

# *Monografia de Graduação*

**Estudos dos principais tipos de brocas de perfuração de poços de petróleo e suas demandas tribológicas.**

**Danilo Fagundes Pascoal de Moraes**

**Natal, fevereiro de 2014**

DANILO FAGUNDES PASCOAL DE MORAIS

**ESTUDO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE BROCAS DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE  
PETRÓLEO E SUAS DEMANDAS TRIBOLÓGICAS**

Monografia apresentada a Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, para obtenção do certificado de bolsista de iniciação científica da ANP PRH-14.

Orientadora: Prof. Dr Andeson Clayton Vieira-UFRN - Departamento de engenharia mecânica.

NATAL-RN

2014

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, a minha família por ter me ajudado a chegar onde cheguei.

Aos professores que contribuíram com o trabalho.

Aos colegas de curso.

A ANP por colaborar e financiar toda a pesquisa.

## RESUMO

A indústria petrolífera compõe uma área que está em um crescimento exponencial, com isso a necessidade de se produzir petróleo nos últimos anos tem trazido à universidade desafios e oportunidades para que juntos sejam feitos estudos avançados. O desgaste de brocas de perfuração tem causado prejuízos, o que torna relevante o estudo dos principais motivos que causam esse desgaste. Só assim será possível indicar quais as melhores condições de uso de cada tipo de broca, facilitando a escolha do tipo mais adequado à formação geológica a ser perfurada. As brocas do tipo PDC têm apresentado menor desgaste em perfurações com formações geológicas mais complexas. Já as brocas tricônicas são usadas em formações mais simples, por apresentarem baixo custo comparado aos das brocas de PDC. Outros fatores tais como rotação da broca, peso sobre a broca, fluido de perfuração adequado e tipo de rocha, são fundamentais para evitar o desgaste prematuro. Neste trabalho são apresentados os principais mecanismos e tipos de desgastes presentes nas principais brocas de perfuração e as possíveis soluções que estão sendo usadas atualmente na tentativa de minimizá-los. Trata-se de uma tentativa de mapeamento dos problemas e soluções tribológicas apresentados pelos principais tipos de brocas de perfuração existentes.

**Palavras-chave:** Brocas de perfuração. Desgaste. Mapeamento tribológico.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL E NO MUNDO.....	13
2.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS USADOS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS.....	13
2.2.1 Sistema de sustentação de cargas.....	14
2.2.1 Sistema de geração e transmissão de energia .....	15
2.2.3 Sistema de movimentação de cargas .....	15
2.2.4 Sistema de rotação .....	15
2.2.5 Sistema de circulação.....	16
2.2.6 Sistema de segurança do poço.....	18
2.2.7 Sistema de monitoração.....	18
2.2.8 Sistema de colunas de perfuração .....	18
<b>2.2 PRINCIPAIS TIPOS DE BROCAS .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Brocas com partes móveis.....	21
2.2.2 Fatores que influenciam no projeto de brocas cônicas .....	25
2.2.2.1 Mecanismo de Corte.....	25
2.2.2.2 Sistema de Rotação.....	29
2.2.2.3 Corpo da Broca.....	30
2.2.3 Código IADC.....	30
2.2.4 Brocas sem partes móveis.....	32
2.2.5 Brocas de lâminas de aço.....	32
2.2.6 Brocas de diamantes naturais .....	33
2.2.7 Brocas de PDC ( <i>Polycrystalline Diamond Compact</i> ).....	34
2.2.7.1 Brocas impregnadas.....	38
2.2.7.2 Brocas de diamante termicamente estável (Pastilhas TSP) .....	39
<b>2.4 DESGASTE DAS BROCAS .....</b>	<b>41</b>
2.4.1 Fatores que interferem no desgaste de brocas .....	42

