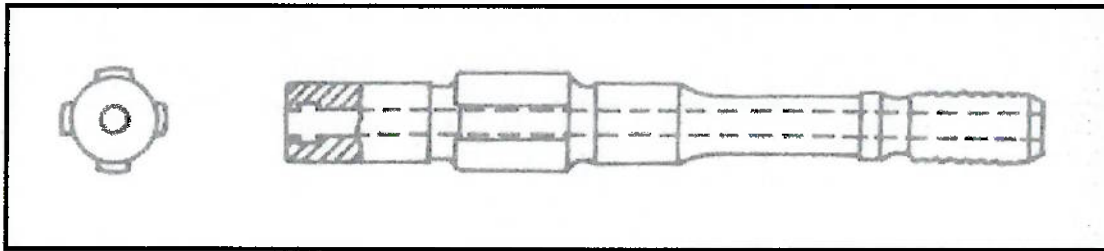


Figura 21 - Punho com alimentação longitudinal

Quando se necessita de pressões de limpeza mais elevadas (até aproximadamente 12 kg/cm<sup>2</sup>) faz-se necessário o uso de punhos com alimentação lateral.

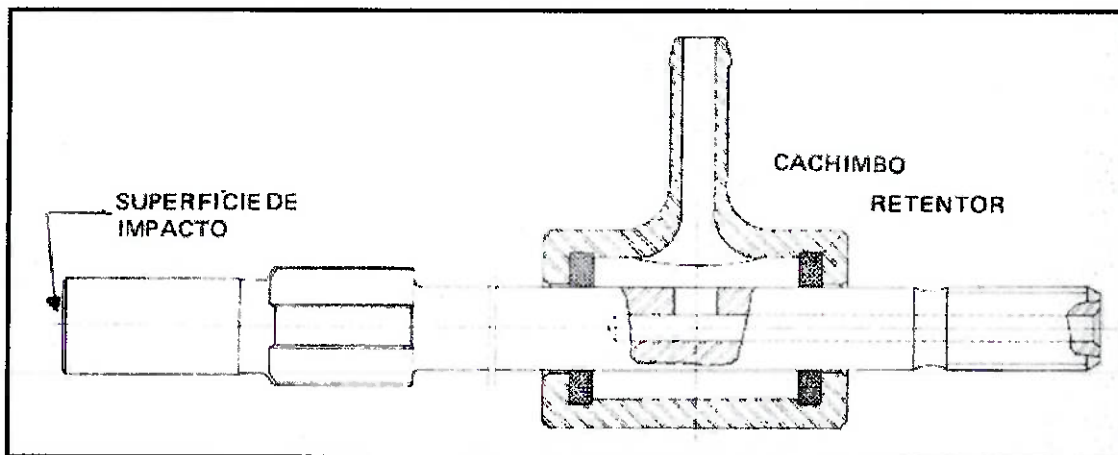


Figura 22 - Punho com alimentação lateral

### 3.5.2.2.2. LUVA

A luva é o elemento de ligação. Um acoplamento perfeito impede dissipação de energia.



### 3.5.2.2.3. HASTE

Os tipos de hastes mais utilizadas são:

- hexagonal;
- hexagonal recalcada;
- circular; e
- circular dupla ou tandem.

A hexagonal recalcada tem como vantagem ser mais leve que a circular com mesmo diâmetro de rosca.

As circulares tem, para um mesmo diâmetro de rosca, diâmetros de furo de limpeza maiores que nas hexagonais.

Aqui vale um parêntese para se falar sobre um tipo especial de haste, a haste-tubo. Este tipo de haste viabiliza uma alternativa para perfurações de grande diâmetro com perfuratrizes de superfície sem o uso de máquinas rotativas. O emprego desta haste-tubo associada à perfuratriz de superfície a percussão proporciona as seguintes vantagens, se comparada à perfuratriz rotativa (bit tricônico):

- maior velocidade de perfuração;
- maior vida útil do bit;
- construção mais simples do bit;
- possibilidade de perfuração inclinada; e
- operação com menor pressão de avanço.

Quanto aos diâmetros menores de perfuração, com relação às hastes convencionais, teriam as seguintes vantagens:

- limpeza mais eficiente devido à menor área anelar;
- maior rigidez na coluna proporcionando melhor alinhamento;
- menos perdas de energia de percussão em virtude da ausência de luvas, ou seja, mudança brusca de seção na coluna; e
- menor número de manobras da coluna em virtude do maior comprimento da haste-tubo.

#### 3.5.2.2.4. COROA OU BIT

Quanto à forma das pastilhas, as coroas podem ser classificadas em:

- coroas em bisel; e
- coroas em botões.

As coroas em bisel apresentam 4 pastilhas em forma de bisel.

As coroas em botões tem número mais elevado de pastilhas, de 6 a 16, e são em forma de cilindros de metal duro com forma esférica em uma das extremidades. Pela inexistência de soldagem nestas coroas, pode-se utilizar pastilhas com teores mais elevados de carboneto de tungstênio (maior resistência ao desgaste). A disposição dos botões faz com que a coroa em botão quebre a rocha com mais eficiência. Vantagens das coroas em botões com relação às convencionais:

- maior velocidade de penetração;
- perfuração mais suave com menos desgaste na coluna de perfuração e na perfuratriz;
- melhor disposição do material desagregado, possibilitando melhor limpeza;
- menor tendência de prender a coroa;
- melhor acabamento do furo;
- maior dureza das pastilhas;
- maior vida útil; e
- maior intervalo entre as afiações.

As desvantagens são:

- tendência de maiores desvios, principalmente em formações rochosas fraturadas;
- maior desgaste em certos tipos de rochas; e
- processo manual de afiação, exigindo mais habilidade do operador, se bem que já existem máquinas semi-automáticas de afiação no mercado, embora de custo inicial elevado.

De modo geral pode-se dizer que as coroas em botões são direcionadas para rochas duras e abrasivas e as coroas convencionais para rochas macias e fraturadas.

O diâmetro do bit deve ser no mínimo 6,5 mm (1/4") maior que o diâmetro da luva.

A diferença deve assegurar que os fragmentos desagregados tenham passagem para serem retirados do furo, prevendo-se ainda uma folga para levar em conta o desgaste do bit.

Deve-se ter em mente que diâmetros de furo muito grandes em relação ao diâmetro da luva causam vibrações que prejudicam o contato com o fundo do furo, comprometendo a precisão e o alinhamento.

## 4. PERFURATRIZES DE FURO ABAIXO

### 4.1. PRINCÍPIO DA PERFURAÇÃO DE FURO ABAIXO

No método de furo abaixo (*down the hole*) as coroas se acoplam a perfuratrizes que se deslocam ao longo do furo na medida em que a perfuração se desenvolve, enquanto os sistemas de rotação e de avanço permanecem fora do furo.

A combinação perfuratriz-coroa no interior do furo melhora o rendimento da perfuração pelo melhor aproveitamento da energia de percussão. Como praticamente não há perdas desta energia, pode-se dizer que a velocidade de penetração é quase que constante e menos afetada pela profundidade, fato este que não ocorre com a perfuratriz de superfície.

Como a perfuratriz acompanha a coroa ao longo da perfuração, o diâmetro do seu pistão deve ser menor que o diâmetro do furo. Sabendo-se que a energia de percussão é diretamente proporcional ao quadrado do diâmetro do pistão, torna-se claro que inicialmente a velocidade da perfuratriz de superfície é maior, uma vez que usualmente neste caso o diâmetro do pistão é maior que o do furo.

