



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

DEIDIANE OLIVEIRA SOUZA

ROTINAS OPERACIONAIS: MONITORAMENTO DO
DESGASTE EM BROCAS TRICÔNICAS

MARABÁ

2010

DEIDIANE OLIVEIRA SOUZA

ROTINAS OPERACIONAIS: MONITORAMENTO DO
DESGASTE EM BROCAS TRICÔNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Minas e Meio
Ambiente da Universidade Federal
do Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Minas.
Orientador: Prof. M.Sc. Alexandre
José Buriel de Macêdo

MARABÁ

2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II do CAMAR/UFPA, Marabá, PA

Souza, Deidiane Oliveira

Rotinas operacionais: monitoramento do desgaste em brocas tricônicas / Deidiane Oliveira Souza ; orientador, Alexandre José Buril de Macêdo. — 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2010.

1. Engenharia de minas. 2. Brocas (Ferramenta) - Deterioração. 3. Perfuração estratigráfica. I. Macêdo, Alexandre José Buril de, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 622

DEIDIANE OLIVEIRA SOUZA

ROTINAS OPERACIONAIS: MONITORAMENTO DO
DESGASTE EM BROCAS TRICÔNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Engenharia de Minas e Meio
Ambiente da Universidade Federal
do Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Minas.
Área de concentração: Perfuração de
Rochas

Data de aprovação: 24 / 06 / 2010

Conceito: EXCELENTE

Banca examinadora:

Prof. Alexandre José Buril de Macêdo – Orientador
M.Sc. Engenharia de Minas
Universidade Federal do Pará

Prof. Marinésio Pinheiro de Lima
M.Sc. Engenharia de Minas
Universidade Federal do Pará

Prof. Roseane de Lima Silva
D.Sc. Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Pará

À minha família, meu alicerce.

Ao meu amigo, André Pereira de Sá, que preservo em minhas lembranças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder o dom da vida, ajudar a manter a paz de espírito para me acalmar nos momentos de aflição e superar as dificuldades, e conseguir vencer mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais e irmãos por construir bons alicerces na minha educação e formação moral, por toda confiança e orgulho demonstrados e pelo apoio que recebi durante a graduação, em especial minha mãe e minha irmã Daniela.

À família Santana e à família Santos que me acolheram e orientaram no início do curso e pela amizade mantida durante esse período.

Ao meu Professor e Orientador Alexandre Buriel pela orientação durante a elaboração deste trabalho, pelas mensagens sobre capacidade e força de vontade presentes em suas conversas em sala de aula.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Minas, Faculdade de Geologia e Faculdade de Engenharia de Materiais que contribuíram para minha conscientização e formação acadêmica.

Aos funcionários da Secretaria e da Biblioteca, e técnicos dos laboratórios da UFPA – Núcleo de Marabá pela dedicação e orientação a mim fornecidas quando necessário.

Aos meus amigos Eleilson e Flaviano pelo companheirismo nessa etapa tão importante de nossas vidas.

A todas as amigas e amigos que conquistei ao longo do curso pela amizade, companheirismo e pelos conhecimentos compartilhados, em especial minhas amigas Eliane, Katianne e Richellen.

RESUMO

O desgaste das ferramentas de corte resulta na redução da vida útil e menores taxas de penetração, afetando a eficiência e os custos da operação de perfuração. Ocorrem diversos tipos de desgaste nas brocas tricônicas, usadas no método de perfuração rotativo, esses desgastes podem estar associados tanto à especificação inadequada do tipo de broca quanto às deficiências operacionais ou do equipamento de perfuração, aplicação inadequada dos parâmetros de perfuração, esses fatores podem exercer influência direta no desgaste das ferramentas de corte, ou atuar como fatores contribuintes e/ou agravantes do processo. Portanto, é importante o monitoramento, classificação e avaliação dos desgastes que ocorrem nas brocas com o objetivo de suprir possíveis carências do processo. A aplicação de bons procedimentos para execução das atividades e práticas de monitoramento dos parâmetros e avaliação dos resultados leva à redução de muitas deficiências no controle do desgaste das ferramentas de corte, bem como do processo de perfuração de um modo geral, auxilia na geração de bancos de dados com informações suficientes para posteriores análises operacionais de monitoramento, classificação e avaliação do tipo de desgaste e dos fatores que influenciam no desgaste das ferramentas de corte, permitindo ainda a obtenção de dados para análises de outras variáveis do processo, implicando em melhorias na qualidade e desempenho da perfuração, e permitindo melhor controle do processo e dos custos totais da perfuração.

Palavras-chave: Broca Tricônica; Desgaste; Prática Operacional; Monitoramento.

ABSTRACT

The wear of cutting tools results in decreased of the life and lower penetration rates, affecting the efficiency and costs of drilling operation. Occur various types of wear on tricorne rollers bits, used in rotary drilling method, such wear can be associated as to inadequate specification of the type of bit as to shortcomings of the operation or drilling equipment, misapplication of drilling parameters, these factors may exert direct influence on the wear of cutting tools, or act as contributors and/or aggravating the process. Therefore, it is important to monitoring, classification and evaluation of wear that occur in drills in order to compensate shortcomings in the process. The application of good procedures for implementation of activities and practices of monitoring parameters and evaluation of results leads to the reduction of many deficiencies in controlling the wear of cutting tools and the drilling process in general, helps in the generation of database with information sufficient for subsequent analysis of operational monitoring, classification and evaluation the type of wear and the factors that influence the wear of cutting tools, and allows the obtaining of data for analysis of other process variables, resulting in improvements in quality and performance of drilling, and better control of the process and the total costs of drilling.

Keywords: Tricone Roller Bits; Wear; Operating Practice; Monitoring.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 PERFURAÇÃO DE ROCHA	12
2.1.1 Perfuração rotativa	13
2.2 BROCAS TRICÔNICAS	14
2.2.1 Atuação da broca sobre a rocha	16
2.2.2 Classificação das brocas	17
2.2.3 Tipos de elementos de corte	18
2.3 DESGASTE DE BROCAS TRICÔNICAS	21
2.3.1 Principais características de desgaste em brocas tricônicas	21
2.3.2 A estrutura do Sistema de Classificação de Desgaste IADC	26
2.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESGASTE DAS BROCAS TRICÔNICAS	29
2.4.1 Propriedades da rocha	30
2.4.2 Especificação incorreta da broca	32
2.4.3 Falhas no sistema de limpeza	33
2.4.4 Força de avanço	35
2.4.5 Velocidade de rotação (RPM)	35
2.4.6 Vibração	36
2.4.7 Armazenamento e manuseio	37
2.4.8 Lubrificação	37
2.4.9 Manutenção	39
2.5 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS QUE PODEM AUXILIAR NO CONTROLE DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE	39
2.5.1 Gerenciamento da perfuração	40
2.5.2 Associar a geologia da mina à execução dos furos	40
2.5.3 Monitoramento dos parâmetros de perfuração	41
2.5.4 Monitoramento do desgaste das brocas	42

2.6 A INFLUÊNCIA DAS BROCAS SOBRE O CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	51
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	53
ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

Em muitas minerações, a perfuração é a primeira operação, das chamadas operações unitárias, a ser realizada para a efetiva lavra do material, por isso é muito importante executá-la corretamente, uma vez que os efeitos de uma perfuração de má qualidade irão refletir nos resultados do desmonte, conseqüentemente, nas operações seguintes e principalmente nos custos da empresa.

Entretanto, na maioria das operações de mina, ainda se observa a ausência de bons procedimentos na execução da perfuração de rochas e da prática de monitoramento e controle de muitos parâmetros que podem influenciar nos resultados da operação e no desgaste dos elementos de perfuração. Esta prática pode gerar lacunas no banco de dados de uma empresa, dificultar análises operacionais e produzir resultados de baixa confiabilidade. Nesse âmbito, são de fundamental importância o monitoramento e a avaliação dos resultados e dos fatores que implicam na qualidade da perfuração e no custo da mineração.

Monitorar, controlar e melhorar o processo exige atenção e participação de toda a equipe de trabalho. Dentro da estrutura organizacional de uma empresa, há uma equipe de trabalho responsável pelo planejamento e operação de perfuração, esta equipe de trabalho deve ter como meta o melhoramento contínuo do processo, através de pesquisas e análises, realização de testes, aplicação de novas técnicas, procedimentos operacionais etc. A perfuração de rocha é um processo complexo possui uma gama de equipamentos, ferramentas de apoio, de avanço e de corte para atender às necessidades de diferentes minas, associados a cada uma dessas variações estão os diversos fatores que implicam na operação e nos resultados, demandando, em muitos casos, estudos específicos.

Um fator muito importante, porém ainda pouco estudado, é o desgaste das ferramentas de corte, além de ser um item de alto custo, reduz o desempenho do processo, tanto em termos de taxa de avanço quanto em qualidade do furo, e, geralmente, está associado às deficiências operacionais ou do equipamento de perfuração.

Nesse contexto, o presente trabalho faz uma abordagem dos principais fatores que influenciam no desgaste das ferramentas de corte, do tipo Broca

Tricônica, e descreve pontos potenciais de coleta de dados importantes, para produzir uma matriz de informações, que serão úteis em posteriores análises operacionais. Para tal, foi realizada uma revisão a fim de obter embasamento teórico para os resultados pretendidos, optando-se por estudar o método de perfuração rotativa com brocas tricônicas para simplificar o processo de pesquisa e análise sobre o tema tratado.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem a finalidade de fazer um levantamento dos principais fatores que influenciam no desgaste das ferramentas de corte, do tipo Broca Tricônica, englobando assim variáveis do processo como um todo, identificar fontes potenciais de informações a fim de desenvolver procedimentos para coleta e armazenagem de dados que auxiliem na formação de uma matriz de dados e variáveis reais para monitoramento e avaliação dos resultados e dos fatores que interferem na vida útil das ferramentas de corte e, conseqüentemente, na qualidade da perfuração, possibilitando reduzir a desinformação de bancos de dados do processo, obter maior confiabilidade nas análises operacionais, e melhor controle do processo e de custos operacionais. Além de fornecer uma fonte de pesquisa literária sobre o assunto abordado.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PERFURAÇÃO DE ROCHA

Na maioria dos projetos de mineração o método de lavra do material requer a aplicação das técnicas de perfuração e desmonte de rochas. Quando se usa este método de lavra, a perfuração da rocha é a primeira operação unitária a ser realizada dentro do campo da mineração. A literatura mostra que a perfuração de rochas dispõe de três principais métodos de perfuração aplicados à mineração (Figura 01):

- Perfuração rotativa com brocas tricônicas (Holler Bit);
- Perfuração roto-percussiva com martelo de superfície (Top-Hammer);
- Perfuração roto-percussiva com martelo de fundo de furo ou furo abaixo (Down the Hole).

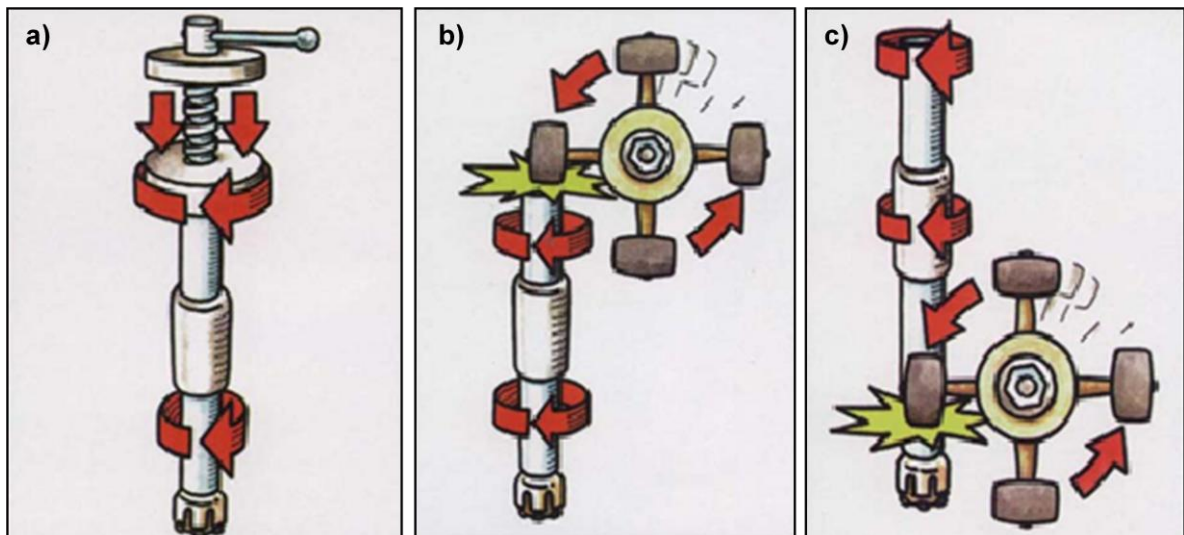


FIGURA 01 – Ilustração das forças aplicadas nos métodos: a) rotativo; b) martelo de superfície; c) martelo de fundo de furo. Fonte: MORAIS (2001)

Destes, apenas o método de perfuração rotativa com brocas tricônicas será abordado nesse trabalho.