2.4.1.1 Mecanismo de desgaste de brocas PDC .....	42
2.4.2 Formação geológica.....	48
2.4.2.1 Resistência específica da rocha .....	48
2.4.2.2 Peso Sobre a Broca – WOB.....	48
2.4.2.3 RPM – Rotação da broca.....	48
2.4.3 Extração da lama.....	49
2.4.4 Influência da escala de dureza Mohs.....	49
2.5. Estudo de caso.....	50
<b>3 CONCLUSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas da sonda de perfuração (HOWSTULFWORKS, 2001).....	14
Figura 2 – Kelly. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.yaoumachinery.es/1-oil-drilling/5-1b.jpg">http://www.yaoumachinery.es/1-oil-drilling/5-1b.jpg</a> > Acesso em 17 de mar. De 2013.....	15
Figura 3 - <i>Swivel</i> . Fonte: Disponível em: < <a href="http://www.rtpumpparts.com/UploadFiles/20124615123164.jpg">http://www.rtpumpparts.com/UploadFiles/20124615123164.jpg</a> > Acesso em 17 de mar. de 2013.....	16
Figura 4 - Ilustração do funcionamento do sistema hidráulico das brocas. (Fonte: PLACIDO, 2009).....	17
Figura 5 - Histórico de evolução das brocas. (Fonte: PLACIDO, 2009) .....	21
Figura 6 – Principais tipos de brocas rotativas (Fonte: Smith Bit, 2011).....	22
Figura 7 - Broca de inserto desgastada sem calibre.Fonte: Disponível em < <a href="http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&amp;firstFileToShow=100">http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&amp;firstFileToShow=100</a> > Acesso em 19 de mar. 2013. ....	24
Figura 8 - Broca desgastada, porém estando calibrada. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&amp;firstFileToShow=100">http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&amp;firstFileToShow=100</a> > Acesso em 19 de mar. de 2013. ....	24
Figura 9 - Problemas na distribuição de forças aplicadas sobre os cones (Weight of Bits) (Fonte: Halliburton, 2009) .....	25
Figura 10 - Offset das Brocas Tricônicas (Imagem adaptada: BOURGOYNE et al, 1991). ..	26
Figura 11 – Geometria de uma broca conica para formações moles (ADAPTADA: PLÁCIDO, 2007). ....	27
Figura 12 - Comparação referente taxa de perfuração de uma broca tricônica com ângulo <i>offset</i> . (a) Folhelho (brando e dúctil) (b) Dolomito (frágil e duro) ( WINTERS, 1987). ....	28
Figura 13 - Comparação referente taxa de perfuração de uma broca tricônica com ângulo <i>offset</i> tendendo a zero (WINTERS, 1987).....	29
Figura 14 - Brocas de Lamina de Aço (Fonte: <a href="http://www.geocities.ws">www.geocities.ws</a> ) .....	33
Figura 15 - Broca de perfuração rotativa sem partes móveis (broca de diamante natural) Fonte: Bourgoyne et. Al. (1991). ....	34
Figura 16 - Broca PDC Corpo de Aço.....	35
Figura 17 - Mecanismo de arranque de material por uma partilha de PDC (Fonte: PLÁCIDO, 2009).....	36
Figura 18 - Esquema dos cortadores usado em brocas PDC (Imagem adaptada: BAKER HUGHES, 2008) .....	37

Figura 19 - Técnica para alívio de tensões em pastilhas de PDC (Fonte: BAKER HUGHES, 2008). .....	38
Figura 20 - Broca impregnada (Fonte: BAKER HUGHES, 2008).....	38
Figura 21 - Gráfico para visualizar parâmetros de uso de brocas impregnadas (Fonte:Schlumberger,2004) .....	39
Figura 22 - Desgaste abrasivo. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste">http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste</a> >. Acesso em 19 mar. 2013 .....	44
Figura 23 - Micrografias da superfície dos sólidos que sofreram desgaste abrasivo (a) microsulcamento, (b) microcorte (c) microlascamento - Fonte (GAHR,1987).....	45
Figura 24 - Desgaste erosivo. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste">http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste</a> >. Acesso em 19 mar. 2013 .....	46
Figura 25 - Desgaste adesivo. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste">http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste</a> >. Acesso em 19 mar. 2013 .....	47
Figura 26 - Fretting. Fonte: Disponível em < <a href="http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste">http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste</a> >. Acesso em 19 mar. 2013 .....	47
Figura 27 - Escala da dureza Mohs (Imagem: Britannica Online Encyclopedia) .....	50
Figura 28 - Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 30rpm. (a) 10kgf e (b) 15kgf. (MATOS et. al., 2009).....	52
Figura 29 - Desgaste das Pastilhas PDC (em gramas) versus ângulo de corte para: a) 20rpm, b) 30rpm e c) 40rpm. As barras em preto indicam os desvios padrões dos resultados para a média de sete valores. (MATOS et. al., 2009) .....	53



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais mecanismos de desgaste.....	41
--------------------------------------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

Registros antigos mostram que vários povos conheceram o petróleo através do afloramento natural do hidrocarboneto até a superfície, em virtude de altas temperaturas, pressões e formações geológicas (THOMAS, 2001).