Porém, a medida que são introduzidas novas hastes na perfuratriz de superfície, aumenta-se a perda de energia nos acoplamentos, sem contar os problemas de limpeza, que implicam numa queda da velocidade de penetração.

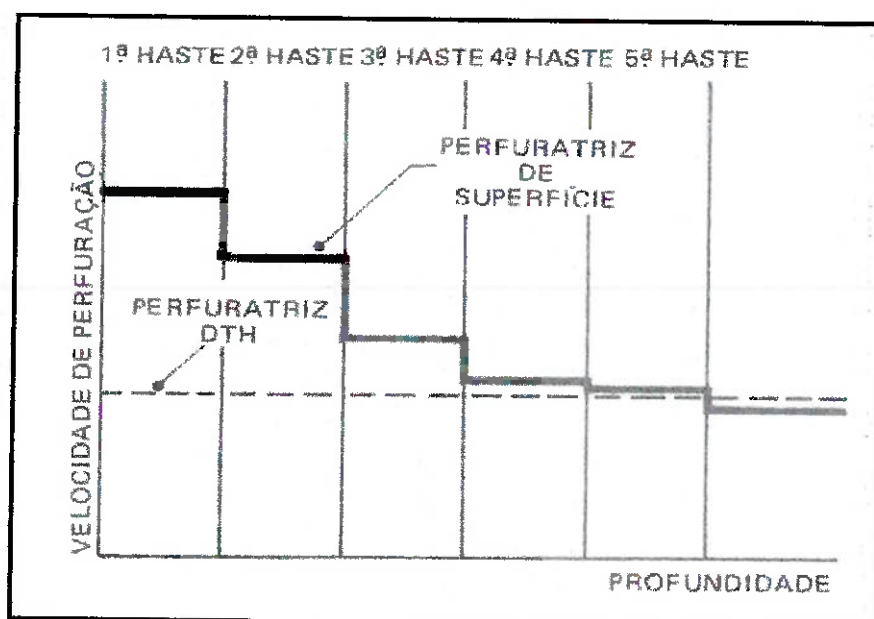


Figura 23 - Comparação de velocidades entre perfuratriz de superfície e de furo abaixo

No método de furo abaixo, a tubulação transmite a pressão de avanço, a rotação, o fluxo de ar para o acionamento da perfuratriz e a limpeza, não transmitindo a percussão. Portanto, é possível o uso de tubos de aço de paredes mais finas, uma vez que estarão sujeitos a esforços menos intensos do que na perfuração de superfície. Consegue-se pois, uma maior flexibilidade na escolha do diâmetro da coluna em função do diâmetro do furo, podendo-se variar a área anelar face às condições de serviço. Isto possibilita aumentar a velocidade do fluxo de ar na área anelar, com reflexos positivos na limpeza.

Assim, o campo de aplicação típico das perfuratrizes de furo abaixo, encontra-se em furos de maiores diâmetros e profundidades. Nestas condições as perfuratrizes pneumáticas de superfície teriam um tamanho excessivo para poder compensar as perdas de energia e haveria um grande aumento do consumo de ar, além da obrigatoriedade do uso de hastes de maior diâmetro, o que as tornariam inviáveis sob o aspecto operacional e econômico.

Modernamente, com o emprego das perfuratrizes hidráulicas, é possível obter-se mais eficientemente uma maior energia de percussão, o que faz com que elas, dentro de uma faixa mais ampla, sejam competitivas com as perfuratrizes de furo abaixo.

Uma outra importante vantagem das perfuratrizes com sistema de furo abaixo é que elas são mais silenciosas do que as de superfície, justamente por trabalharem no interior do furo.

Além disso, o método de furo abaixo é menos suscetível a desvios na perfuração em virtude da maior rigidez da coluna de perfuração e das dimensões externas da perfuratriz, fazendo com que ela mesmo se comporte como um guia.

A aplicação das perfuratrizes de furo abaixo é muito extensa, sendo usada para a abertura de poços para água, desmontes à céu aberto, furos para atirantamento, furos para sondagem geológica como complemento da sonda rotativa convencional nas passagens de rochas mais duras, etc. Quanto aos trabalhos subterrâneos, estudos realizados principalmente no Canadá em 1973, concluíram que a utilização de grandes diâmetros implicam numa redução substancial de custo. Este fato provocou uma tendência à aplicação crescente do método.

O ar de exaustão do martelo usualmente é utilizado como meio de limpeza e é conduzido através do bit. Em camadas barrentas ou úmidas alguns martelos de furo abaixo são feitos com circuitos de água para adicionar pequenas quantidades de água no ar de limpeza.