2.1.1 Perfuração rotativa

A perfuração rotativa é um método de grande aplicação em minerações a céu aberto, para a realização de furos de maiores diâmetros. Os diâmetros das brocas variam de 2" a 17 ½"(50 a 444 mm), sendo a faixa de aplicação mais freqüente na mineração a céu aberto de 6" a 12 ¼"(152 a 311 mm). Diâmetros maiores estão limitados às minas com uma elevada produção, segundo a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO (2010). Atendendo a uma variedade de litotipos.

O equipamento de perfuração é montado sobre uma plataforma ou carreta para facilitar a locomoção, estas plataformas são grandes e pesadas (Figura 02). A pressão de avanço é realizada por energia hidráulica, e a rotação, é obtida através de um comando hidráulico ou motor elétrico, aplicado no topo do conjunto de hastes por um sistema conhecido como cabeça rotativa. A maioria das plataformas de perfuração utiliza mastros e hastes longas para fornecer a perfuração em um único passe. As taxas de rotação variam de 50 a 120 rpm, e o peso aplicado no bit varia de 0,5 t/pol do diâmetro da broca em rochas menos resistentes, e cerca de 4 t/pol para rochas mais resistentes (FERNBERG, s.d.).

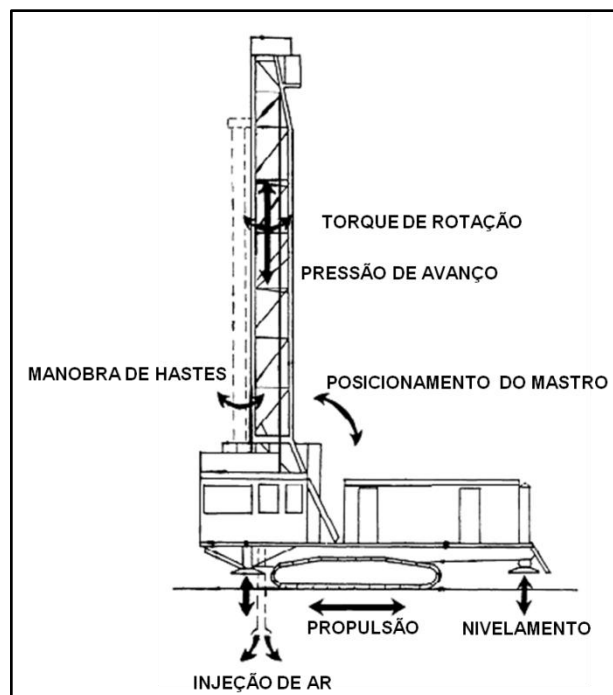


FIGURA 02 – Esquema de um equipamento de perfuração rotativa.

Fonte: Adaptada de HARTMAN (1992)

As perfuratrizes rotativas transmitem à broca somente movimento de rotação, não havendo, portanto, percussões como no método de perfuração roto-percussiva. A demolição da rocha no furo é realizada pela ação simultânea da rotação e do peso aplicados à broca situada na extremidade inferior da coluna de perfuração.

Segundo FERNBERG (s.d.), a perfuração rotativa pode ser subdividida em perfuração de corte rotativo e de esmagamento rotativo. Corte Rotativo cria o furo através de forças de cisalhamento, excedendo a resistência de cisalhamento das rochas. A broca é forjada com insertos de ligas de metal duro, e a energia para quebrar a rocha é fornecida pelo torque de rotação nas hastes de perfuração. O esmagamento rotativo quebra a rocha através de uma carga pontual elevada, realizada pela broca dentada, que é empurrada para baixo com força elevada.

Usualmente, as brocas de perfuração rotativa são classificadas em dois tipos, as rotativas sem partes móveis e as rotativas com partes móveis. As brocas de perfuração rotativas de interesse para o presente trabalho, brocas tricônicas, são definidas como brocas rotativas com partes móveis, e serão estudadas na subseção seguinte.

2.2 BROCAS TRICÔNICAS

As brocas com partes móveis são aquelas que possuem vários cones (de um a quatro) sobre os quais se encontram fixados os elementos cortantes. Os componentes principais das brocas tricônicas são: o corpo, os cones, os rolamentos, os elementos de corte e o sistema de limpeza – jets (Figura 03). Os cones são montados sobre os eixos dos rolamentos, que são integrados ao corpo da broca. Os elementos cortantes são dispostos sobre os cones em linhas circunferenciais, que podem ser dentes ou botões (insertos).

A broca é constituída por três patas dispostas em intervalos de 120° para formar o corpo da broca, e rosca que irá conectá-la à coluna de perfuração, as patas também são usinadas de modo a segurar os jets e as superfícies de rolamentos (ATLAS COPCO, s.d.). Os jets, também conhecidos como nozzles são orifícios que injetam o fluido de limpeza no fundo do furo. O fluido, água ou ar comprimido, é

transportado pelo centro da coluna de perfuração e dirigido em alta velocidade para a face do fundo do furo através desses orifícios.



FIGURA 03 – Os principais elementos de uma broca tricônica. Fonte: MORAIS (2001)

De acordo com PUC-RIO (2010), esse tipo de broca apresenta um offset entre os cones, que é a medida de quanto os eixos dos cones encontram-se deslocados em relação ao eixo principal de rotação da coluna de perfuração, de tal forma que estes eixos não se interceptem em um ponto comum, Figura 04.

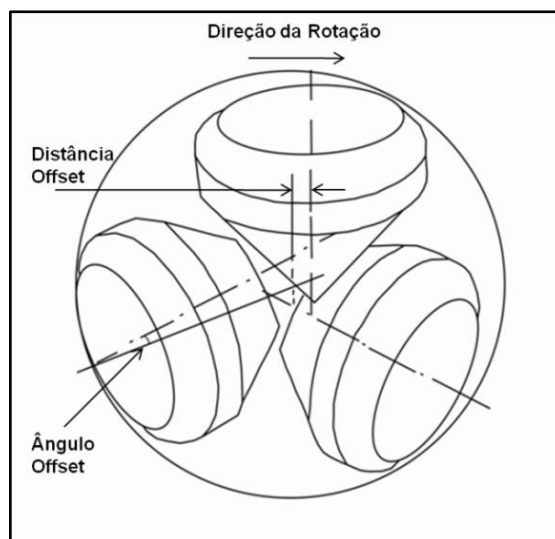


FIGURA 04 – Esquema do offset das brocas tricônicas.

Fonte: PUC-RIO (s.d.)

2.2.1 Atuação da broca sobre a rocha

Na perfuração rotativa, a broca ataca a rocha com a energia fornecida pela máquina à haste de perfuração, que transmite a rotação e o força de avanço (carga) para a broca. Segundo MORAIS (2001), o mecanismo de avanço aplica uma carga acima de 65% do peso da máquina, forçando a broca em direção à rocha. Essa pressão distribui a força aplicada em uma zona entorno da broca como uma deformação plástica (THE OIL [2010]). O torque aplicado faz com que os cones girem em torno de seus respectivos eixos e apresente outros elementos de corte à face de rocha a ser perfurada (HARTMAN, 1992). A broca quebra e remove a rocha por uma ação de raspagem em rochas macias, esmagamento-trituração-lasqueamento em rochas duras ou por uma combinação destas ações, CROSBY (1998 apud MORAIS, 2001). A Figura 05 ilustra este modelo de corte.

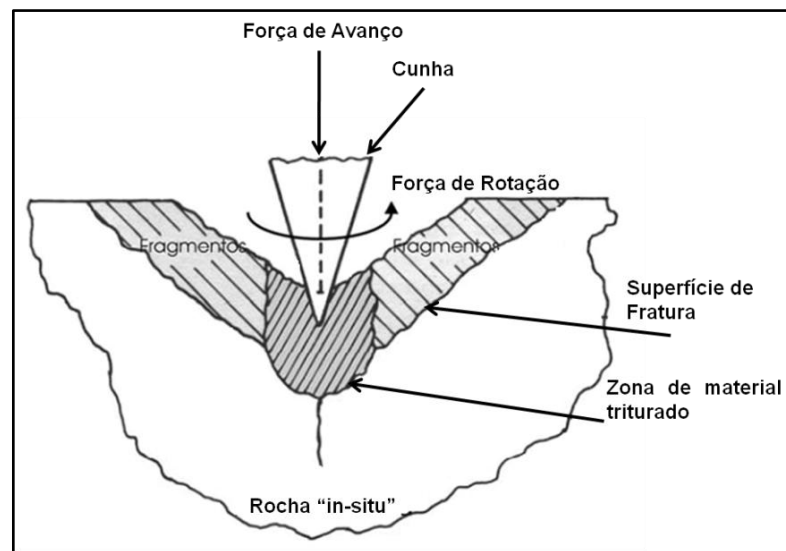


FIGURA 05 – Modelo físico de penetração para o método rotativo. Fonte: MORAIS (2001)

Essas duas forças devem ser reguladas para gerar a fragmentação efetiva à medida que se avança a perfuração. É importante que, no início do furo, conhecido como processo de embocamento do furo, a rotação e o peso inicial sejam baixos, suficientes apenas para permitir que a broca se mantenha em contato com a superfície da rocha e possa avançar sem trepidações na direção desejada.

2.2.2 Classificação das Brocas

As brocas tricônicas podem ser classificadas em função do sistema de circulação do fluido através da broca, do design do mecanismo de rolamento dos cones e da aplicação da broca de acordo com a faixa de resistência das rochas.

Quanto ao sistema de circulação do fluido, segundo MORAIS (2001), as brocas podem ser de circulação regular de fluido (Figura 06 - a), circulação regular com distribuição de ar (Figura 06 - b) ou circulação de jato de ar (Figura 06 - c).

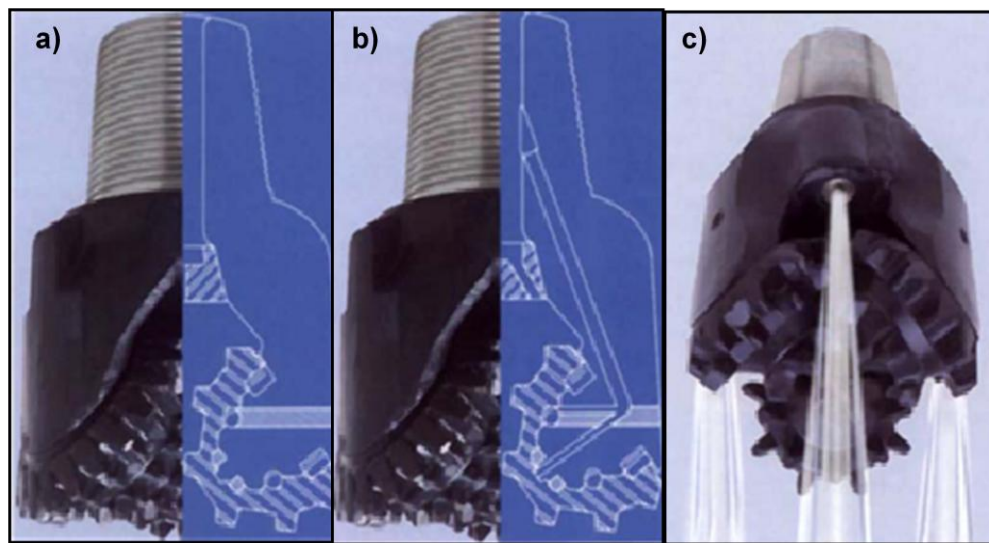


FIGURA 06 – a) Circulação regular de fluido; b) Circulação com distribuição de ar; c) Circulação de jato de ar. Fonte: MORAIS (2001).

No primeiro caso, o sistema fornece uma circulação eficiente direto ao centro da broca para limpar os dentes e o fundo do furo. Podem ser encontradas brocas com abertura completa ou com três orifícios de saída de fluido. Quando a broca é do tipo circulação regular com distribuição de ar, o suprimento de ar é balanceado para resfriar os rolamentos e para limpar o fundo do furo, neste caso é necessária uma válvula de distribuição do ar. Nas brocas de circulação de jato de ar, os três orifícios de circulação, de acordo com o tamanho, regulam a pressão de saída do ar e direcionam o fluido direto para o fundo do furo fornecendo uma eficiente limpeza, VAREL (s.d. apud MORAIS, 2001).

Em relação ao design do mecanismo de rolamento dos cones, são encontradas, Brocas com Rolamento Aberto; Brocas com Rolamento Selado; Brocas

com Circulação de Jato de Ar e Brocas Journal Bearing. De acordo com a faixa de resistência da rocha é possível encontrar diferentes tipos de brocas que apresentam variações em relação ao tipo, geometria, forma, tamanho e quantidade dos elementos de corte inseridos nos cones da brocas (ver subseção 2.2.3).