Atualmente, para extrair o petróleo com fins comerciais é necessário perfurar um poço que atinja o reservatório e o faça elevar até a superfície. A perfuração pode ser feita tanto em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*). A tecnologia que envolve a perfuração de poços deu um salto na última década, permitindo o alcance de profundidades nunca antes atingidas, acima de 6.000 m de profundidade (THOMAS, 2001).

A perfuração de poços consiste no conjunto de operações necessárias para atravessar as formações geológicas que formam a porção superficial da crosta terrestre até atingir o objetivo principal, que é a prospecção do hidrocarboneto. Nas atividades de perfuração, utilizam-se sondas que consistem em um conjunto de equipamentos bastante complexos, existindo grande variedade de tipos. Tais sondas podem ser terrestres ou marítimas, conforme o local de operação. Uma característica que chama a atenção nas sondas de perfuração é a presença de uma torre (torre de perfuração ou *derrick*), cuja função é permitir que o manuseio dos tubos de perfuração seja realizado em seções de três, o que dá maior agilidade na operação.

Os poços podem ser classificados quanto as suas trajetórias. Como verticais, direcionais, horizontais e multilaterais. A escolha do percurso depende de critérios técnicos específicos, sendo que sempre ocorrerão desvios e variações, normalmente relacionados à variedade da velocidade de perfuração. Se perfurado rapidamente, o poço tende a ficar desalinhado, o que dificulta as operações posteriores que serão realizadas em seu interior.

Um poço pode ter as seguintes finalidades: Estratigráfico, para obter informações sobre a bacia. É utilizado na fase de produção: Pioneiro, para verificar uma estrutura mapeada, de extensão ou delimitação e determinar os limites de um campo de produção; De injeção, para injetar água no reservatório ou gás, ou outros fins menos comuns, como apagar incêndio em um poço em erupção.

Os custos com a perfuração são relativamente elevados, sobretudo em poços *offshore*. Fatores desfavoráveis como o tipo de terreno e localização do poço (florestas, rios, mares, grandes profundidades etc.), formação geológica, ocorrência de gás sulfídrico, fluido de perfuração e equipamentos inadequados, entre outros, contribuem para onerar o custo das operações de perfuração.

Mesmo com a contribuição dos recursos tecnológicos oriundos de métodos sísmicos e geológicos, somente com a perfuração de um poço é que se comprovará ou não as evidências apontadas nas análises geofísicas. (CARDOSO, 2005).

Vários equipamentos são necessários para efetuar a perfuração de um poço de petróleo tais como, motores a diesel, bombas de lama, catarinas, torre, mangueiras e equipamentos mais específicos, como mesa giratória, *Kelly*, *Swivel*, *Rop driver*, brocas, peças para evitar vazamentos, manômetros, tubulações, cimento e muitos outros elementos.

Para que o poço comece a ser perfurado, a torre que sustentará a broca junto aos outros componentes tem uma base chamada mesa giratória, que é responsável pelo engate e direcionamento dos tubos que serão colocados à medida que a perfuração ganha profundidade.

As brocas de perfuração mais utilizadas hoje são feitas de diamantes sintéticos, material escolhido devido a sua elevada dureza, capaz de resistir muito bem às solicitações mecânicas e térmicas exigidas no contato broca-rocha. Ao longo da história da indústria petrolífera foram utilizados vários modelos de brocas divididos basicamente em dois grupos: brocas com partes móveis e brocas sem partes móveis. As brocas sem partes móveis são as mais utilizadas por resistirem mais aos impactos e desgastes, apresentando maior vida útil comparada as que tem partes móveis. Já as que têm partes móveis, são utilizadas hoje para perfurações menos complexas, que não exijam grandes esforços mecânicos e tribológicos.

As brocas de PDC, surgiram da necessidade de cortar cada vez mais com maior eficiência. O custo inicial de uma broca de PDC era elevado devido a sua baixa demanda e na época as perfurações não eram tão complexas como as de hoje, em que as brocas tricônicas (com partes móveis) resolviam todos os problemas. A medida em que o tempo foi passando, a busca de petróleo em outras áreas foi aumentando, e com isso a necessidade de se produzir brocas que

atendessem todas as demandas emergentes. A broca de *polycrystalline diamond compact* (PDC) é composta por pastilhas diamantadas inseridas ou empregnadas em um cabeçote de metal duro.