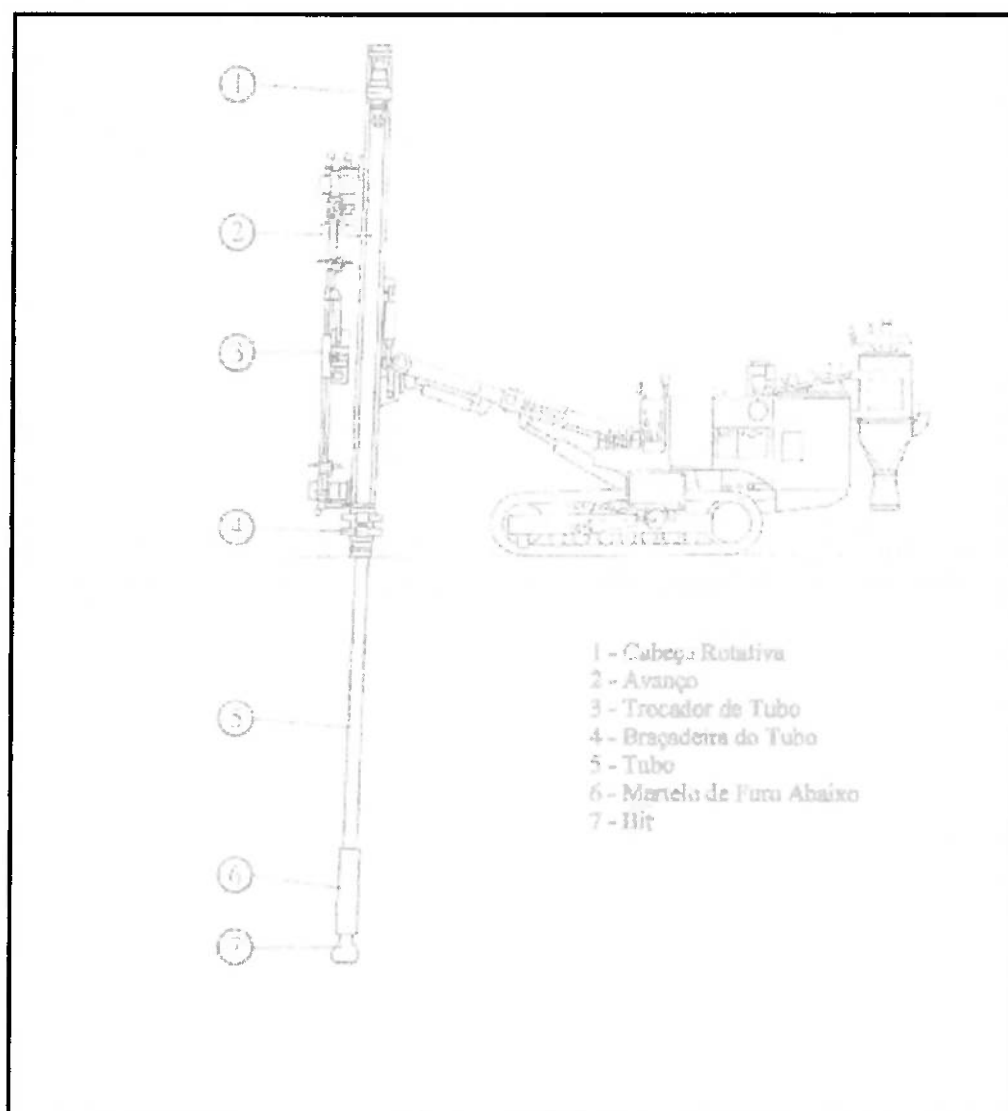


Figura 24 - Princípio da perfuração de furo abaixo

Uma variação no método de furo abaixo é denominada circulação reversa com amostragem contínua, onde se utiliza tubos concêntricos que constituem parte integrante da coluna de perfuração. Neste caso o ar comprimido é injetado no espaço compreendido entre esses tubos. Após acionar o martelo de furo abaixo e sair pelos orifícios de limpeza da coroa, o ar arrasta os fragmentos e penetra em uma peça denominada *cross-over*, localizada entre o martelo e as hastes. Um sistema de vedação entre as paredes do furo e as hastes na superfície, obriga o ar e os fragmentos a penetrar no *cross-over*, seguindo daí para o coletor de pó onde as amostras são colhidas.

O método pode ser usado com eficiência e economia em furos verticais ou inclinados para:

- programas de pesquisa mineral empreendidos em rochas muito duras e de difícil recuperação, que inviabilizam as sondagens a diamante; e
- furos para desmonte onde se faz necessária a análise do pó das sondagens para planejamento da lavra.

Em relação às sondagens rotativas testemunhadas a diamante, o sistema apresenta as seguintes vantagens:

- prazo de execução cerca de 6 a 8 vezes menor;
- pode-se dispensar o uso de água para a perfuração ( fator muito importante dependendo das regiões e épocas de trabalho); e
- recuperação de quase 100% das amostras, as quais são realmente representativas e incontaminadas.

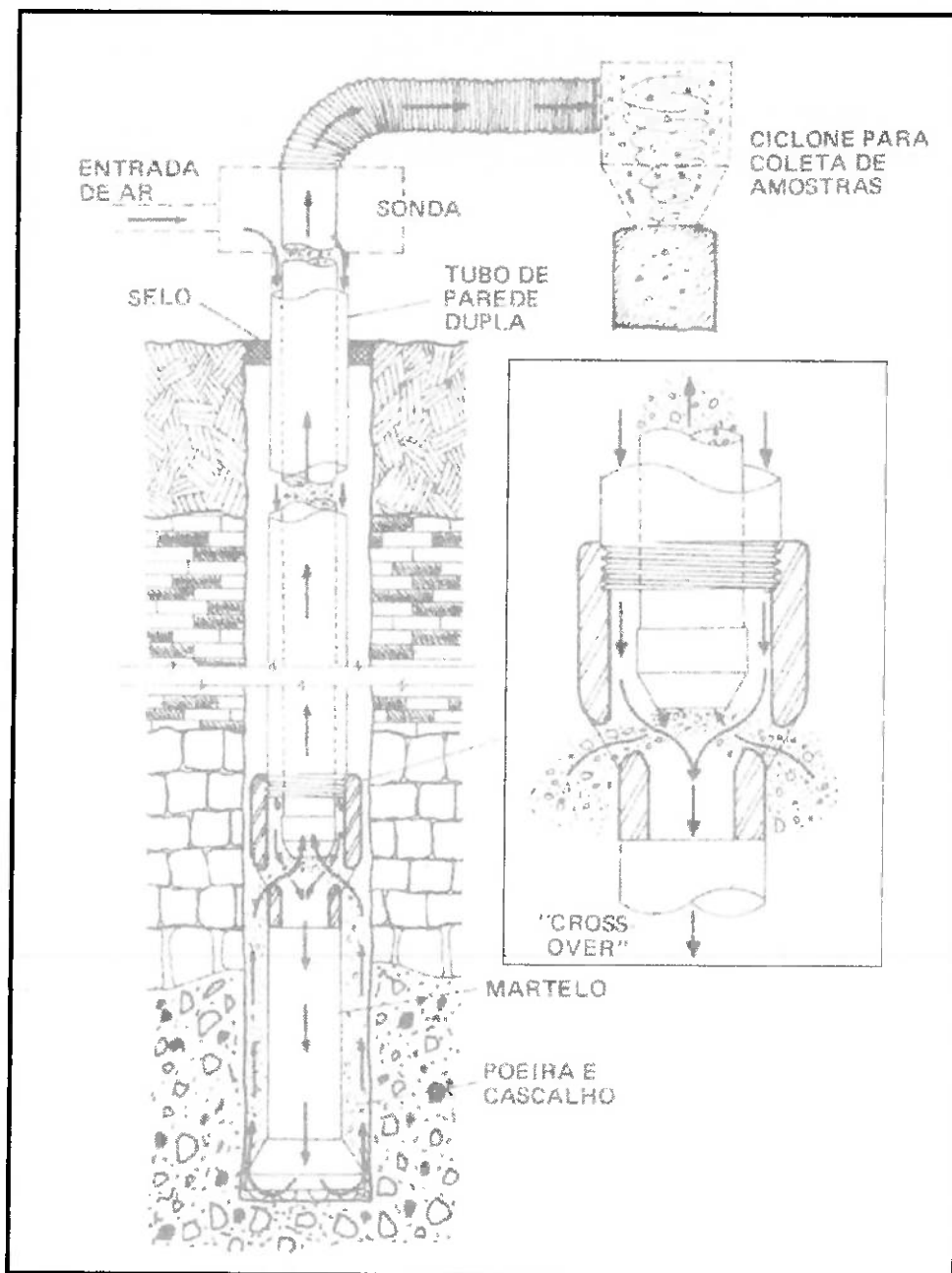


Figura 25 - Circulação Reversa

As perfuratrizes de furo abaixo são disponíveis em uma grande variedade de configurações por vários fabricantes; o sistema pode ser montado em bases leves sobre pneus para uso em pequenas escalas de produção ou em bases pesadas sobre esteiras ou sobre caminhão em minas a céu aberto. Enquanto que a principal fonte de energia é o ar comprimido, outras funções são acionadas por outros compressores de ar ou hidráulicamente. Colunas de perfuratrizes pequenas são equipadas com ar comprimido acionando motores de rotação enquanto que as maiores são normalmente hidráulicas.

O diâmetro do furo limita o projeto dos martelos de furo abaixo, pois o diâmetro do pistão tem de ser menor que o diâmetro do bit. Com certos projetos de martelo de furo abaixo o único meio de se aumentar a eficiência é aumentando a pressão de trabalho do martelo.

Perfuratrizes de furo abaixo são comumente usadas em perfuração de bancadas com diâmetros de furo de 89 a 165 mm (3 1/2" a 6 1/2") e com alturas de até 50 m.

Uma típica aplicação para uma perfuratriz de furo abaixo leve (operando com 10 a 14 bar, montada sobre tratores ou carretas) é para produções de até 600.000 t de rocha por ano. Com diâmetro de furo de 102 mm o total perfurado por ano gira em torno de 15.000 a 20.000 metros, que é aproximadamente a capacidade de uma perfuratriz de furo abaixo típica operada num turno por dia.