2.2.3 Tipos de elementos de corte

As brocas tricônicas podem ser classificadas de acordo com os elementos de corte. Os elementos de corte podem ser de face dura, cobertura endurecida ou insertos de carboneto de tungstênio. As brocas com elementos de corte de face dura ou cobertura endurecida são denominadas de brocas dentadas e as de insertos de tungstênio são denominadas de brocas de botões, KARANAM & MISRA (1998, apud MORAIS, 2001). As brocas dentadas têm sua estrutura cortante fresada no próprio cone (BRAGA, 2009). Já as de botões, têm os insertos de carboneto de tungstênio instalados por meio de soldagem ou compressão mecânica obtida através de diferencial térmico (RICARDO; CATALANI, 2007). Cada cone tem dois, três ou quatro anéis de elementos de corte. Os elementos de corte são dispostos de tal forma que a face da rocha é apresentada a vários elementos de corte de cada linha da superfície do cone (Figura 07).

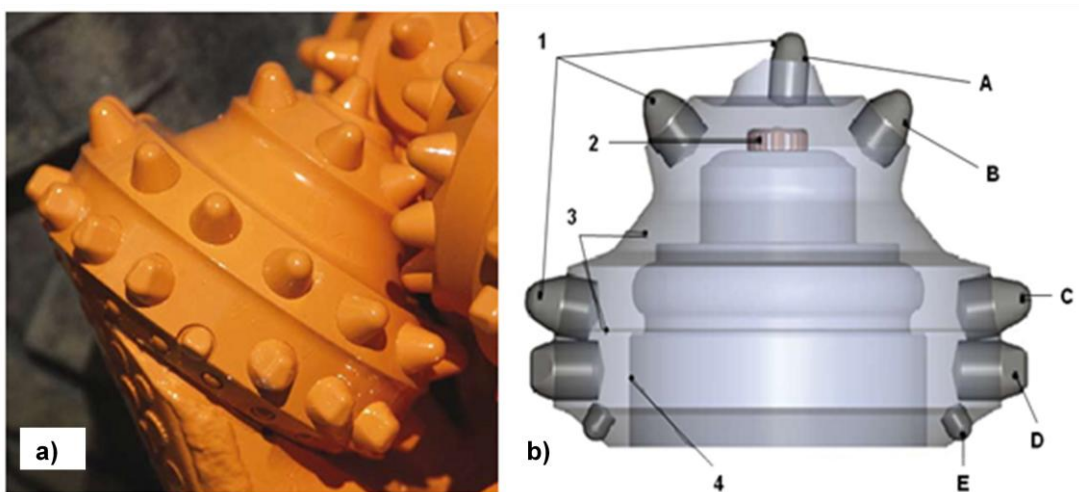


FIGURA 07 – a) Ilustração das linhas de elementos de corte na superfície do cone; b) vista transversal do cone, com os principais componentes do cone e a classificação das linhas de elementos de corte.

Fonte: ATLAS COPCO, (s.d.)



Sendo:

- 1 – **Insertos de Carboneto de Tungstênio:** insertos pressionados em material de aço mais macio, elementos que atuam sobre a superfície da rocha.
- 2 – **Botão de Pressão do Cone:** feito de material resistente ao desgaste usado para receber as cargas axiais dos rolamentos.
- 3 – **Superfície Externa do Cone:** superfície onde os insertos são fixados e se apresenta as estrias do cone.
- 4 – **Cone Interno:** onde os elementos do rolamento se movimentam.

A – Nariz; B – Linha interna; C – Linha próxima da linha de base; D – Linha de base; E – Linha de base oblíqua

Em relação à resistência à compressão da rocha que está sendo perfurada, encontram-se diferentes tipos de broca em função da variação das características dos elementos de corte. Para brocas dentadas, ocorrem variações no tamanho e na quantidade de dentes na superfície dos cones (Tabela 1). Nas brocas de botões, essas variações ocorrem tanto no tamanho e quantidade de botões na superfície dos cones, quanto na geometria e forma dos insertos (Tabela 2). Em rochas muito resistentes e abrasivas os dentes de aço perdem o corte rapidamente, reduzindo sua eficácia como ferramenta de corte, dessa forma, o uso de brocas dentadas é mais indicado para rochas relativamente brandas (HARTMAN, 1992), enquanto que em formações mais resistentes e abrasivas as brocas de botões têm melhor desempenho.

Tabela 1: Tipos de brocas dentadas para diferentes formações rochosas.

Classificação da Formação Rochosa						
		Macia	Macia – Média	Média	Dura	Muito Dura
Broca Dentada						

Fonte: THOMAS (2008)









Tabela 2: Tipos de brocas de botões para diferentes formações rochosas.

Classificação da Formação Rochosa					
Muito Macia		Macia	Média	Dura	Muito Dura
Broca de Botões					

Fonte: THOMAS (2008)

A Tabela 3 apresenta as principais geometrias dos insertos de carboneto de tungstênio com as respectivas aplicações em relação à resistência à compressão da rocha a ser perfurada.

Tabela 3: Geometria dos insertos e suas aplicações.

Geometria	Forma	Formação/ Aplicação	Geometria	Forma	Formação/ Aplicação
	Ovóide ou Topo Arredondado	Dura/ Muito Dura		Chisel (Talhadeira)	Macia/ Macia-Média
	Ogiva	Dura		Chisel de 90° (Talhadeira)	Macia/Média (Ele aumenta a capacidade das linhas de base de cortar a parede do furo.)
	Cônica	Média/ Média-Dura		Chisel de Crista em Cunha (Talhadeira)	Usado exclusivamente nas linhas de base. Mais resistente que os insertos de formas Cônica e Chisel.
	Super Scoop (Pá)	Muito Macia		Dentado de Topo Plano	São usados sobre a borda do colar do cone e sobre as patas da broca para proteger contra o desgaste.

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

2.3 DESGASTE DE BROCAS TRICÔNICAS

Como em todo o processo de perfuração, as ferramentas de corte têm um limite de operação, conhecido como vida útil da ferramenta, geralmente pré-estabelecido pelos fabricantes, porém, quando em uso, a vida útil das brocas pode variar. Na maioria, a vida útil da broca sofre redução, principalmente, em função do desgaste, que pode ser acentuado pela aplicação inadequada e/ou quando submetidas a práticas e condições de operação impróprias.

No final da vida útil, as estruturas de corte das brocas tricônicas tornam-se ineficazes, quer seja devido ao desgaste ou quebra, resultando na redução da taxa de penetração e no aumento do custo efetivo da operação (ATLAS COPCO, s.d.). Por isso, é importante fazer o monitoramento de desgaste nas ferramentas de corte, bem como de todos os elementos de perfuração, a fim efetuar a troca quando estes chegarem ao fim da vida.

A avaliação do desgaste pode frequentemente fornecer informações que ajudarão na seleção do tipo de broca mais apropriado e ajudar a determinar mudanças convenientes nas práticas operacionais. Classificar o desgaste das brocas e avaliar os resultados é uma prática que pode aumentar a eficiência do processo e reduzir os custos de perfuração.




2.3.1 Principais características de desgaste em brocas tricônicas

De acordo com o Sistema de Classificação de Desgaste IADC, da International Association of Drilling Contractors (IADC), são apresentadas discussões e fotografias sobre os possíveis tipos de desgastes de brocas tricônicas, bem como as situações que são geralmente encontradas no campo (Tabela 4). Nesse sistema, a classificação considera tanto a condição da estrutura de corte como dos rolamentos e orifícios para injeção do fluido de limpeza (nozzles).






Tabela 4: Tipos de desgastes em brocas tricônicas que mais ocorrem no campo.

TIPOS DE DESGASTE	DISCUSSÕES
<p data-bbox="336 331 639 360">Cones quebrados (BC)*</p> 	<p data-bbox="746 331 1426 416">A broca apresenta um ou mais cones quebrados em dois ou mais pedaços, mas que possua a maioria dos cones ainda ligada à broca. Causas possíveis:</p> <ul data-bbox="746 450 1426 600" style="list-style-type: none"> - Interferência de Cones - onde os cones interferem um sobre o outro depois de uma falha do rolamento, quebrando um ou mais cones; - Trepidações da coluna de perfuração.
<p data-bbox="256 609 719 638">Elementos de corte quebrados (BT)*</p> 	<p data-bbox="746 609 1426 663">Se a broca tem pouco tempo de uso, pode estar associada:</p> <ul data-bbox="746 674 1426 936" style="list-style-type: none"> - Broca trabalhando sobre detritos; - Broca batendo em uma saliência ou no fundo do furo bruscamente; - Necessidade de um amortecedor; - Excesso de carga ou rotação para a aplicação, indicado por quebra na base dos elementos de corte ou de elementos na linha de base; - Formação muito dura para o tipo de broca, indicado pela quebra de dentes nas linhas internas.
<p data-bbox="360 945 616 974">Embolamento (BU)*</p> 	<p data-bbox="746 945 1426 1061">Nesse caso, a estrutura de corte de uma broca será parcialmente ou completamente coberta por fragmentos e/ou lama que se aglomeraram sobre e entre os cones. Algumas causas são:</p> <ul data-bbox="746 1095 1426 1214" style="list-style-type: none"> - Limpeza Inadequada do fundo do furo; - Forçar a broca sobre os fragmentos de rocha com o sistema de limpeza desligado; - Perfurar material pastoso (siltitos muito úmidos / xisto).
<p data-bbox="360 1223 616 1252">Cone rachado (CC)*</p> 	<p data-bbox="746 1223 1426 1276">A rachadura no cone indica o início de quebra ou perda de cone, pode ter como causas possíveis:</p> <ul data-bbox="746 1310 1426 1491" style="list-style-type: none"> - Detrito no fundo do furo; - Broca batendo em uma saliência ou no fundo do furo; - Trepidação da coluna de perfuração; - Sobreaquecimento da broca (pouco ar através dos rolamentos); - Erosão da superfície do cone.
<p data-bbox="352 1500 624 1529">Cone arrastado (CD)*</p> 	<p data-bbox="746 1500 1426 1617">Indica que um ou mais dos cones não giraram durante boa parte da operação da broca, apresenta um ou mais pontos de desgaste acumulados. Algumas das causas possíveis são:</p> <ul data-bbox="746 1628 1426 1769" style="list-style-type: none"> - Falha do rolamento em um ou mais cones; - Detrito acumulado entre os cones; - Atrito causando interferência dos cones; - Broca "embolada"; - Fluxo de ar obstruído.
<p data-bbox="312 1805 663 1834">Interferência de cones (CI)*</p> 	<p data-bbox="746 1805 1426 1921">A interferência de cones pode gerar sulcos no cone, quebra dos elementos de corte, e algumas vezes, perda quando operando em formações resistentes. Algumas das causas:</p> <ul data-bbox="746 1955 1426 2009" style="list-style-type: none"> - Broca começando a ficar presa; - A falha do rolamento em um ou mais cones.






Continuação (1) – Tabela 4

TIPOS DE DESGASTE	DISCUSSÕES
<p>Perda da parte central do cone (CR)*</p> 	<p>Ocorre quando o centro do cone e os dentes são gastos e/ou quebrados. Algumas causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - A abrasividade da formação superior a resistência ao desgaste do material; - Erosão da superfície do cone resultando na perda dos elementos de corte; - Detrito no furo causando a ruptura dos elementos de corte do centro do cone; - Volume de ar baixa causando o acúmulo de fragmentos no centro do furo.
<p>Lasqueamento dos dentes (CT)*</p> 	<p>Um elemento de corte é considerado lasqueado se uma parte substancial dele ainda permanece acima da superfície do cone. Em insertos de carboneto de tungstênio, o lasqueamento pode levar à quebra dos botões. Algumas causas disto são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Carga de impacto devido à perfuração irregular, trepidação. - Leve interferência de cone.
<p>Erosão (ER)*</p> 	<p>A erosão leva à perda de material da superfície do cone, que pode levar a perda dos insertos devido à redução do apoio e aderência destes pelo material da superfície dos cones. A erosão pode ser causada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fragmentos de formações abrasivas erodindo a superfície do cone devido fluxo de ar inadequado; - Excesso de ar, resultando em erosão por alta velocidade dos fragmentos; - Rocha abrasiva em contato com a superfície do cone entre os dentes causado pela carga excessiva.
<p>Desgaste da crista (FC)*</p> 	<p>Ocorre uma redução, na mesma altura de todos os elementos de corte, provocando o achatamento destes. As causas do desgaste de crista são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Baixa carga sobre a broca e (alta rotação) para a formação rochosa; - A broca selecionada é muito macia para a rocha a ser perfurada.
<p>Aquecimento (HC)*</p> 	<p>Ocorre quando um elemento de corte é repetidamente aquecido devido ao trabalho de pressão, rotação, ou arraste sobre a rocha, e é então rapidamente resfriado durante muitos ciclos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geralmente ocorre em formações duras, resistentes e abrasivas. - Nem sempre causa a fratura do elemento de corte, embora a quebra possa ser resultante do aquecimento. - Pode resultar no início de arraste dos elementos de corte.
<p>Desgaste por detritos (JD)*</p> 	<p>Presença de marcas em qualquer parte da broca. Os detritos podem levar a quebra dos dentes e redução do desempenho da broca. Algumas as causas são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Detrito que caiu no furo da superfície; - Detrito da coluna de perfuração (Pinos alargadores, lâminas de estabilizadores, etc.); - Material da própria broca (dentes ou inserto de carboneto de tungstênio, etc).