Este trabalho apresenta uma breve revisão dos principais problemas e soluções tribológicas apresentados pelos principais tipos de brocas de perfuração usadas atualmente na indústria de perfuração de poços.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO BRASIL E NO MUNDO**

O primeiro poço de petróleo nas Américas foi perfurado na Pensilvânia, em 1859 por Edwin Laurentine Drake, conhecido também como “coronel Drake”. Seu primeiro poço não necessitou de mais do que 30 metros para atingir o reservatório subterrâneo, chegando a produzir moderados 19 barris por dia, o que tornou o projeto insustentável, visto que nesta época o petróleo era um produto muito barato.

Após 1859, muito esforço foi feito para que novos poços fossem abertos, visando projetos mais sustentáveis do ponto de vista econômico.

As técnicas de perfuração de poços evoluíram muito, principalmente no que se refere a segurança e ao controle de variáveis como pressão e profundidade. Atualmente a Petróleo Brasil S/A (PETROBRAS) detém a melhor tecnologia de perfuração em águas profundas e em solos, chegando recentemente à camada do pré-sal.

### **2.2 PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS USADOS NA PERFURAÇÃO DE POÇOS PETROLÍFEROS**

A perfuração de um poço de petróleo é realizada através de uma sonda. As rochas são perfuradas pela ação rotativa de uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração. Os fragmentos de rocha são removidos pela ação de um fluido de perfuração injetado por bombeamento na coluna de perfuração. Ao atingir determinada profundidade a coluna de perfuração é retirada e é colocada uma coluna de revestimento em aço de diâmetro inferior ao da broca e ainda é executada a cimentação entre os anulares (uniões) dos tubos de revestimento garantindo a segurança. Em sequencia, a coluna de perfuração, é novamente introduzida no poço com uma nova broca de diâmetro menor, assim sucessivamente até o final da perfuração.

Para que seja possível executar todas essas etapas são necessários vários equipamentos específicos, projetados exclusivamente para o uso na indústria

petrolífera. Todos os equipamentos de uma sonda são agrupados nos chamados sistemas de sonda (Figura 1), os quais são detalhados a seguir.