Com pressões de ar elevadas a capacidade de produção chega a 100.000 t por ano. A tendência destas perfuratrizes está na direção de se usar unidades móveis independentes construídas sobre esteiras carregando o compressor de ar. Esses equipamentos utilizam o ar comprimido somente para o acionamento do martelo, sendo que o restante trabalha hidráulicamente.

## **4.2. MARTELO DE FURO ABAIXO**

Inicialmente os martelos de furo abaixo eram fabricados para operar com pressão de ar de 7 bar (100 psi), principalmente por causa da falta de disponibilidade em compressores confiáveis operando a altas pressões. Porém, a tendência atual está na direção de se usar martelos de alta pressão trabalhando com pressões de ar de até 25 bar (350 psi). Para martelos de mesma dimensão, a energia de impacto por golpe aumenta proporcionalmente à pressão de ar.

A frequência de impacto dos martelos de furo abaixo varia entre 600 e 1.600 impactos por minuto. Martelos de furo abaixo precisam ser robustos, com revestimentos dos cilindros resistentes e o diâmetro efetivo do pistão é raramente superior a 50 ou 60% do diâmetro do bit. Isso implica que a energia disponível para cada impacto, por unidade de comprimento da cabeça cortante do bit é provavelmente menor que a das perfuratrizes de superfície.

Martelos de furo abaixo caem em duas categorias:

- martelos sem válvulas; ou
- martelos com válvulas.

Martelos de furo abaixo sem válvulas tem menos componentes, pois a corrente de ar para os dois lados do pistão é controlada por apenas um distribuidor de ar que trabalha melhor que com o uso de válvulas separadas. Isso faz com que os martelos sem válvulas sejam mais simples e mais confiáveis. A vantagem do uso de martelos com válvulas é devido ao fato deles apresentarem uma área efetiva maior, que provavelmente aumenta a energia de impacto.

A necessidade de ar para a perfuração e limpeza depende de vários fatores:

- classe de tamanho do martelo de furo abaixo;
- diâmetro do tubo e do bit;
- tipos de orifícios no martelo;
- pressão de ar disponível; e
- fabricação do martelo.

Em perfuração de furo abaixo o martelo é normalmente considerado um acessório da perfuração pelo fato de sua vida útil ser muito pequena se comparada com os de superfície. A seguinte tabela serve de guia quando se deseja estimar a vida útil dos martelos de furo abaixo.

Litologia	Diâmetro do Bit [mm]	Vida Útil do Martelo [m]
Quartzito	105	3.000
	165	5.000
Arenito	105	10.000
	165	15.000
Calcário	105	10.000
	135	20.000
	165	25.000

Tabela 7 - Guia para se estimar a vida útil do martelo de furo abaixo



A vida dos martelos de furo abaixo depende de:

- tamanho do martelo;
- pressão de operação;
- abrasividade da rocha; e
- perfurabilidade da rocha.

#### 4.3. CARRETAS PARA PERFURATRIZES DE FURO ABAIXO

Os dois principais tipos de pequenas perfuratrizes de furo abaixo são as perfuratrizes em bases sobre esteiras leves, que usam compressores de ar portáteis como fonte de energia, e as perfuratrizes sobre esteiras ou sobre caminhão, que tem uma unidade de acionamento a bordo.

Os principais componentes de uma perfuratriz de furo abaixo são:

- avanço sobre correntes;
- trocadores de tubos (só em martelos mais pesados) ou *pipe rack*;
- braço;
- base sobre esteiras;
- unidade de acionamento que consiste num motor diesel, embreagem e caixa de câmbio, bombas hidráulicas e compressor de ar; e
- coletor de pó.

Algumas perfuratrizes rotativas também podem ser equipadas com sistemas de perfuração de furo abaixo, mas se não forem especialmente projetadas para perfuração de furo abaixo, a pressão de operação do ar comprimido não pode exceder 14 bar. Essas perfuratrizes são tanto disponíveis sobre esteiras como sobre caminhão. Pequenas perfuratrizes rotativas pesando de 20 a 35 t são normalmente projetadas também para perfuração de furo abaixo com compressores de ar de alta pressão (até 25 bar)

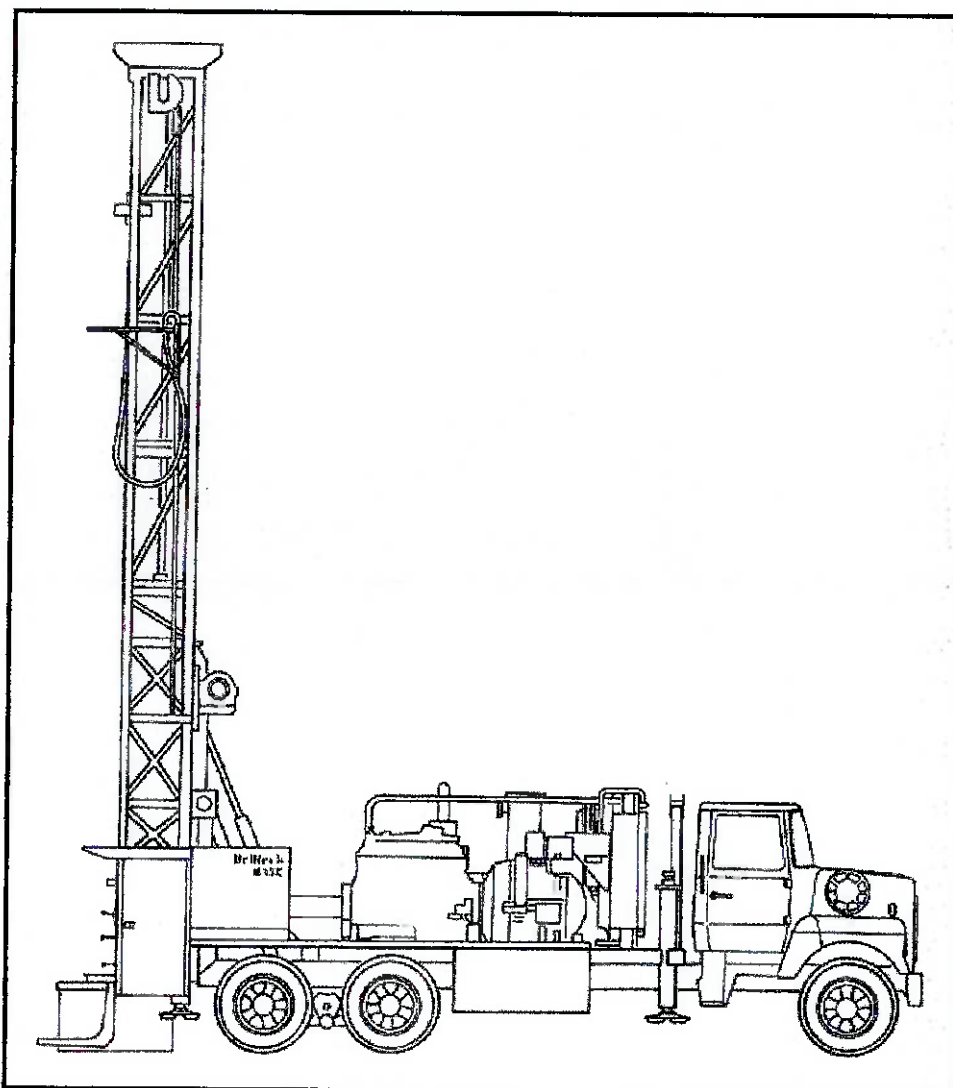


Figura 26 - Perfuratriz de furo abaixo montada sobre caminhão

#### 4.3.1. AVANÇO

Pequenas perfuratrizes de furo abaixo são normalmente equipadas avanço sobre trilhos com calhas em U utilizando motores de avanço hidráulicos ou pneumáticos. O martelo de furo abaixo e os tubos são rotacionados por um fuso na cabeça rotativa que é montada no avanço. A rotação é de até 80 rpm.