Continuação (2) – Tabela 4

TIPOS DE DESGASTE	DISCUSSÕES
<p data-bbox="357 331 619 362">Perda de cone (LC)*</p> 	<p data-bbox="778 331 1315 362">Algumas das causas de perda de cones são:</p> <ul data-bbox="746 389 1382 452" style="list-style-type: none"> - Broca batendo na borda ou no fundo do furo. - Falha do rolamento (causando a retenção de cone). <p data-bbox="746 483 1428 573">O cone perdido deve ser retirado do furo antes da perfuração continuar, para não se tornar uma nova fonte de desgaste. Exceto se não for possível fazer a retirada.</p>
<p data-bbox="341 609 635 640">Perda de nozzles (LN)*</p> 	<p data-bbox="746 604 1428 757">Um nozzle perdido provoca uma diminuição da pressão o que reduz o ar para os rolamentos e a eficiência de limpeza do furo. Um nozzle perdido também é uma fonte de lixo para o buraco. Algumas causas são:</p> <ul data-bbox="746 788 1428 878" style="list-style-type: none"> - Tipo de nozzle ou instalação inadequada de nozzle; - Dano mecânico ou de erosão dos bicos e/ou sistema de nozzles retido.
<p data-bbox="271 887 708 918">Perda de elementos de corte (LT)*</p> 	<p data-bbox="746 882 1428 1034">Esta característica deixa os elementos de corte inteiros dentro do furo. Os elementos de corte perdidos se tornam detritos dentro do furo, podendo gerar outro tipo de desgaste. Isso às vezes é precedido por uma rotação dos elementos de corte. Pode ser causada por:</p> <ul data-bbox="746 1066 1428 1155" style="list-style-type: none"> - Erosão da superfície do cone; - Uma fissura no cone que diminui a aderência do elemento de corte.
<p data-bbox="319 1164 660 1196">Brocas comprimidas (PB)*</p> 	<p data-bbox="746 1160 1428 1312">Isso ocorre quando as brocas são mecanicamente forçadas a um diâmetro inferior ao original. Isso pode levar a fratura e lasqueamento dos elementos de corte, interferência de cone, arraste de cones e muitas outras características de desgaste. Algumas possíveis causas:</p> <ul data-bbox="746 1344 1428 1433" style="list-style-type: none"> - Broca sendo forçada a um furo de tamanho menor. - Broca sendo comprimida pelo centralizador de broca. - Tamanho errado do centralizador de broca.
<p data-bbox="341 1442 635 1473">Nozzle obstruído (PN)*</p> 	<p data-bbox="746 1438 1428 1559">Um nozzle obstruído pode conduzir a uma redução da quantidade de ar ejetado no furo, gerando a limpeza deficiente do furo e causando outros tipos de desgaste. Isso pode ser causado por:</p> <ul data-bbox="746 1590 1428 1888" style="list-style-type: none"> - Empurrar a broca contra fragmentos com o ar desligado. - Material sólido que entra na coluna de perfuração através da broca sendo levado aos nozzles quando a circulação de ar é retomada. - Borracha, ferrugem ou outro material solto dentro das mangueiras ou tubulações de ar. - Detritos – pedras, terra, papel, latas de refrigerantes, etc – deixados em uma nova haste que acabou de ser instalada na perfuratriz.

Continuação (3) – Tabela 4

TIPOS DE DESGASTE	DISCUSSÕES
<p>Base arredondada (RG)*</p> 	<p>Isto descreve o desgaste que ocorre nos elementos de corte das linhas de base dos cones. Isso pode ser causado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Excesso de rotação; - Repasse de furo de tamanho menor; - Broca muito macia para o tipo de rocha a ser perfurada, rochas abrasivas.
<p>Danos ao colar (SD)*</p> 	<p>Esse tipo de desgaste pode levar a fratura dos rolamentos, perda de cone, etc. Algumas causas de danos ao colar são:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Detritos no furo; - Compressão da broca fazendo com que o colar da broca seja a parte mais externa da broca.
<p>Desgaste de autoafiação (SS)*</p> 	<p>Uma característica de desgaste que ocorre quando os dentes se desgastam de tal forma que eles ficam pontiagudos.</p> <p>Esta característica é muitas vezes considerada como uma indicação de seleção adequada da broca e dos parâmetros de operação.</p>
<p>Tracking (TR)</p> 	<p>Ocorre quando os elementos de corte se entrelaçam como uma engrenagem na base do furo. Os elementos de corte se assemelham com uma "gota", enquanto a superfície do cone será desgastada entre as linhas. Esse tipo de desgaste pode ser causado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perfuração de formação que muda de frágil à plástica. - Perfuração em formações duras. - Às vezes pode ser atenuado usando uma broca de material mais macio para perfurar a formação ou usando um padrão diferente de estrutura de corte.
<p>Elementos de corte desgastados (WT)*</p> 	<p>Esta é uma característica comum de desgaste tanto para brocas dentadas quanto para brocas de botões. Quando WT ocorre em brocas dentadas, muitas vezes também é apropriado observar a ocorrência de autoafiação (SS) ou desgaste dos dentes com achatamento da crista (FC).</p>

* As iniciais das siglas são correspondentes às denominações em inglês.

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

2.3.2 A estrutura do Sistema de Classificação de Desgaste IADC

De acordo com ATLAS COPCO (s.d.) o atual Sistema de Classificação de Desgaste IADC pode ser aplicado a todos os tipos de brocas tricônicas, bem como todos os tipos de bits sem partes móveis. Segue uma descrição do sistema com cada um dos componentes avaliados, explicando como estes são aplicados às brocas tricônicas. A Tabela 5 mostra a descrição do sistema IADC.

Tabela 5: Sistema IADC de classificação de desgaste em brocas tricônicas.

Estrutura de Corte				Rolamentos		Observações	
Linhas Internas	Linhas de Base	Característica de Desgaste	Localização	Pior Rolamento	Localização do Pior Rolamento	Outro Desgaste	Desgaste do Colar da Broca
(I)	(G)	(D)	(L)	(B)	(L)	(O)	(ST)

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

A tabela 6 apresenta as instruções para o processo de classificação do desgaste nas brocas tricônicas – Sistema IADC de classificação de desgaste em ferramentas de corte.

Tabela 6: Instrução para o preenchimento da tabela de classificação de desgaste.

Estrutura de Corte	Linhas Internas (I)	É usada para relatar o estado das estruturas de corte em todas as linhas de elementos de corte que não tocam a parede do furo. Usar escala da Figura 08.
	Linhas de Base (G)	É usada para relatar o estado das estruturas de corte apenas daqueles elementos de corte que tocam a parede do furo: a linha mais periférica em cada cone. Usar escala da Figura 08.
	Característica de Desgaste (D)	Usa-se um código de duas letras para indicar a característica de desgaste da estrutura de corte ou de outras características de desgaste apresentadas pela broca. Ver tabela 7.
	Localização (L)	Usa-se uma letra e/ou número como código para indicar a localização da face da broca onde a característica de desgaste ocorre. Ver tabela 8.

Continuação (1) – Tabela 6

Rolamentos	Pior Rolamento (B)	<p>Usa-se um código alfanumérico, dependendo do tipo de rolamento, para indicar a condição do PIOR rolamento na broca.</p> <p>Para brocas com rolamento não-selado (Air ou Open Bearings):</p> <p>0 – indica que nenhuma vida útil do rolamento foi usada (rolamento novo).</p> <p>8 – indica que toda a vida do rolamento foi usada (travado ou perdido).</p> <p>Para brocas com rolamentos selados (Journal ou Roller Bearings):</p> <p>E – indica uma selagem eficiente; F – indica selagem ineficiente.</p>
	Localização do Pior Rolamento (L)	<p>É utilizada, em trabalhos de perfuração, para dar a localização do PIOR rolamento:</p> <p>1 – Cone 1</p> <p>2 – Cone 2</p> <p>3 – Cone 3.</p>
Observações	Outro Desgaste (O)	<p>É utilizada para reportar qualquer característica de desgaste da broca, em adição às características de desgaste reportadas na coluna 3 (D). Note que esta coluna não se restringe apenas às características da estrutura de corte. Ver tabela 7.</p>
	Desgaste do Colar da Broca (ST)	<p>A coluna 8 (ST) é usada para informar o grau de desgaste no colar da broca:</p> <p>L – desgaste leve (ST elementos de corte ainda presentes)</p> <p>M – desgaste médio (ST elementos de corte começando a serem expostos e/ou rebaixados)</p> <p>H – alto desgaste (ST elementos de corte perdidos ou totalmente desgastados, rolamentos expostos).</p>

A Figura 08 apresenta uma escala linear de 0 a 8 usada para descrever a condição da estrutura de corte.

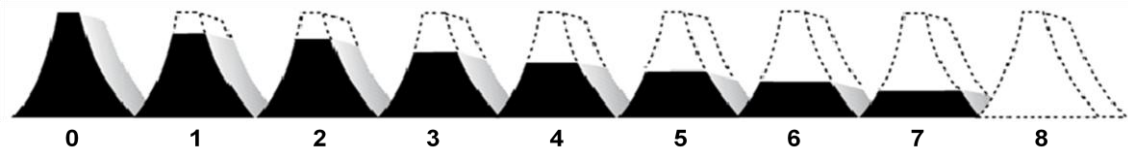


FIGURA 08 – Ilustra o grau de desgaste ou quebra no comprimento do elemento de corte.

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

0 – indica que não há perda no comprimento do elemento de corte devido ao desgaste ou quebra.

8 – indica a perda total do comprimento do elemento de corte, devido ao desgaste ou quebra.

A Tabela 7 lista os códigos de duas letras que identificam as características de desgaste que podem ser encontradas em campo.

Tabela 7: Características de desgaste e seus códigos de representação.

Desgaste/Outra Características de Desgaste			
Código	Tipo de Desgaste	Código	Tipo de Desgaste
BC*	Cones quebrados	LC*	Perda de cone
BT	Elementos de corte quebrados	LN	Perda de nozzles
BU	Embolamento	LT	Perda de elementos de corte
CC*	Cone rachado	PB	Brocas comprimidas
CD*	Cone arrastado	PN	Nozzle obstruído
CI	Interferência de cones	RG	Base arredondada
CR	Perda da parte central do cone	SD	Danos ao colar
CT	Lasqueamento dos elementos de corte	SS	Desgaste de autoafiação
ER	Erosão	TR	Tracking
FC	Desgaste de crista	WT	Elementos de corte desgastados
HC	Aquecimento	NO	Sem desgaste / Nenhum outro desgaste
JD	Desgaste por detritos		

*Mostrar cones (s) no campo Localização, Coluna 4.

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

O código (NO), Sem desgaste/Nenhum outro desgaste, é usado para indicar que não há de desgaste ou sinais de outro tipo de desgaste. Isso geralmente é usado quando a broca é retirada depois de um uso por curto prazo por um motivo não relacionado com a broca, mas com desgaste na coluna de perfuração, por exemplo.

A Tabela 8 lista os códigos utilizados para descrever a localização das características de desgaste apresentadas pelas brocas.

Tabela 8: Localização da ocorrência de desgaste na ferramenta de corte.

Localização – Broca Tricônica	
N – Linhas de Nariz	Cone (s)
M – Linhas Intermediárias	1
H – Linhas de Base	2
A – Todas as Linhas	3

Fonte: ATLAS COPCO (s.d.)

A vida da broca não tem que ser totalmente utilizada para que o desgaste seja avaliado, uma vez que a finalidade da classificação é determinar o que está acontecendo com a broca durante seu uso, bem como determinar o estado de desgaste da broca. Com a classificação adequada do desgaste das ferramentas de corte será possível: fornecer informações sobre o desempenho de cada tipo de broca utilizado em várias condições de operação; conduzir a uma avaliação do desempenho e das características do desgaste das brocas baseado nas práticas de perfuração utilizadas; conduzir a decisões que visam obter mais economia nas operações de perfuração.

2.4 PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NO DESGASTE DAS BROCAS TRICÔNICAS

O desgaste favorece a redução da vida útil e/ou do desempenho das ferramentas de corte, bem como das demais ferramentas e equipamentos utilizados

na perfuração. O desgaste pode ser influenciado por muitos fatores, tanto pela especificação incorreta do tipo de broca para a rocha a ser perfurada, quanto por práticas e condições inadequadas de armazenamento, manuseio e operação. Com base na pesquisa realizada foram identificados os fatores a seguir discutidos como potenciais fontes de desgaste.

2.4.1 Propriedades da rocha

Cada tipo de rocha apresenta propriedades intrínsecas e responde de forma diferente quando submetida à técnica de perfuração. O desempenho do sistema de perfuração é usualmente representado pela perfurabilidade das rochas, definida como a taxa de penetração real ou projetada para um dado tipo de rocha (MORAIS, 2001). O conhecimento da perfurabilidade das rochas é de imensa importância para a seleção da técnica apropriada de perfuração e do tipo de broca que possa desenvolver melhor desempenho e/ou menor taxa de desgaste.

O índice de perfurabilidade, assim como o desgaste da ferramenta de corte, pode ser considerado uma indicação relativa de alguma propriedade da rocha, a variação da perfurabilidade pode advertir a ocorrência de desgaste na ferramenta de corte e/ou a necessidade de mudança da broca. Muitas propriedades que afetam a perfurabilidade, também interferem no desgaste das ferramentas de corte, entre elas podem ser citadas, resistência a compressão, dureza, abrasividade, textura e aspectos da geologia estrutural.