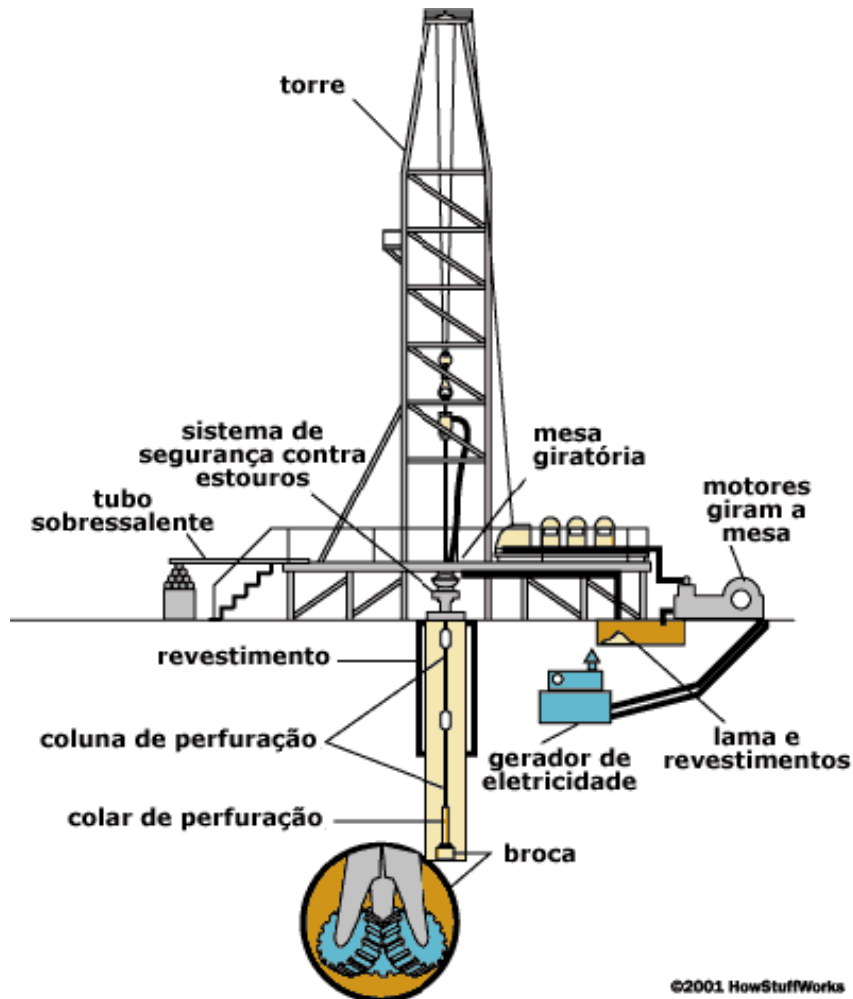


Figura 1 - Sistemas da sonda de perfuração (HOWSTULFWORKS, 2001).

### 2.2.1 Sistema de sustentação de cargas

É constituído por um mastro ou torre, da subestrutura e da base ou fundação. A carga corresponde ao peso da coluna de perfuração ou revestimento que está no poço. Sua função é a de sustentar e distribuir o peso igualmente até a fundação ou base da estrutura.

### 2.2.1 Sistema de geração e transmissão de energia

A energia necessária para o acionamento dos equipamentos de uma sonda é normalmente fornecido por motores a diesel. Em sondas marítimas é comum a utilização de turbinas a gás por questões econômicas. Quando disponível, a rede pública de energia pode ser vantajosa em virtude de um tempo maior de permanência da sonda.

### 2.2.3 Sistema de movimentação de cargas

O sistema de movimentação de carga permite movimentar as colunas de perfuração e de revestimento, além de outros equipamentos. É constituído por um guincho, bloco de coroamento, catarina, cabo de perfuração, gancho e elevador.

### 2.2.4 Sistema de rotação

O sistema de rotação convencional é constituído de equipamentos que promovem ou permitem a livre rotação da coluna de perfuração. São eles: mesa rotativa, *kelly* (Figura 2) e cabeça de circulação ou *swivel* (Figura 3).

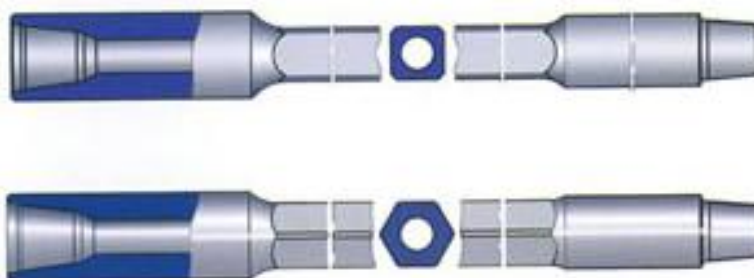


Figura 2 – Kelly. Fonte: Disponível em <<http://www.yaoumachinery.es/1-oil-drilling/5-1b.jpg>> Acesso em 17 de mar. De 2013



Figura 3 - *Swivel*. Fonte: Disponível em:

<<http://www.rtpumpparts.com/UploadFiles/20124615123164.jpg>> Acesso em 17 de mar. de 2013

Nas sondas convencionais, a coluna de perfuração é girada pela mesa rotativa localizada na plataforma da sonda. A rotação é transmitida a um tubo de parede externa poligonal, o *kelly*, que fica enroscado no topo da coluna de perfuração. Nas sondas equipadas com *top drive* a rotação é transmitida diretamente ao topo da coluna de perfuração por um motor acoplado à catarina.

### **2.2.5 Sistema de circulação**

Permite a circulação e o tratamento do fluido de perfuração. O fluido é bombeado através da coluna de perfuração até a broca, ao retornar à superfície, trás consigo os cascalhos cortados pela broca. Na Figura 4, pode-se ver uma ilustração da ação dos jatos na limpeza dos cones e do fundo do poço para uma broca tricônica.