Uma máxima penetração e um mínimo desgaste do bit dependem das condições da rocha e do diâmetro do bit.

Perfuratrizes de furo abaixo maiores são equipadas com motores hidráulicos de rotação duplos e sistemas hidráulicos hidrostáticos com deslocamento variável de pressão compensado por bombas hidráulicas, promovendo torque constante em qualquer velocidade de rotação a valores de até 200 rpm. O torque requerido na rotação varia em função do

diâmetro do furo, sendo de 2.000 a 2.500 Nm para diâmetros de furo de 105 a 127 mm e de 5.000 a 6.000 Nm para diâmetros de furo de 152 a 165 mm.

Trocadores dos tubos são equipamentos normais em perfuratrizes de furo abaixo que tem uma unidade de acionamento a bordo. O mais comum é o tipo carrossel que pode armazenar 6 tubos de até 7,6 m de comprimento.

#### 4.3.2. BRAÇO

Perfuratrizes de furo abaixo são equipadas com braços telescópicos ou fixos. Quanto mais leves forem as colunas, mais simples são os braços. Perfuratrizes de furo abaixo sobre esteiras que são acionadas por compressores portáteis utilizam braços operados hidráulicamente semelhantes aos utilizados em perfuratrizes de superfície. Perfuratrizes montadas sobre esteiras mais pesadas ou sobre caminhão utilizam torres de estrutura soldada que são montadas diretamente na estrutura da carreta. Cilindros hidráulicos são usados para suspender a torre e alinhá-la para a perfuração.

#### 4.3.3. LIMPEZA

Limpeza com água pode ser usada em perfurações de furo abaixo adicionando-se água ao ar. Também é utilizada a limpeza com espuma adicionando-se um aditivo com espumante. As espumas tem a tripla função de juntar as partículas do pó, transportar os fragmentos para fora do furo e estabilizar as paredes do furo quando se perfura em rochas moles.

<b>Classe de Tamanho do Martelo [mm]</b>	<b>76</b>	<b>102</b>	<b>127</b>	<b>150</b>
<b>Diâmetro do Bit [mm]</b>	85 - 100	105 - 127	130 - 145	152 - 165
<b>Pressão de Operação [bar]</b>	6 - 12	6 - 25	6 - 25	6 - 25
<b>Consumo de ar do Martelo [m<sup>3</sup>/min]</b>	3 - 6	4 - 15	5 - 18	6 - 28
<b>Potência da Unidade de Acionamento [kW]</b>	70	200	300	400
<b>Peso da Coluna [t]</b>	6	15	20	30

Tabela 8 - Principais dados técnicos das modernas perfuratrizes de furo abaixo

#### 4.4. ACESSÓRIOS

Os acessórios da perfuração de furo abaixo são o martelo de furo abaixo, as hastes e os bits. Como o martelo de furo abaixo trabalha no fundo do furo e transmite a energia de percussão diretamente para o bit, não é necessário se utilizar punho. Tubos para perfuratrizes de furo abaixo são utilizados somente para transmitir a rotação para o fundo do furo, portanto podem ser mais leves que as hastes de extensão das perfuratrizes de superfície.

##### 4.4.1. COROAS OU BITS

Os diâmetros de bits usados em perfuratrizes de furo abaixo variam muito, mas os mais comumente usados são de 105 a 165 mm. Igualmente aos bits para perfurações de superfície, são disponíveis vários tipos de bits para se ajustar à rocha e ao tamanho do furo a ser perfurado.

Considerando-se que as profundidades são maiores, as coroas de impacto direto são construídas quase sempre com pastilhas em botões, que por apresentarem maior metragem entre as afiações, acarretarão um menor número de remoções da coluna.

Basicamente a coroa de furo abaixo representa a união de uma peça única de todos os componentes da coluna seccionada. Tem como configuração, um corpo estriado externamente e vazado longitudinalmente, apresentando uma superfície de impacto numa das extremidades. Na outra possui as pastilhas, além de orifícios que se comunicam com o furo longitudinal, por onde flui o agente de limpeza. Apresenta ainda rasgos ao longo do flanco e em certos casos na própria face de corte (*drop-center*) facilitando a passagem dos fragmentos desagregados.

A coroa se aloja na perfuratriz através do mandril. Para isso o mandril possui estrias que se encaixam nas estrias da coroa, transmitindo por este procedimento o movimento de rotação da coluna para a coroa.

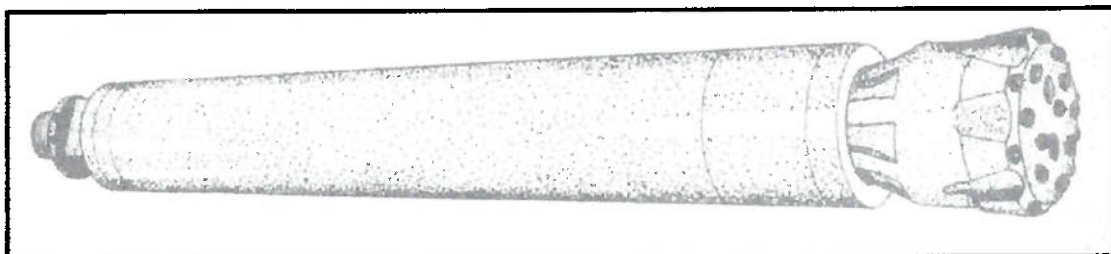


Figura 27 - Perfuratriz de furo abaixo (DTH)

Para uma mesma perfuratriz resta basicamente a escolha do diâmetro e do formato da coroa, em conformidade com o tipo de rocha trabalhada. Os tipos de coroas mais utilizadas são:

- coroa com face plana para rochas preferencialmente duras;
- coroa com face côncava para rochas fissuradas ou abrasivas; e
- coroa de centro rebaixado (*drop-centre*) para aumentar a velocidade de penetração em rochas médias e duras ou melhor alinhamento em qualquer tipo de rocha.

Cada praça de perfuração tem diferentes exigências e vários tipos de bits são frequentemente testados antes de se decidir a melhor configuração para um mínimo de desgaste do bit e máxima exatidão do furo.