Segundo MORAIS (2001), a resistência à compressão é uma medida que indica a tensão máxima que uma rocha suporta sob determinadas condições, muito usada para medir a perfurabilidade da rocha. Pode-se dizer, generalizando, que a perfurabilidade da rocha é inversamente proporcional à sua resistência à compressão, dessa forma, deve-se aplicar peso sobre a broca suficiente para vencer a resistência oferecida pela rocha à perfuração. Pode-se dizer que quanto maior a resistência da rocha maior é a capacidade desta causar desgaste nas ferramentas de corte.

A dureza é um termo ainda mal definido (MORAIS, 2001), mas para KARANAM & MISRA (1999 apud MORAIS, 2001) é definida, com referência as

aplicações de engenharia, como uma função da composição do mineral duro e da competência, resistência e capacidade de ligação da matriz do material. Quanto mais minerais duros presentes na rocha e maior a resistência e a capacidade de ligação entre esses minerais na matriz, mais difícil será para perfurar, causando um desgaste maior do metal duro da broca, se não houver uma combinação adequada dos parâmetros de perfuração.

A textura da rocha entra nesse contexto, em função de alguns aspectos como tamanho do grão, forma e grau de interligação, porosidade e a orientação dos grãos afetam outras propriedades da rocha como a resistência e a dureza, conseqüentemente, o índice de perfurabilidade das rochas e o desgaste das ferramentas de corte. Uma rocha com granulação grossa na estrutura é mais fácil de perfurar e causa menor desgaste do que uma de granulação fina (MORAIS, 2001), nesse caso, por exemplo, a limpeza deficiente do furo ou alta velocidade do fluxo de ar poderia aumentar o efeito de desgaste das partículas sobre a broca, e também sobre a coluna de perfuração.

A abrasividade não é uma propriedade fundamental de um material e não há um índice simples que possa unicamente fornecer sua medida (MORAIS, 2001). No entanto, o desgaste de uma ferramenta de corte, está diretamente associado à abrasividade da rocha, de forma que a taxa de desgaste de uma ferramenta durante o corte da rocha tem sido tomada como uma medida da abrasividade da rocha. A ação da abrasividade pode reduzir o diâmetro da broca e os elementos de corte, reduzindo a vida útil da broca, e favorecendo o rompimento por fadiga, principalmente se operando com limpeza deficiente ou com rotação em excesso.

Aspectos da geologia estrutural, tais como, fraturas, falhas, dobras, descontinuidades, foliações, planos de acamamento e outros, possuem grande influência na perfurabilidade das rochas, e também no desgaste das ferramentas de corte, além de causar o aprisionamento das ferramentas de perfuração no furo.

Em rochas fraturadas há uma grande tendência de escape do ar de limpeza do furo pelas fendas das rochas, reduzindo a capacidade do fluxo de ar em remover os fragmentos do furo, ou necessitando de maior velocidade do fluxo para a retirada dos fragmentos, isso aumenta o efeito de desgaste das partículas; também pode ser necessário perfurar com menor pressão de avanço e rotação para evitar a quebra dos elementos de corte e/ou dos cones devido ao choque da broca com essas

estruturas. De acordo com a ATLAS COPCO (s.d.), a perfurabilidade da rocha pode ser consideravelmente afetada pelo ângulo no qual uma broca intercepta camadas ou planos de xistosidade. Perfuração em direções paralelas aos planos de estratificação/xistosidade geralmente produz maior taxa de perfuração e menos desgaste na broca de perfuração.

Ainda há pouca literatura a cerca dos efeitos das propriedades da rocha sobre o desgaste das ferramentas de corte, ou mesmo do conjunto da coluna de perfuração, da mesma forma, o efeito destas sobre a perfurabilidade das rochas, o que se observa é que estas propriedades se combinam de forma que refletem nos resultados do processo de perfuração.

2.4.2 Especificação incorreta da broca

A seleção da broca é influenciada principalmente pelas características da formação rochosa a ser perfurada, mas também é necessário considerar os equipamentos de perfuração que serão usados e as prioridades do projeto em relação aos custos, pois em muitos casos não é possível, simultaneamente, desenvolver altas taxas de penetração com elevada vida útil das ferramentas de corte.

As brocas são encontradas, no mercado, em tipos que variam de acordo com a resistência à compressão das rochas, cada modelo de broca e geometria dos elementos de corte, são apropriados para uma determinada faixa de resistência à compressão da rocha. É importante conhecer a geologia do projeto e os diferentes valores de resistência à compressão uniaxial das rochas para especificar o modelo de broca mais adequado. O ideal seria trabalhar com mais de um tipo de broca, preferencialmente, um modelo para cada faixa de resistência da rocha: macia, média e dura.

Outro ponto importante é operar com os parâmetros de perfuração adequados, pois estes podem afetar tanto o desgaste das ferramentas de corte quanto o desempenho do processo, principalmente se estiverem associados a uma seleção errada do tipo de broca.

2.4.3 Falhas no sistema de limpeza

Um parâmetro muito importante na perfuração rotativa é a retirada dos fragmentos de dentro do furo. Esta remoção do material escavado do fundo do furo é conhecida como limpeza do furo. As funções da limpeza do furo consistem em, resfriar a broca, remover os fragmentos de rocha da face do furo e transportar esses fragmentos para a superfície (FOX, 2005), além de lubrificar a coluna de perfuração, evitar o influxo de fluidos indesejáveis e ajudar na perfuração pela ação de erosão (BRAGA, 2009). Se o material for removido eficientemente, a taxa de penetração poderá ser melhorada, não somente pela quantidade de material removido pelo jato de limpeza, mas também, devido à exposição de uma nova superfície para ataque direto pelo dispositivo de quebra (MORAIS, 2001).

Na mineração, os principais fluidos são a água, muito usada na perfuração em minas subterrânea por reduzir a emissão de poeira, e o ar mais usado na perfuração em minas a céu aberto. A água pode ser considerada como melhor fluido a ser usado, pois além de controlar a geração de poeira efetua o resfriamento dos componentes de perfuração. No entanto, dependendo da formação rochosa, o uso de ar é mais recomendado.

Os detritos são carregados pelo fluido para a superfície através de um espaço entre as hastes e a parede do furo, chamado de espaço anular. É importante que esse espaço seja suficiente para que os fragmentos maiores possam passar. Caso contrário, os fragmentos serão acumulados entre a parede do furo e das hastes, ou sobre a própria broca, até que sejam pequenos o suficiente para sair do furo (FOX, 2005). Isso resulta em excesso de poeira e desgaste acelerado da broca e das hastes de perfuração.

Também é necessário que o volume de ar seja suficiente para produzir uma velocidade do fluxo capaz de efetuar a retirada desses fragmentos. De acordo com MORAIS (2001), a produtividade do equipamento de perfuração está diretamente relacionada com a vazão de ar do compressor. É necessário estabelecer uma rotina de aferição da vazão do compressor, pois com a utilização da perfuratriz existe uma tendência de diminuição da vazão em relação à vazão nominal do equipamento. A vazão real do compressor é influenciada pelos seguintes fatores: qualidade da manutenção do equipamento; condições operacionais: altitude e temperatura; vida

do equipamento (horas trabalhadas). Para ATLAS COPCO (s.d.), volume suficiente de ar deve ser fornecido para produzir uma velocidade de retorno anular de 5.000 - 7.000 pés/min para rochas brandas e/ou material seco e 7.000 - 9.000 pés/min, para material úmido e/ou rochas duras, quando a taxa de penetração for de 35 m por hora ou mais.

A velocidade necessária para remover os fragmentos do furo depende de propriedades da rocha e dos fragmentos gerados (RICARDO; CATALANI, 2007):

- Densidade específica da rocha perfurada – fragmentos de rochas com maiores densidades requerem maior velocidade;
- Tamanho das partículas geradas – quanto maior a partícula, maior a velocidade de limpeza necessária;
- Forma das partículas – partículas esféricas necessitam de maior velocidade que partículas lamelares ou em forma de folhas, por exemplo.

De fato, a limpeza inadequada do furo implica na redução da taxa de penetração e na redução da vida útil da broca, bem como dos componentes da coluna de perfuração. Uma limpeza deficiente pode resultar da obstrução dos nozzles ou da baixa vazão de ar do compressor, que pode ser devido a um baixo rendimento por problemas mecânicos ou erro de especificação (MORAIS, 2001).

Se a velocidade é baixa, o material escavado não será removido do fundo do furo dentro de uma revolução da broca, dessa forma, eles serão retrabalhados e partículas muito finas serão geradas, podendo se acumular sobre as hastes e/ou broca acelerando o processo de desgaste das ferramentas de corte. Por outro lado, se a velocidade desenvolvida for elevada, os fragmentos terão seu movimento acelerado aumentando o efeito de abrasão das partículas sobre a broca e hastes, além de gerar mais poeira.

A limpeza deficiente também pode gerar o travamento dos cones desencadeando de outros tipos de desgaste, e o superaquecimento tanto dos rolamentos quanto dos elementos de corte, pois sob condições de perfuração com ar, a broca atingirá temperaturas altas, suficientes para alterar as propriedades dos materiais, alcançadas pelo tratamento térmico, favorecendo o processo de desgaste.

Nesse contexto, é importante, na perfuração rotativa, que haja sempre uma preocupação especial com o sistema de limpeza para assegurar um desempenho ótimo da broca quando a perfuração estiver trabalhando com peso e rotação apropriados.

2.4.4 Força de avanço

Para que ocorra um trabalho efetivo de escavação da rocha e conseqüentemente o desenvolvimento da perfuração é necessário que seja exercido um esforço sobre a perfuratriz. O peso necessário depende da resistência à compressão das rochas, no geral, rochas brandas requerem menor pressão de avanço enquanto rochas duras necessitam de maior pressão de avanço.

A finalidade do esforço de avanço é manter a broca em contato direto com a rocha, enquanto avança no furo, sem a aplicação desse esforço, ou quando insuficiente, a perfuratriz fica saltitando, improdutivamente, e favorecendo ao desgaste da ferramenta de corte, devido aos sucessivos choques da broca contra a rocha e ao atrito dos elementos de corte com a rocha, gerado pelo movimento de rotação, bem como da coluna de perfuração e do equipamento, devido à vibração.

Entretanto não deve ser aplicado em excesso, pois pode deteriorar os rolamentos da broca, favorecendo uma série de desgaste relacionado aos rolamentos, aos elementos de corte a ao próprio material da broca, além de reduzir a taxa de penetração, principalmente se o sistema de limpeza for deficiente.

2.4.5 Velocidade de rotação (RPM)

Segundo MORAIS (2001), as perfuratrizes possuem um sistema de rotação montado, cabeça rotativa, geralmente, sobre uma unidade que desliza no mastro da perfuratriz com o objetivo de girar a coluna de perfuração e a broca para efetuar quebra da rocha dentro do furo. A velocidade de rotação também depende da resistência à compressão das rochas, obedecendo à seguinte regra: quando

perfurando rochas brandas a rotação deve ser maior enquanto que em rochas duras a velocidade deve ser menor.

O aumento da velocidade de rotação significa maior contato de corte no fundo do furo e, para uma mesma pressão de avanço, proporciona um aumento da taxa de penetração. Entretanto, quando aplicada em excesso, pode gerar vibração excessiva da perfuratriz, aquecimento, desgaste e/ou perda dos elementos de corte e/ou dos rolamentos da broca, tanto pelo atrito com a rocha ou fragmentos de rocha quanto pelo superaquecimento.

Em suma, esses três parâmetros – força de avanço, rotação e sistema de limpeza – quando combinados de forma adequada, geram bons resultados, tanto em termos de desempenho do processo quanto em termos de redução do desgaste das ferramentas de corte e dos demais componentes da perfuração.

2.4.6 Vibração

O ambiente de perfuração e, especialmente, a perfuração de rochas muito resistentes, a operação com maiores valores de pressão de avanço e/ou de rotação induz vibrações severas sobre o equipamento de perfuração. A vibração provoca um aumento de desgaste e quebra do equipamento, reduz a vida da ferramenta de corte e a taxa de penetração, além de criar um ambiente desagradável para o operador.

Operar com velocidade crítica de rotação resulta em severos choques contra a parede do furo e vibrações que causam danos à coluna de perfuração, fadigas no colar da broca e nas conexões dos elementos da coluna de perfuração (COBERN; WASSELL, s.d.). Operar com carga sobre a broca insuficiente favorece a trepidação da coluna de perfuração, isso pode gerar quebra de cones e de elementos de corte, além de reduzir a taxa de penetração.

De acordo com COBERN; WASSELL (s.d.), o único meio de controlar a vibração, atualmente, é alterar tanto a velocidade de rotação quanto o peso sobre a broca, de modo a transmitir a energia necessária eficientemente, e minimizar o retorno desta sob a forma de pequenas vibrações. Entretanto, as alterações desses parâmetros para reduzir a vibração geralmente têm um efeito negativo sobre a eficiência da perfuração. Na perfuração, é comum o uso de um amortecedor, com o

objetivo de reduzir os efeitos negativos de vibrações nocivas, que retornam sobre a coluna de perfuração. Os centralizadores, além de evitar o desvio do furo, podem reduzir o contato da coluna de perfuração e da broca com a parede do furo.