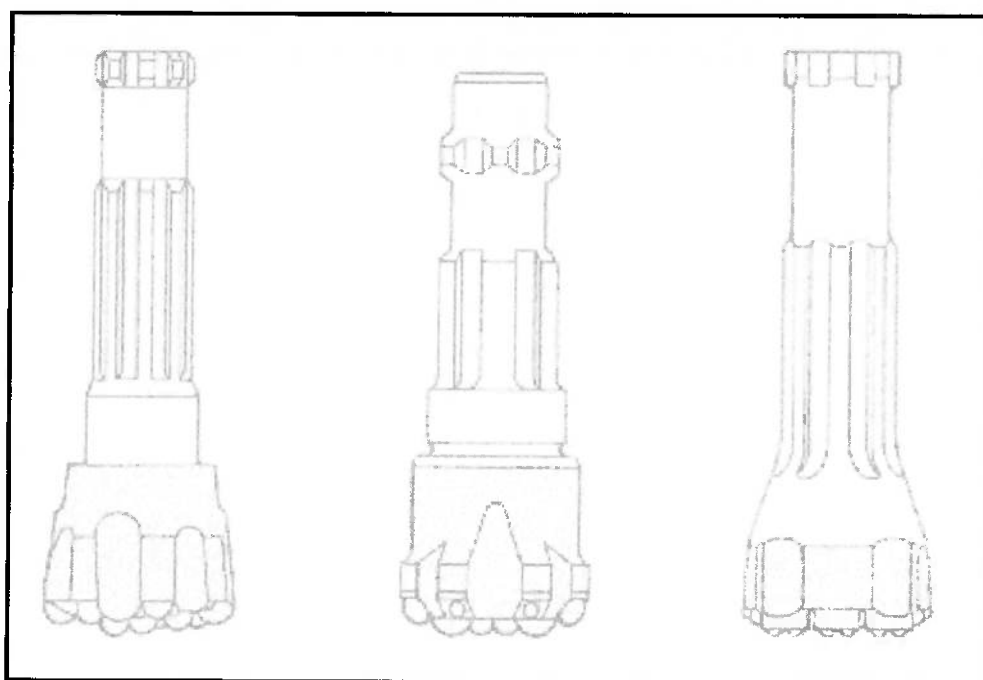


Figura 28 - Bits usados em perfuratrizes de furo abaixo

A vida útil dos bits usados em perfuração de furo abaixo é função de vários parâmetros como o diâmetro do bit, desenho do bit, abrasividade da rocha, etc. Como no caso dos martelos pneumáticos de superfície, a vida do bit é de até 15% menor que a alcançada em perfuratrizes hidráulicas com o mesmo diâmetro de bit.

Na seleção do tamanho do bit, fatores como a abrasividade da rocha e sua composição mineral devem ser consideradas. Existem portanto bits com botões maiores e bits com furos extras de limpeza independentemente da face do bit.

## 4.4.2. TUBOS

A seleção do sistema de tubos depende do tamanho do furo a ser perfurado. Vários diâmetros externos são disponíveis e a escolha deve buscar a otimização da velocidade do ar de limpeza. Diâmetros muito grandes restringem o movimento dos fragmentos, enquanto que diâmetros menores reduzem a velocidade anelar e causam um anel de fragmentos que atrapalham o martelo. Um mínimo de 15 m/s de velocidade anelar é requerido. Correntes de ar maiores são necessárias em rochas com uma densidade específica alta, rochas que tem fragmentos maiores ou se existe muita água subterrânea ou lama.

A vida útil média do tubo é de 7.500 m quando propriamente usadas, ou seja, fazendo rotação para igualar os desgastes, usando lubrificantes adequados, etc.

<b>Diâmetro do tubo [mm]</b>	<b>Comprimento [mm]</b>	<b>Peso [kg]</b>
76	1.500	15
76	3.000	25
89	1.500	22
89	3.000	44
89	4.500	63
114	1.500	45
114	3.000	61
114	6.100	170
115	7.600	199
127	6.100	204
127	7.600	257

Tabela 9 - Tamanhos de tubos comuns em perfuração de furo abaixo



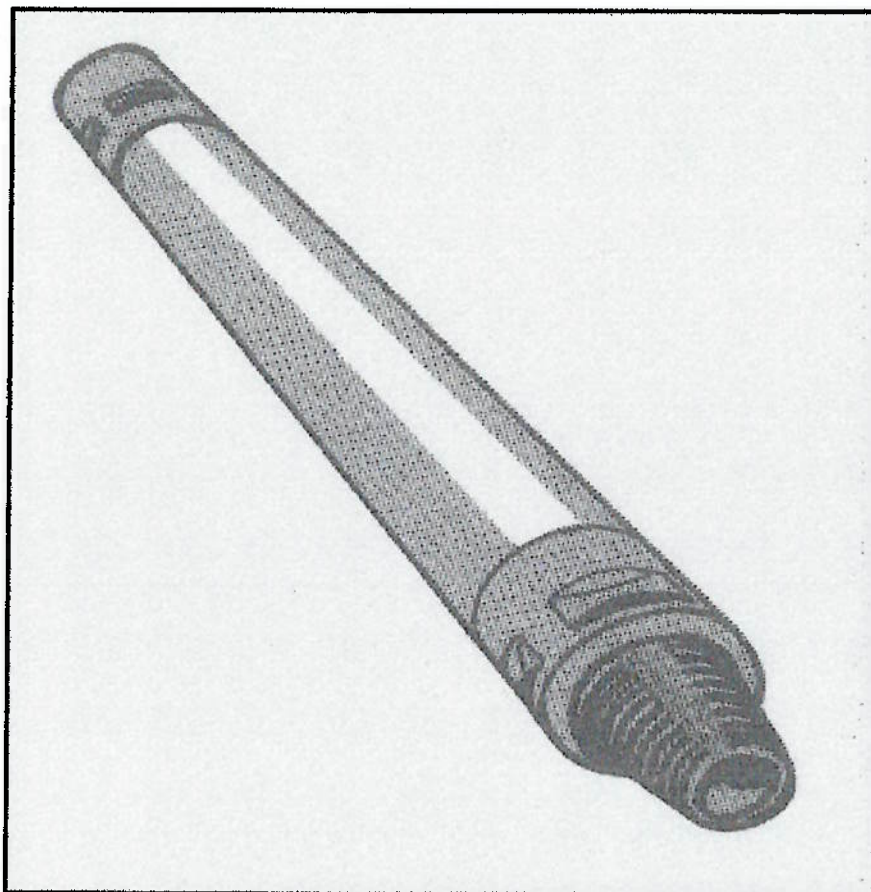


Figura 29 - Tubo para perfuração de furo abaixo

#### 4.4.3. PERFURAÇÃO E MEIO AMBIENTE

Ruído, pó e névoa estão entre os fatores ambientais que precisam ser considerados na aplicação de perfuratrizes de furo abaixo.

O nível de ruído com perfuratrizes de furo abaixo é menor que em perfuratrizes de superfície pelo fato do martelo de furo abaixo seguir o bit no interior do furo. Isso ajuda a abafar o barulho produzido tanto pela pancada do martelo no bit como pela exaustão do ar. Abafadores de ruídos na exaustão do ar do motor de rotação são padrões em vários modelos de perfuratrizes de furo abaixo.

Da mesma maneira que em perfuração de superfície, os fragmentos de rocha que saem do furo podem ser sugados por um sistema de coleta de pó.

O uso de perfuratrizes de furo abaixo reduz os problemas com névoa que limitam a visibilidade pelo fato de que o sistema de exaustão dos martelos é direcionado para o bit. Entretanto alguma névoa ainda estará presente nas portas de exaustão dos motores a ar.



## **5. PERFURATRIZES ROTATIVAS**

### **5.1. PERFURAÇÃO ROTATIVA COM BIT TRICÔNICO**

Até 1949 praticamente todos os furos para desmonte eram executados com perfuratrizes percussivas e apenas em rochas muito moles se utilizava perfuratrizes rotativas.

A abertura de grandes minas a céu aberto de carvão nos Estados Unidos, com bancadas de até 40 m, e a entrada no mercado de explosivos de baixo custo e alta energia, como o ANFO, estimulou os fabricantes de perfuratrizes a projetar equipamentos de grande capacidade que davam altas taxas de penetração.

Neste contexto é que o uso de bits tricônicos se tornou muito popular.

Os diâmetros de furos variam de 51 a 445 mm, sendo os mais frequentes em minas a céu aberto de 152 a 311 mm.

Este método de perfuração é extremamente versátil, pois cobre uma grande variedade de rochas, das mais moles, onde teve início a sua aplicação, às mais duras, onde seu uso tem substituído outros sistemas mais populares.

A dureza e a abrasividade da formação rochosa a ser perfurada e o tamanho do furo irão ditar qual o método a ser selecionado. Se o diâmetro do furo for maior que 251 mm, a perfuração será executada com bits tricônicos. Se o diâmetro do furo estiver entre 102 e 165 mm e a formação é dura, o uso de perfuratriz de furo abaixo pode ser o método mais econômico.

Com estas perfuratrizes rotativas a capacidade de se realizar furos inclinados é muito limitada por causa da força requerida que recairia diretamente na parte de trás, causando problemas de estabilidade.

#### **5.1.1. TIPOS DE CARRETAS**

Uma coluna de perfuratriz rotativa pode ser montada sobre chassi de caminhão ou sobre esteiras. A escolha vai depender do uso e do tamanho da perfuratriz.

Para perfuratrizes rotativas pequenas pode ser desejável se montar a perfuratriz sobre chassi de caminhão, não apenas pela mobilidade mas também por permitir que a perfuratriz seja acionada pelo motor do caminhão.

A necessidade ou não de mobilidade ajuda na escolha entre um chassi de caminhão ou uma base sobre esteiras. Uma perfuratriz montada sobre caminhão é obviamente mais móvel, enquanto que as montadas sobre esteiras são mais lentas e para longas distâncias tem de ser

transportadas por um caminhão. No entanto, as montadas sobre esteiras podem alcançar terrenos onde os caminhões não podem.

### 5.1.2. FONTES DE ENERGIA

A fonte de energia primária pode ser um motor diesel ou elétrico.

Perfuratrizes usadas em perfurações de diâmetros acima de 229 mm usam, normalmente, energia elétrica. Perfuratrizes pequenas a médias, que normalmente são montadas sobre caminhões, podem ser acionadas por um ou dois motores diesel.

A distribuição média da energia instalada nestas perfuratrizes é a seguinte:

- movimentos de elevação e translação: 18%;
- rotação: 18%;
- avanço: 3%;
- nivelamento: 2%;
- coleta de pó: 3%;
- limpeza com ar comprimido: 53%; e
- equipamentos auxiliares: 3%.

### 5.1.3. PARÂMETROS DA PERFURAÇÃO

Os parâmetros internos que influem na perfuração rotativa são:

- avanço do bit;
- velocidade de rotação;
- desgaste do bit;
- diâmetro do furo; e
- corrente de ar para limpeza.

Os parâmetros externos são:

- características geomecânicas das rochas; e
- eficiência do operador.

### 5.1.3.1. AVANÇO

Em geral, a força de avanço aplicada no bit depende do tamanho do furo e das condições da rocha.

A quantidade de energia requerida para o avanço é menor se comparada com a energia de rotação devido ao fato de que o peso da coluna é usado no avanço. A taxa de avanço precisa ser variável para corresponder à resistência à compressão do material a ser perfurado. A força de avanço precisa ser aplicada a uma taxa constante com pouca ou sem nenhuma folga ou o bit irá saltar diminuindo sua vida útil e a taxa de penetração além de aumentar muito a manutenção devido às vibrações.

Como o avanço é conseguido com o uso do peso da coluna de perfuração, a força de avanço é limitada de acordo com o peso desta coluna. A máxima força de avanço que se obtém é em torno da metade do peso da coluna.

O peso total a ser aplicado é determinado pelo material a ser perfurado e pela velocidade de rotação do bit. Uma combinação de peso e velocidades excessivos, embora gere uma taxa de penetração alta, irá causar uma falha no bit muito prematuramente.

O peso aplicado no bit deve estar na faixa de 0,5 t/polegada do diâmetro do bit em rochas moles a médias e de 4 t/polegada do diâmetro do bit em rochas duras.

<b>Diâmetro do Furo [mm]</b>	<b>Avanço [kg]</b>
152 - 200	13.600
178 - 230	22.700
178 - 270	31.800
230 - 311	40.800
351 - 445	54.400

Tabela 10 - Força de avanço em função do diâmetro do furo

### 5.1.3.2. VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

O bit é rotacionado para trabalhar continuamente em uma nova parte do fundo do furo. A velocidade de rotação mais econômica para cada caso é determinada em campo por tentativas. Velocidades de rotação entre 50 e 90 rpm são normalmente usadas.

Suficiente energia de rotação deve ser fornecida ao bit para todas as condições de perfuração. A requerida energia de rotação para um dado material e tamanho do furo é proporcional à

velocidade do bit e à força de avanço por polegada do diâmetro. Um aumento da taxa de penetração resulta, portanto, num aumento da velocidade de rotação. A combinação mais econômica entre velocidade de rotação e força de avanço é frequentemente um compromisso entre taxa de penetração e vida do bit.

<b>Tipo de Formação</b>	<b>Rochas Típicas</b>	<b>Rotação [rpm]</b>
Mole	Calcários moles, Arenitos friáveis	75 - 160
Média	Arenito, Calcário, Dolomito	60 - 80
Dura	Quartzito, Granito	35 - 70

Tabela 11 - Rotação em função da formação rochosa

#### 5.1.3.3. DESGASTE DO BIT

A taxa de penetração cai consideravelmente com o desgaste do bit. A figura 27 mostra que um bit tricônico com metade da vida útil faz com que a taxa de penetração seja reduzida em 50 a 75% quando comparada com a obtida com um bit novo.

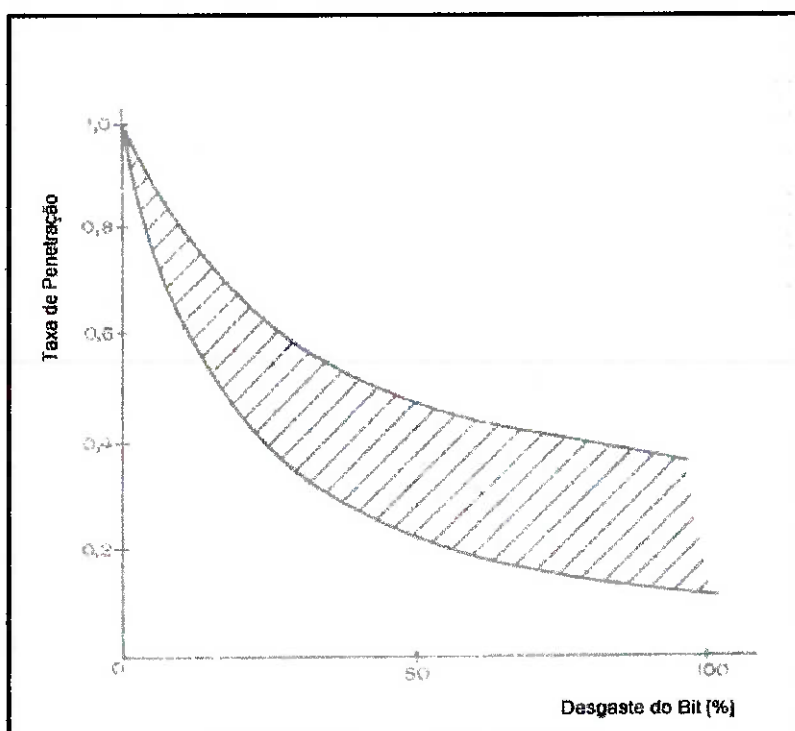


Figura 30 - Taxa de penetração em função do desgaste do bit

#### 5.1.3.4. DIÂMETRO DO BIT

A figura 28 mostra que a taxa de penetração obtida com constantes força de avanço e velocidade de rotação é proporcional ao inverso do quadrado do diâmetro do furo.