Existem diferentes modos de vibrações responsáveis pelas deficiências de perfuração e danos às ferramentas, e conhecer o modo de vibração que ocorre em determinada operação é extremamente útil no fornecimento de dados para a realização de modificações. Listados em ordem decrescente de gravidade são eles (COBERN; WASSELL, s.d.): giro na direção oposta, sitck-slip, trepidações do bit e vibração lateral.

2.4.7 Armazenamento e manuseio

A vida das ferramentas de corte, bem como as hastes e as ferramentas de apoio, também dependem dos cuidados durante o armazenamento e manuseio destes componentes. Segundo RICARDO; CATALANI (2007), alguns cuidados podem ser tomados: deve-se utilizar para armazenamento ambientes secos e abrigados, para evitar corrosão; manter as roscas sempre engraxadas e protegidas contra poeira e detritos de rochas, para evitar corrosão e ajudar no acoplamento e desacoplamento das peças, e evitar que a poeira ou os detritos se tornem fontes de desgaste por abrasão; não bater nas ferramentas, evitar a queda e não identificar os componentes através de entalhes ou gravações, pois as ranhuras deixadas pelos impactos e/ou pelos entalhes podem se tornar pontos preferenciais para a ocorrência de rupturas; verificar se o furo de limpeza está desobstruído para garantir a limpeza do furo, e se o material está em boas condições de uso para evitar excesso de tensão e superaquecimento das peças do sistema de perfuração, bem como desperdício de tempo para efetuar a substituição.

2.4.8 Lubrificação

A lubrificação das partes móveis das perfuratrizes é necessária para permitir o funcionamento normal e a vida útil prolongada, sendo importante proporcionar

lubrificação adequada, efetiva e contínua. Da mesma forma, é essencial a lubrificação das roscas dos componentes da coluna de perfuração, inclusive da rosca das brocas, principalmente, quando utiliza o sistema de limpeza a ar, isso devido ao fato de que o resfriamento proporcionado não é suficiente para impedir altas temperaturas que o processo pode fornecer (RICARDO; CATALANI, 2007).

O lubrificante impede o contato direto de aço contra aço, oferecendo uma superfície de material lubrificante, impossibilitando a soldagem, fornecendo vedação suficiente contra perdas de ar, facilitando o desacoplamento das partes rosqueadas e reduzindo o desgaste prematuro e a oxidação. Além de manter o equipamento em boas condições de uso, permitindo que opere com os parâmetros adequados, obtendo bom desempenho na perfuração.

Por isso é necessário o uso do lubrificante com as características adequadas. De acordo com RICARDO; CATALANI (2007), as principais características do lubrificante são:

- **Resistência à água:** a adição de substâncias químicas permite a emulsificação dos lubrificantes, possibilitando ao lubrificante misturar-se com água ou vapor de água e assim aderência às superfícies que necessitam de lubrificação;
- **Viscosidade correta:** o lubrificante deve possuir viscosidade tal qual evite o emperramento das válvulas ou a eliminação do filme lubrificante pelo próprio fluxo de limpeza;
- **Uniformidade:** todo lubrificante deve manter suas características à baixas e altas temperaturas e pressões;
- **Ponto de fulgor:** o lubrificante deve possuir ponto de fulgor elevado para evitar a dieselização, incandescência, que destrói o filme de lubrificante, uma vez que queima e superaquece a perfuratriz;
- **Não-tóxico:** não deve ser tóxico tanto para manuseio quanto para exposição dos operadores, principalmente em ambiente fechado.

2.4.9 Manutenção

Para manter o bom funcionamento dos equipamentos, garantindo que estes executem com parâmetros adequados e prolonguem a vida útil dos componentes da perfuração, é importante deter atenção à manutenção dos equipamentos, e realizar as etapas de manutenção preventiva dentro do prazo limite. A manutenção preventiva é realizada após o equipamento ter trabalhado um determinado número de horas ou ter perfurado um determinado número de metros. Esse limite pode ser excedido em até 10% do valor, mais do que isso pode gerar problemas maiores (RICARDO; CATALANI, 2007).

O descuido do equipamento e a não realização das etapas de manutenção preventiva levam a um envelhecimento precoce e perda da sua efetividade, favorecendo também o desgaste das ferramentas de corte, bem como de outros componentes, devido os reflexos sobre os principais parâmetros de execução dos furos, carga sobre a broca, velocidade de rotação e fluxo de limpeza.

Para uma boa manutenção é conveniente dispor de uma ficha para registro dos principais fatos associados ao equipamento, número de horas trabalhadas, número de horas paradas, motivo de paradas, reparos realizados, etc. Com esse controle é possível, entre outras coisas, detectar a repetição de um mesmo tipo de avaria que possa estar relacionada com um vício de operação ou com a má qualidade de uma peça, da mesma forma, pode-se avaliar se o desgaste da ferramenta de corte pode ser associado a um problema de manutenção do equipamento, ou a outros fatores.

2.5 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS QUE PODEM AUXILIAR NO CONTROLE DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

O controle de desgaste das ferramentas de corte pode ser obtido através de simples procedimentos operacionais que geram dados para o monitoramento e avaliação dos fatores que favorecem o desgaste. Um único procedimento, ou a soma de dois ou mais, pode fornecer dados para análises diferenciadas do sistema.

O resultado é melhoria do processo em termos de qualidade, produtividade e custos. Para análise do desgaste de brocas tricônicas podem ser realizados procedimentos como:

2.5.1 Gerenciamento da perfuração

O gerenciamento da equipe e dos equipamentos de perfuração é útil para se fazer o controle da disponibilidade física, utilização e rendimento dos equipamentos de perfuração. É possível determinar as horas trabalhadas e horas improdutivoas, e verificar a necessidade de realizar a manutenção preventiva na data planejada; fazer o acompanhamento de ocorrência de manutenção corretiva e dos fatores que desencadearam os problemas. O gerenciamento da perfuração pode ajudar a manter o equipamento em boas condições de operação para que ele possa aplicar os parâmetros de perfuração adequadamente obtendo bom desempenho tanto do equipamento quanto da broca.

2.5.2 Associar a geologia da mina à execução dos furos

É importante o conhecimento geológico da mina para especificar o tipo de broca mais adequada para trabalhar e para identificar o material que a broca está perfurando em um determinado polígono de perfuração. Dessa forma, é possível analisar o desempenho das ferramentas de corte em diferentes litologias, avaliar o grau de desgaste, e ainda auxiliar na caracterização das rochas, na definição de algumas propriedades ainda desconhecidas.

Algumas minerações trabalham com um sistema de navegação de perfuratrizes por Global Positioning Systems (GPS), capaz de fornecer em tempo real, informações sobre a localização do equipamento, polígono de perfuração que o equipamento está perfurando, identificação do furo, podendo dispensar a marcação topográfica dos furos, entre outras vantagens. Se associada a informações sobre a geologia, é possível fazer a interação da malha de perfuração com a geologia da mina, identificar que material está sendo perfurado em cada furo executado.

2.5.3 Monitoramento dos parâmetros de perfuração

O monitoramento dos parâmetros de perfuração é muito importante para avaliar o desempenho da perfuração, desempenho da broca e do equipamento. Nesse contexto, é possível verificar o uso de parâmetros de perfuração inadequados, vícios operacionais ou falhas no equipamento.

Através do monitoramento dos parâmetros de perfuração, de acordo com MORAIS (2001), ainda pode-se fazer a caracterização do maciço rochoso em termos de resistência à compressão e grau de fraturamento da rocha, se estes ainda forem desconhecidos, bem como, a localização de camadas de minério e limites entre rochas, de forma rápida e precisa. A resistência da rocha é obtida através da energia de perfuração, que é calculada com base no torque e na velocidade de rotação, força de avanço e taxa de penetração. O índice de qualidade da rocha (RQI) é obtido a partir da vibração da cabeça rotativa, esta vibração está relacionada com o grau de fraturamento do maciço. Quanto maior o valor da vibração, maior o grau de fraturamento do maciço (MORAIS, 2001).

Os equipamentos de perfuração dispõem de monitores que apresentam os valores dos parâmetros desenvolvidos pela máquina durante operação. Eles são fornecidos através de um sistema de sensores que relata, em tempo real, as principais informações do processo de perfuração. As principais informações monitoradas são:

- Pressão de avanço (psi);
- Pressão de rotação (psi);
- Taxa de penetração (m/h);
- Amperagem do motor de rotação (A);
- Rotações por minuto da broca (rpm);
- Pressão de ar da broca (psi);
- Profundidade do furo (m);
- Velocidade de vibração da cabeça rotativa (mm/s).

A coleta dos dados pode ser realizada manualmente, registrando os valores apresentados nos monitores em relatórios de perfuração, através de sistemas de

computador portátil ou cartão onde os dados são carregados, ou através de transmissão por frequência de rádio para computadores de escritórios da mina, permitindo o monitoramento em tempo real. No segundo caso, há também a vantagem de maior precisão devido ao menor intervalo na coleta de dados, são coletados a curtos intervalos do furo (6 a 30 cm), (MORAIS, 2001).

2.5.4 Monitoramento do desgaste das brocas

Realizar o monitoramento do desgaste das ferramentas de corte é importante para identificar os tipos de desgastes que ocorrem na operação, a frequência de ocorrência, a velocidade de desgaste, também é possível fazer uma setorização dos tipos de desgaste em função da geologia da mina. Com esses dados pode se avaliar os possíveis fatores que geraram ou favoreceram para o desgaste da broca como, especificação incorreta do tipo de broca para a rocha a ser perfurada, propriedades das rochas, práticas e condições inadequadas de armazenamento, manuseio e operação, ou falhas do equipamento.

Esse monitoramento não deve ser realizado apenas quando a broca estiver totalmente desgastada, mas durante toda a sua vida útil. Os resultados do monitoramento poderão servir como guia para estimar a vida útil das ferramentas de corte e o momento de realizar a troca da broca.

2.6 A INFLUÊNCIA DAS BROCAS SOBRE O CUSTO TOTAL DE PERFURAÇÃO

Para MORAIS (2001), o custo com ferramentas de corte, constitui um dos itens críticos das análises de custo da operação, devido por um lado a falta de informações técnicas e por outro a sua importância. O peso que exerce sobre o custo do metro perfurado oscila entre 15 a 40% do custo total.

O custo total da perfuração por metro (CT) é calculado pela seguinte fórmula JIMENO (1994 apud MORAIS, 2001):

$$CT (R\$/m) = Ch / Tp + CB / VB \quad (1)$$

Sendo:

CT – Custo total por metro perfurado (R\$/m)

Ch – Custo horário da perfuratriz (R\$/h)

Tp – Taxa de penetração (m/h)

CB – Custo da broca (R\$)

VB – Vida útil da broca (m)

Mas o custo horário da perfuratriz (Ch) resulta da somatória de custos diretos e indiretos (MORAIS, 2001), assim:

$$Ch (R\$/h) = (Ma + MO + En + Lu + HE) + (I + A) \quad (2)$$

Sendo:

Custos diretos:

Ma – Custo de manutenção (R\$/h)

MO – Custo de mão-de-obra (R\$/h)

En – Custo de energia (R\$/h)

Lu – Custo de lubrificação (R\$/h)

HE – Custo de hastes e estabilizadores (R\$/h)

Custos indiretos:

I – Custo de impostos/seguros (R\$/h)

A – Custo de amortização (R\$/h)

Resultando que o custo total de perfuração (CT) pode ser também expresso pela seguinte equação, apesar de ser mais comum a aplicação da form. (1):

$$CT (R\$/m) = (Ma + MO + En + Lu + HE + I + A) / Tp + CB/ VB \quad (3)$$

O que se observa é que tanto os metros perfurados pela broca, tidos como a vida útil dessas ferramentas de corte, quanto à taxa de penetração desenvolvida não

tem impactos sobre o custo por hora, mas exercem influência sobre o custo total da perfuração. Em muitas análises essas duas unidades têm sido utilizadas para avaliar o desempenho das brocas, porém muitas conclusões errôneas podem ser elaboradas a partir do uso destes dois fatores isoladamente (ATLAS COPCO, s.d.).

Segundo MORAIS (2001), na maioria das minas, a avaliação da broca de perfuração é baseada somente na vida útil, sendo considerada como melhor broca aquela que apresenta maior vida útil. Essa análise traz efeitos negativos, pois a vida útil da broca tem pequeno impacto no custo total de perfuração. A avaliação adequada da broca de perfuração deve ser baseada em três elementos: taxa de penetração, vida útil e preço, em ordem decrescente de importância. Em suma, a melhor broca é aquela que conduz ao menor custo total de perfuração.

Para MORAIS (2001), a form. (1) é talvez uma das mais úteis ferramentas para identificação das variáveis que têm maior influência sobre o custo total de perfuração e determinar que áreas devam receber maior concentração de esforços para a redução do custo de perfuração. Também pode servir como um guia para definir o momento de troca da broca, pois é possível determinar a vida útil da broca a partir da taxa de penetração (ATLAS COPCO, s.d.).

Parâmetros da perfuração como peso sobre a broca, velocidade de rotação e o grau de desgaste das ferramentas de corte implicam nos custos totais de perfuração, pois geram impactos sobre a taxa de penetração e sobre a vida útil das brocas. Em algumas operações, a força de avanço e a rotação são limitadas, mesmo que não haja problemas com vibrações, a fim de aumentar a vida da broca, no entanto, isso é muitas vezes uma estratégia errada no que diz respeito ao custo total por unidade de perfuração (FOX, 2005), pois varia os valores de taxa de penetração. Também é comum aumentar a pressão do equipamento para reduzir o custo por metro, mas essa prática pode sobrecarregar a broca e gerar outros problemas, refletindo nos custos totais.

Um estudo cuidadoso dos registros de operação das ferramentas de corte pode ser de grande ajuda para determinar os tipos de brocas adequados e as melhores condições de operação para uso (ATLAS COPCO, s.d.).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na pesquisa realizada e analisando os tipos de desgastes mais ocorrentes observou-se que os fatores que exercem maior influência no desgaste das ferramentas de corte são:

- **Propriedades da rocha:** a falta do conhecimento geológico e da caracterização do maciço não permite a escolha adequada da broca e o uso dos parâmetros de operação para se obter melhor desempenho do processo e gerar menos desgaste nas ferramentas de corte;
- **Especificação incorreta da broca:** esse fator pode acelerar o processo de desgaste e gerar baixo desempenho da perfuração;
- **Falha no sistema de limpeza:** se o sistema de limpeza apresentar falhas tanto no que diz respeito à vazão e velocidade do ar quanto no espaço anular requerido e nas vias de passagem do fluxo de limpeza, irá acelerar o processo de desgaste e gerar outros problemas que podem se tornar novas fontes de desgaste e danos à ferramenta de corte;
- **Força de avanço e velocidade de rotação:** a combinação inadequada desses dois fatores além de reduzir o desempenho do processo e a vida útil das ferramentas de corte, pode gerar outros fatores que favorecem o desgaste como a vibração;
- **Vibração:** em excesso provoca um aumento de desgaste e quebras do equipamento, reduz a vida da ferramenta de corte e a taxa de penetração, além de criar um ambiente desagradável para o operador;
- **Armazenagem e manuseio:** o tratamento inadequado das ferramentas de corte, bem como dos outros componentes de perfuração, pode gerar desgaste destes sem necessariamente estar em uso, e acelerar o processo de desgaste durante operação por fragilizar o material;
- **Lubrificação e manutenção:** estes não exercem influência direta, porém atuam como fatores agravantes. São necessários para manter o equipamento e as ferramentas de corte em bom estado, garantindo que operem com os parâmetros adequados e que reduza o desgaste prematuro.

Por isso é importante oferecer devida atenção a determinação e controle desses fatores para reduzir o processo de desgaste das ferramentas de corte. Mais do que isso, melhorar o desempenho da perfuração e reduzir o custo total.

As deficiências podem ser supridas ou minimizadas pela execução de simples práticas operacionais de monitoramento para coleta de dados que serão úteis na análise e identificação dos tipos de desgastes e dos fatores que geraram e/ou contribuíram para a ocorrência do desgaste ou que aceleraram o processo. Os dados dos mesmos procedimentos ou a interação com outros dados também podem auxiliar na análise e controle de outros parâmetros do processo. A variável tempo se torna um fator importante, quanto mais cedo forem adotadas práticas de monitoramento, melhores resultados poderão ser obtidos.

A fim de obter melhor desempenho das ferramentas de corte e reduzir o desgaste causado tanto pela especificação incorreta do tipo de broca para a rocha a ser perfurada, quanto por práticas e condições inadequadas de armazenamento, manuseio e operação, é importante realizar uma série de estudos e procedimentos que fornecerão dados pertinentes às análises operacionais de eficiência e custo:

1. Fazer um estudo geológico e a caracterização do maciço para obter informações como, resistência à compressão, perfurabilidade, dureza, abrasividade, densidade, índice de qualidade da rocha, textura e aspectos da geologia estrutural. Esses dados podem ser úteis na seleção do tipo de broca e para determinar os parâmetros de perfuração mais adequados para operar;
2. Fazer a seleção da broca em função tanto das características das rochas a serem perfuradas quanto dos equipamentos disponíveis e das prioridades do projeto, de acordo com a relação custo/benefício;
3. É importante a realização de testes primários de perfuração para avaliar o desempenho da broca selecionada, pode-se fazer um comparativo entre os dados reais e os dados estimados em função das propriedades das rochas;
4. Deve-se desenvolver procedimentos de armazenamento e manuseio para prevenir o desgaste precoce e/ou a geração de condições propícias ao desgaste durante operação;
5. Fazer a interação da malha de perfuração com a geologia da mina para identificar o material que a broca está perfurando em um determinado polígono de

perfuração, ou em cada furo executado. Dessa forma, é possível avaliar o desempenho e o desenvolvimento do desgaste nas ferramentas de corte em diferentes litologias, e associá-los com as propriedades da rocha. Isso pode ajudar a confirmar se foi selecionada a broca adequada ou se é melhor realizar testes com outros tipos de brocas. Esses dados também podem auxiliar na caracterização das rochas, na definição de algumas propriedades ainda desconhecidas;

6. Verificar as condições da broca, bem como das ferramentas de apoio, antes da instalação ou operação, quanto à presença de avarias e/ou grau de desgaste avançado, para evitar o excesso de tensões e/ou o superaquecimento da broca;

7. Desenvolver procedimentos para o monitoramento dos parâmetros de perfuração. Atualmente, as perfuratrizes podem fazer a transmissão dos parâmetros de operação dos monitores do equipamento para os computadores do escritório por frequência de rádio, permitindo o monitoramento em tempo real. Mas na maioria das minerações, esse procedimento é realizado manualmente através do registro dos dados em relatórios de campo, como o apresentado no Anexo A. E ainda através de sistemas de computador portátil ou de cartão, onde os dados são carregados e levados ao escritório. O monitoramento dos parâmetros de perfuração permite obter dados sobre a pressão de avanço, rotações por minuto da broca, taxa de penetração, profundidade do furo, pressão de rotação, pressão de ar da broca, velocidade de vibração da cabeça rotativa e amperagem do motor de rotação, úteis para avaliar o desempenho da perfuração, da broca e do equipamento, é possível verificar o uso de parâmetros de perfuração inadequados, vícios operacionais ou falhas no equipamento e associá-los ao desgaste das ferramentas de corte;

8. Desenvolver procedimentos para o monitoramento e classificação do desgaste das ferramentas de corte durante a vida útil. O monitoramento pode ser realizado através do registro das características do desgaste em relatórios de avaliação como o apresentado no Anexo B. Com os dados obtidos é possível identificar os tipos de desgastes decorrentes do processo, a frequência de ocorrência, a velocidade de desgaste, avaliar os possíveis fatores que geraram ou favoreceram para o desgaste da broca, também é possível fazer uma setorização dos tipos de desgaste em função da geologia da mina;

9. Desenvolver procedimentos para o gerenciamento da operação de perfuração. Esse gerenciamento pode ser realizado através da tecnologia do

sistema GPS, registrando os códigos aplicados no equipamento, ou manualmente através de registro em relatórios de campo como o apresentado no anexo C. É útil para determinar as horas trabalhadas e improdutivas do equipamento e avaliar a necessidade de realizar a manutenção preventiva, a fim de manter o equipamento em boas condições de operação e capaz de desenvolver os parâmetros adequadamente, e as causas da manutenção corretiva para avaliar se podem influenciar no desgaste das ferramentas de corte;

10. Desenvolver um modelo de armazenamento seguro que permita a compilação e o tratamento dos dados coletados para a realização das análises do processo que se fizerem necessárias;

11. Realizar treinamento dos responsáveis pela operação dos equipamentos, coleta e armazenagem dos dados da perfuração para garantir a geração de informações precisas e confiáveis.

Esses podem ser considerados como os principais estudos e procedimentos a serem realizados, porém é possível desenvolver outros de acordo com as deficiências do processo. Os relatórios de campo apresentados nos anexos servem de premissa e podem ser aperfeiçoados para adequá-los à realidade e necessidade de cada projeto de mineração, da mesma forma, o método de obtenção dos dados, através de sistemas de transmissão por frequência de rádio ou transferência de dados por computadores portáteis ou cartões, ou pelo método manual. Ainda que se tenha um sistema de coleta mais avançado, é interessante o segundo método para suprir possíveis falhas no sistema.

É importante que os dados sejam obtidos de forma precisa e ininterrupta para que não haja a ausência de dados nas matrizes, facilitando o processo de análise e fornecendo maior confiabilidade nas análises operacionais. Com as informações obtidas é possível fazer a compilação e interação dos dados de diferentes bancos de dados, ou fazer um comparativo com os dados registrados em relatórios de campo e os dados obtidos em outros sistemas de coleta.

Essas práticas auxiliam na formação de uma matriz de dados e variáveis reais para monitoramento e avaliação dos fatores que interferem no desgaste das ferramentas de corte, conseqüentemente, na qualidade e desempenho da perfuração, permitindo melhor controle do processo e de custos operacionais.

4 CONCLUSÃO

A vida útil das brocas é uma característica própria das ferramentas de corte que é estimada devido ao desgaste natural que ocorre quando se submete qualquer ferramenta a esforços repetitivos. Entretanto, a vida útil da ferramenta de corte pode sofrer uma redução mais rápida se a broca for submetida a condições que favoreçam o desgaste prematuro.

Como em qualquer processo de perfuração, independente do método aplicado e do tipo de ferramenta de corte utilizada, existem diversos fatores que influenciam no desgaste das brocas tricônicas utilizadas no método de perfuração rotativo, haja vista que também existem uma série de fatores que devem ser considerados na etapa de classificação do método e na seleção da broca, bem como durante toda a vida útil da ferramenta.

Cada projeto de mineração possui suas peculiaridades e no mercado existe uma gama de ferramentas de corte com aplicações diferentes, o resultado do processo de perfuração e o desempenho das brocas estão diretamente relacionados com as características, prioridades e limitações do projeto.

Existem diversos tipos de desgastes nas ferramentas de corte, abrangendo desde o material do corpo da broca e os elementos de corte, até o estado dos cones, rolamentos e dos nozzles. Esses desgastes podem estar associados tanto à especificação inadequada do tipo de broca quanto às deficiências operacionais ou do equipamento de perfuração. Muitas práticas e parâmetros de operação possuem implicação direta no desgaste das ferramentas de corte, outros atuam como fatores contribuintes e/ou agravantes do processo. Dentre esses fatores, pode-se definir como os principais, a falta de conhecimento geológico do projeto e interação deste com a malha de perfuração, a especificação incorreta do tipo de broca, práticas erradas de armazenamento e manuseio, falhas no sistema de limpeza, a aplicação inadequada de parâmetros como pressão de avanço e rotação, a vibração que pode resultar dessa combinação, e carências nas atividades de lubrificação e manutenção.

O desgaste das ferramentas de corte possui implicações no desempenho do processo de perfuração, em termos de qualidade, produtividade e custos. O

desempenho da broca em termos de taxa de penetração exerce maior influência no custo total que a própria vida útil da ferramenta de corte, mas esta exerce influência na taxa de penetração e na qualidade da perfuração, que por sua vez, irá influenciar no desempenho das etapas subseqüentes da lavra e afetar os custos totais da mineração. Por isso é importante realizar o monitoramento e classificação do desgaste nas ferramentas de corte, a fim efetuar a troca quando estes chegarem ao fim da vida. Essas práticas fornecem informações que ajudarão na seleção do tipo de broca mais apropriado e na definição de mudanças convenientes nas práticas operacionais, ainda poderão servir como guia para estimar a vida útil das ferramentas de corte e o momento de realizar a troca da broca.

Muitas deficiências no controle do desgaste das ferramentas de corte, bem como do processo de perfuração de um modo geral, podem ser supridas com a aplicação de bons procedimentos para execução das atividades e práticas de monitoramento dos parâmetros e avaliação dos resultados, que podem ser adequadas à realidade e necessidade de cada projeto. Tais como, estudo geológico e caracterização do maciço, testes de desempenho das brocas selecionadas, técnicas de armazenamento e manuseio, interação da malha de perfuração com a geologia da mina, inspeção das brocas e das ferramentas de apoio, monitoramento dos parâmetros de perfuração, monitoramento e classificação do desgaste das brocas, gerenciamento da perfuração e treinamento dos responsáveis pela operação dos equipamentos, coleta e armazenagem dos dados.

Os efeitos consistem na obtenção de informações necessárias para posteriores análises operacionais. Com as informações obtidas é possível fazer a compilação e interação dos dados de diferentes bancos de dados, ou fazer um comparativo com os dados registrados em relatórios de campo e os dados obtidos em outros sistemas de coleta, e obter maior confiabilidade nos resultados das análises. Esses procedimentos e práticas auxiliam na formação de uma matriz de dados e variáveis reais para monitoramento, classificação e avaliação dos fatores que influenciam no desgaste das ferramentas de corte, portanto, na qualidade e desempenho da perfuração, permitindo melhor controle do processo e dos custos efetivos.