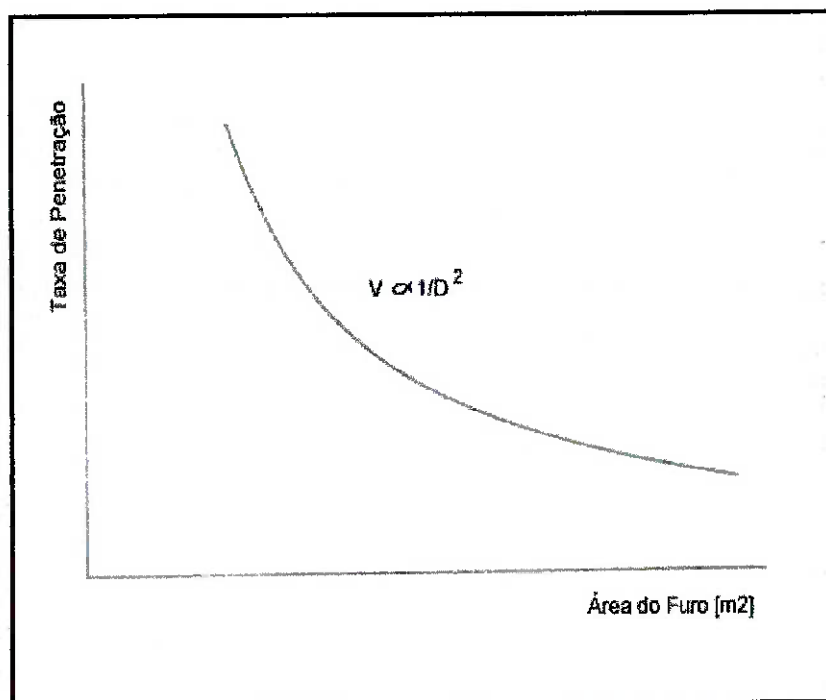


Figura 31 - Taxa de penetração em função da área do furo

#### 5.1.3.5. LIMPEZA

Fragmentos gerados durante a perfuração são removidos por ar comprimido. O ar é transmitido pelos furos das hastes até o bit. O ar limpa o fundo do furo e força os fragmentos a subir para a superfície pelo espaço entre a parede do furo e o lado de fora das hastes.

O suplemento de ar precisa ser o suficiente para que a velocidade anelar transporte os fragmentos à superfície. Como regra geral a velocidade anelar deve estar entre 20 e 35 m/s. Velocidade muito baixa causa uma refragmentação da rocha diminuindo a vida útil do bit. Por outro lado, velocidades muito altas resultam em jateamento de areia no bit e na coluna, aumentando o desgaste.

Dureza da Rocha	Velocidade do Ar na Saída do Furo	
	Mínima	Máxima
Mole	20	30
Média	25	35
Dura	30	40

Tabela 12 - Velocidade do ar em perfuração rotativa

## 5.2. PERFURAÇÃO ROTATIVA POR AÇÃO DE CORTE

Com o uso crescente dos bits tricônicos em operações de superfície, o uso de perfuração rotativa por corte é limitado a rochas moles para diâmetros de furo pequenos a médios. Em trabalhos subterrâneos as perfuratrizes percussivas tem tomado a maior parte do trabalho, deixando apenas as rochas moles a médias que não são abrasivas para as perfuratrizes rotativas.

A perfuração por corte é realizada por bits cujo elemento estrutural é o carbeto de tungstênio ou outros materiais como os diamantes sintéticos ou policristalinos. Os bits são classificados da seguinte forma:

- *drag bits* de duas asas com diâmetros de 36 a 50 mm;
- *drag bits* de três ou quatro asas com diâmetros de 50 a 115 mm; e
- bits triplos de lâminas substituíveis com diâmetros de 160 a 400 mm.

## CONCLUSÕES

O uso das perfuratrizes hidráulicas de superfície vem aumentando muito nos últimos anos. Essas perfuratrizes oferecem vantagens tais como maior produtividade, menores custos e maior possibilidade de mecanização, melhorando a segurança e higiene no trabalho.

No entanto, a escolha de uma perfuratriz hidráulica leva sempre a investimentos maiores.

Isso significa que a escolha entre um destes equipamentos deve levar em conta o maior número possível de fatores, entre os quais tamanho e tipo de operação, localização geográfica, disponibilidade e custos de energia e vida útil esperada do projeto, para que se possa quantificar os aspectos positivos e negativos de cada um.

A princípio, quando se deseja alta produtividade e baixos custos operacionais, a escolha do equipamento hidráulico é óbvia.

As perfuratrizes de superfície são normalmente usadas para diâmetros de furo de 22 a 254 mm, para perfurar rochas moles a duras.

As perfuratrizes de furo abaixo encontram seu campo de aplicação típico para diâmetros de furo maiores e onde os furos atingem grandes profundidades.

Com relação às condições de trabalho, as perfuratrizes de furo abaixo apresentam algumas vantagens como menor nível de ruído, pelo fato do martelo seguir o bit no interior do furo. Além disso, pelo fato de que o sistema de exaustão dos martelos de furo abaixo é direcionado para o bit, há uma redução dos problemas com névoa.

Os diâmetros de furos mais comumente usados variam entre 89 e 165 mm e a altura das bancadas chega aos 50 m.

A perfuração rotativa com bit tricônico vem sendo largamente usada para diâmetros de furo de 152 a 311 mm. Para furos entre 102 e 165, em formações rochosas duras, usa-se perfuratriz de furo abaixo. No entanto, em perfurações com diâmetros maiores que 251 mm, a perfuração tem sido executada com bit tricônico. Estes equipamentos tem como principais características uma grande capacidade e alta taxa de penetração.

O uso de *drag bits* em perfuração rotativa vem sendo limitado, pelo crescente uso dos bits tricônicos, para perfurações de diâmetros de furos pequenos a médios em rochas moles.



## **BIBLIOGRAFIA**

ATLAS COPCO. *Manual do ar comprimido*. São Paulo, McGraw-Hill, 1976.

CASTRO, R. S.; PARRAS, M. M. *Manual de ferramentas de perfuração*. Rio de Janeiro, FAGERSTA SECOROC, 1986.

LOPEZ JIMENO, C.; LOPEZ JIMENO, E.; AYLÁ CARCEDO, F. J. *Drilling and blasting of rocks*. Rotterdam, Balkema, 1995.

STACK, B. *Encyclopaedia of tunneling, mining and drilling equipment*. Hobart, Muden Publishing, 1995. V. 3.

SURFACE drilling and blasting. S. L., Tamrock, 1988.

TAMROCK EQUIPAMENTOS LTDA. *Equipamentos para perfuração a céu aberto*. Tampere, s. d.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores e colegas do Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, com quem pude contar desde o início da minha vida acadêmica.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Lineu A. Ayres da Silva, com quem pude contar não somente para a elaboração deste trabalho como durante todo o período em que fui aluno e bolsista do Laboratório de Mecânica de Rochas deste departamento.

Também não poderia deixar de expressar meus agradecimentos aos meus pais, Alberto e Sueli, pelo incentivo e apoio que eles sempre me deram durante todos estes anos de estudo.

Finalmente à minha namorada Viviane, que passou horas e horas me esperando terminar este e outros trabalhos.