REFERÊNCIAS

ATLAS COPCO. **Blasthole Drilling Handbook – Rock Drilling Tools**. 40 p. [S.l.: s.d.].

BRAGA, E. R. **Estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e em regiões anulares**. 2009. 111 f. Tese (Mestrado em Tecnologia Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia, Rio de Janeiro, 2009.

COBERN, M. E.; WASSELL, M. E. **Drilling vibration monitoring & control system**. Estados Unidos. 17 p. [s.n.: s.d.].

CROSBY, W.A. **International Drilling, Blasting and Explosives Technology Course**. Ouro Preto, 1998.1-29 p.

FERNBERG, H. **Surface drilling - Principles of Rock Drilling**. Talking Technically. [S.l.]. Atlas Copco. 3 p. [s.d.].

FOX, B. **Putting rotary drilling into perspective**. Mining & Construction. No 2, p. 18-20, 2005. -

HARTMAN, H. L. et al. **SME Mining Engineering Handbook**. 2. ed. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 1 v. cap. 9. 1992.

JIMENO, C.L. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Instituto Tecnológico Geominero de Espanã, 2ª edição, 541 p.,1994, Espanha.

KARANAM, U.M.; MISRA, B. (1998). **Principles of Rock Drilling**. Balkema, Rotterdam. 265 p.

MEYER, R. **Blasthole Drilling in open pit Mining – Optimizing the rotary drill String**. Talking Technically. [S.l.]. Atlas Copco. 2 p. [s.d.].

MORAIS, J. L. **Procedimentos e novas tecnologias de perfuração que contribuem para a melhoria da qualidade dos desmontes de rochas**. 2001. 176 f. Tese (Mestrado em Lavra de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escolas de Minas, Ouro Preto, 2001.

PUC-RIO. **Cap. 2 – Conceitos Gerais e Revisão Bibliográfica**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/.../0521482_08_cap_02.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2010.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual prático de escavação: terraplenagem e escavação de rochas**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, V. C. **Curso de min 210 - operações mineiras**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas, 2007. Apostila.

THE OIL **Drum: Drilling through Rock**. Disponível em: <<http://www.theoil Drum.com/node/5629>>. Acesso em: 20 fev. 2010. [S.l.: s.n.]

THOMAS, T. **IADC Codes**. Estados Unidos: International Association of Drilling Contractors. 2008.

VAREL Rock Bits. **Mining & Industrial**. Varel, Dallas, 1998. 18 p.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

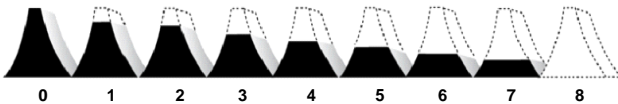
COOPER, G. A. **A proposal for the real-time measurement of drill bit tooth wear.** 2002. 8 f. Artigo academico – University of California, Department of Civil and Environmental Engineering, Berkeley. 2002.

MERRIAM – WEBSTER' s Collegiate Dictionary. 10th. ed. Estados Unidos: Merriam – Webster, Inc. 1993.

PERFORACION y voladura. Manual Practico de Voladura de EXSA – Asistencia tecnica y capacitacion para el desarrollo tecnico y empresarial de amalar. [S.l.: s.n.: s.d.]. 13 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – Instituto de geociências. **Instrumentação de Trabalhos de Conclusão de Curso: orientação para alunos de graduação.** Belém, 2008. 90 p.

ANEXO B – RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE BROCAS TRICÔNICAS

RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE BROCAS TRICÔNICAS																																																																									
Data/Hora	Equipamento	Operador		Turma	Turno	Polígono de Perfuração																																																																			
Nº DABROCA	ENTRADA		SAÍDA		MODELO	FABRICANTE	Nº DA AVALIAÇÃO																																																																		
	Data	Hora	Data	Hora																																																																					
CLASSIFICAÇÃO DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE - Sistema IADC																																																																									
Estado das Estrutura de Corte				Estado dos Rolamentos		Observações																																																																			
Linhas Internas	Linhas de Base	Característica de Desgaste	Localização do Desgaste	Condição do pior rolamento	Localização do pior rolamento	Outro Desgaste	Desgaste do Colar da Broca																																																																		
(I)* ¹	(G)* ¹	(D)* ²	(L)* ³	(B)* ⁴	(L)* ⁵	(O)* ²	(ST)* ⁶																																																																		
DADOS PARA PREENCHER A TABELA DE CLASSIFICAÇÃO																																																																									
<p>*1: Estado das estruturas de corte - observar ilustração.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0 - sem perda no comprimento</td> </tr> <tr> <td>8 - com perda total no comprimento</td> </tr> </table> 				0 - sem perda no comprimento	8 - com perda total no comprimento	<p>*4: Condição do pior rolamento.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0 - início da vida útil</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8 - fim da vida útil (travado ou perdido)</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Para brocas com rolamentos selados</td> </tr> <tr> <td>E - selagem eficiente</td> <td></td> </tr> <tr> <td>F - selagem ineficiente</td> <td></td> </tr> </table>				0 - início da vida útil		8 - fim da vida útil (travado ou perdido)		Para brocas com rolamentos selados		E - selagem eficiente		F - selagem ineficiente		<p>*2: Tipos de desgaste.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Características de Desgaste (D)/Outro Desgaste (O)</th> </tr> <tr> <th>Código</th> <th>Tipo de Desgaste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>BC*</td><td>Cones quebrados</td></tr> <tr><td>BT</td><td>Elementos de corte quebrados</td></tr> <tr><td>BU</td><td>Embolamento</td></tr> <tr><td>CC*</td><td>Cone rachado</td></tr> <tr><td>CD*</td><td>Cone arrastado</td></tr> <tr><td>CI</td><td>Interferência de cones</td></tr> <tr><td>CR</td><td>Perda da parte central do cone</td></tr> <tr><td>CT</td><td>Lasqueamento dos elementos de corte</td></tr> <tr><td>ER</td><td>Erosão</td></tr> <tr><td>FC</td><td>Desgaste de crista</td></tr> <tr><td>HC</td><td>Aquecimento</td></tr> <tr><td>JD</td><td>Desgaste por detritos</td></tr> <tr><td>LC*</td><td>Perda de cone</td></tr> <tr><td>LN</td><td>Perda de nozzles</td></tr> <tr><td>LT</td><td>Perda de elementos de corte</td></tr> <tr><td>PB</td><td>Brocas comprimidas</td></tr> <tr><td>PN</td><td>Nozzle obstruído</td></tr> <tr><td>RG</td><td>Base arredondada</td></tr> <tr><td>SD</td><td>Danos ao colar</td></tr> <tr><td>SS</td><td>Desgaste de autoafiação</td></tr> <tr><td>TR</td><td>Tracking</td></tr> <tr><td>WT</td><td>Elementos de corte desgastados</td></tr> <tr><td>NO</td><td>Sem desgaste / Nenhum outro desgaste</td></tr> </tbody> </table>				Características de Desgaste (D)/Outro Desgaste (O)		Código	Tipo de Desgaste	BC*	Cones quebrados	BT	Elementos de corte quebrados	BU	Embolamento	CC*	Cone rachado	CD*	Cone arrastado	CI	Interferência de cones	CR	Perda da parte central do cone	CT	Lasqueamento dos elementos de corte	ER	Erosão	FC	Desgaste de crista	HC	Aquecimento	JD	Desgaste por detritos	LC*	Perda de cone	LN	Perda de nozzles	LT	Perda de elementos de corte	PB	Brocas comprimidas	PN	Nozzle obstruído	RG	Base arredondada	SD	Danos ao colar	SS	Desgaste de autoafiação	TR	Tracking	WT	Elementos de corte desgastados	NO	Sem desgaste / Nenhum outro desgaste
0 - sem perda no comprimento																																																																									
8 - com perda total no comprimento																																																																									
0 - início da vida útil																																																																									
8 - fim da vida útil (travado ou perdido)																																																																									
Para brocas com rolamentos selados																																																																									
E - selagem eficiente																																																																									
F - selagem ineficiente																																																																									
Características de Desgaste (D)/Outro Desgaste (O)																																																																									
Código	Tipo de Desgaste																																																																								
BC*	Cones quebrados																																																																								
BT	Elementos de corte quebrados																																																																								
BU	Embolamento																																																																								
CC*	Cone rachado																																																																								
CD*	Cone arrastado																																																																								
CI	Interferência de cones																																																																								
CR	Perda da parte central do cone																																																																								
CT	Lasqueamento dos elementos de corte																																																																								
ER	Erosão																																																																								
FC	Desgaste de crista																																																																								
HC	Aquecimento																																																																								
JD	Desgaste por detritos																																																																								
LC*	Perda de cone																																																																								
LN	Perda de nozzles																																																																								
LT	Perda de elementos de corte																																																																								
PB	Brocas comprimidas																																																																								
PN	Nozzle obstruído																																																																								
RG	Base arredondada																																																																								
SD	Danos ao colar																																																																								
SS	Desgaste de autoafiação																																																																								
TR	Tracking																																																																								
WT	Elementos de corte desgastados																																																																								
NO	Sem desgaste / Nenhum outro desgaste																																																																								
<p>*3: Local de ocorrência do desgaste - linhas e/ou cones.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Localização do Desgaste</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N – Linhas de Nariz</td> <td>Cone (s)</td> </tr> <tr> <td>M – Linhas Intermediárias</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>H – Linhas de Base</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>A – Todas as Linhas</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>				Localização do Desgaste		N – Linhas de Nariz	Cone (s)	M – Linhas Intermediárias	1	H – Linhas de Base	2	A – Todas as Linhas	3	<p>*5: Localização do pior rolamento.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Cone 1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Cone 2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Cone 3</td> <td>3</td> </tr> </table>				Cone 1	1	Cone 2	2	Cone 3	3	<p>*6: Desgaste no colar da broca.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Desgaste leve</td> <td>L</td> </tr> <tr> <td>Desgaste médio</td> <td>M</td> </tr> <tr> <td>Alto desgaste</td> <td>H</td> </tr> </table>				Desgaste leve	L	Desgaste médio	M	Alto desgaste	H																																								
Localização do Desgaste																																																																									
N – Linhas de Nariz	Cone (s)																																																																								
M – Linhas Intermediárias	1																																																																								
H – Linhas de Base	2																																																																								
A – Todas as Linhas	3																																																																								
Cone 1	1																																																																								
Cone 2	2																																																																								
Cone 3	3																																																																								
Desgaste leve	L																																																																								
Desgaste médio	M																																																																								
Alto desgaste	H																																																																								
<p>COMENTÁRIOS:</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>																																																																									

*: Mostrar cones (s) no campo Localização, Coluna (L).

ANEXO C – RELATÓRIO DE PERFURAÇÃO PARA GERENCIAMENTO DA PERFURAÇÃO

RELATÓRIO DE PERFURAÇÃO - CONTROLE DE HORAS									
Equipamento:		Operador:		Turno/Turma:		Horímetro Inicial:		Horímetro Final:	
CÓDIGOS DE OPERAÇÃO*									
TRABALHANDO - A		MANUTENÇÃO CORRETIVA - C		PARADA DETONAÇÃO - D		PARADA INTERNA - F		ATRASO OPERACIONAL - G	
Código	Descrição	Código	Descrição	Código	Descrição	Código	Descrição	Código	Descrição
1	Perfurando-Produção	1	Lubrificação	1	Ag. Detonação	1	Revezamento/Refeição	1	Locomoção
2	Retaludamento	2	Mecânica	2	Manobra de Cabo Det.	2	Troca de Turno/Inspeção	2	Loc. Própria
3	Manut. Pistas	3	Elétrica	3	Man. Cabo Det. Saída	3	Inspeção-Operador	3	Repassando Furo
4	Perfurando-Pesquisa	4	Borracharia	4	Man. Cabo Det. Retorno	4	Nivelamento de Praça	4	Desgarrando Hastes
MANUTENÇÃO PREVENTIVA - B		Rádio		PARA EXTERNA - E		5	Parada Operacional	5	Limpeza de Praça
Código	Descrição	6	Lavador	Código	Descrição	6	Ag. Condições de Acesso	6	Limpeza de Furo
1	Lubrificação	7	Redes e Linhas	1	Falta de Energia	7	Ag. Abastecimento		
2	Mecânica	8	Ag. Peça	2	Chuva	8	Abastecimento		
3	Elétrica	9	Material de desgaste	3	Neblina	9	Abast. Água		
4	Borracharia	10	Acidente			10	Manobra de Cabo		
5	Inspeção	11	Ar Condicionado			11	Loc. Carreta		
6	Lavador	12	Elevação de Mastro			12	Ag. Auxiliar de Serviço		
7	Redes e Linhas					13	Troca de Comp. Perfuração		

Data	Início	Final	Código	Comentários	Data	Início	Final	Código	Comentários

*Esses códigos de operação são alguns exemplos dos códigos existentes na operação de perfuração, eles podem variar entre minerações diferentes.