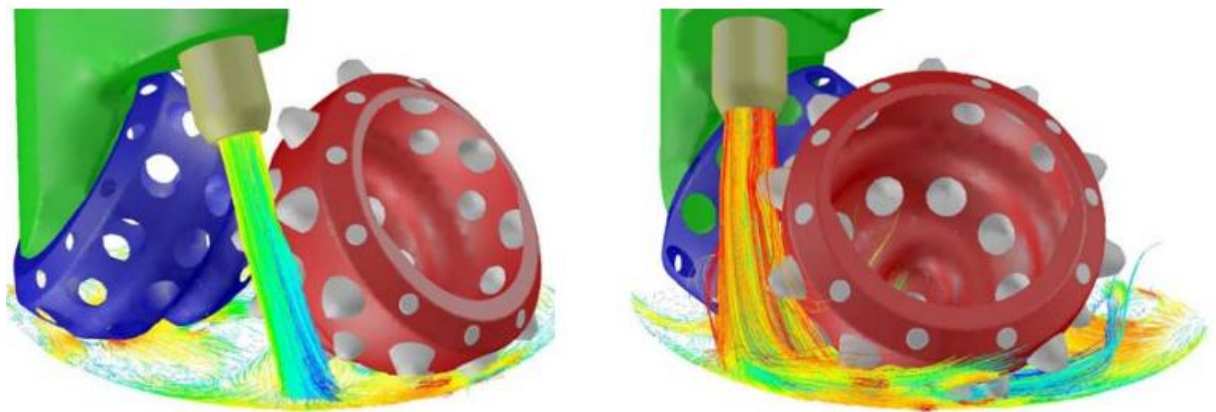


Figura 4 - Ilustração do funcionamento do sistema hidráulico das brocas. (Fonte: PLACIDO, 2009)

Os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, produtos químicos e por vezes até gases. Podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Têm como função limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados e transportá-los até a superfície, exercer pressão hidrostática sobre as formações, resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca.

Devem apresentar as seguintes características:

- ser estável quimicamente;
- estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente;
- facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- manter os sólidos em suspensão quando estiverem em repouso;
- serem inertes a danos em relação as rochas produtoras;
- aceitarem quaisquer tratamentos físicos ou químicos;
- serem bambeáveis;
- apresentarem baixo grau de corrosão e de abrasão em relação a coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- facilitarem as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- apresentarem custo compatível com a perfuração.

### **2.2.6 Sistema de segurança do poço**

É constituído dos equipamentos de segurança do cabeça de poço e equipamentos complementares que possibilitam o fechamento e controle do poço. O mais importante é o *blowout preventer*, mais conhecido como BOP, que é o principal elemento de ligação entre a cabeça do poço no fundo do mar e a sonda. Seu conjunto de válvulas permite o fechamento do poço evitando danos maiores.

### **2.2.7 Sistema de monitoração**

São os equipamentos de instrumentação necessários ao controle da perfuração como manômetros, células de carga e equipamentos de registro.

### **2.2.8 Sistema de colunas de perfuração**

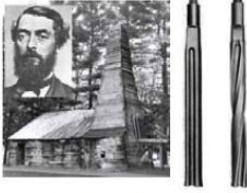
Durante a perfuração é necessária a concentração de grande quantidade de energia na broca para cortar as diversas formações rochosas. Essa energia, em forma de rotação e peso aplicados sobre a broca, é transferida às rochas para promover sua ruptura e desagregação em pequenas lascas. É formada dos seguintes componentes: tubos pesados, comandos e tubos de perfuração.

## 2.2 PRINCIPAIS TIPOS DE BROCAS

A brocas de perfuração é o elemento que têm a função de promover a ruptura e a desagregação das rochas ou formações. O estudo das brocas, considerando seu desempenho e economicidade, é um dos fatores importantes na perfuração de poços de petróleo (THOMAS, 2001).

A broca é a principal ferramenta responsável por realizar as perfurações dos poços de petróleo. Está localizada na extremidade inferior da coluna do poço, em contato direto com as rochas e são fabricadas de acordo com a formação geológica do local a ser perfurado. Dependendo do tipo de broca, em um processo de perfuração rotativa sua função é cortar ou triturar as rochas. A Figura 5 apresenta um resumo da elaboração cronológica dos principais tipos de brocas.

**1859**



E.L. Drake e a sonda usada para perfurar o poço em Titusville. Detalhe de brocas de percussão

**1863**



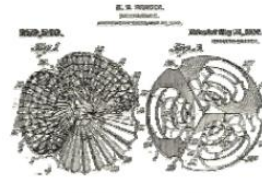
Broca de arrastre tipo Rabo de Peixe

**1909**



Broca de dois cones patentada por Howard Hugues em 1909

**1910**



Em 1910 Hughes patenteou a primeira broca tricônica

**1925**



Broca com dentes entrelaçados ou "engrenados" para autolimpeza

**1930**



Primeira broca mono-cônica

**1933**



Broca de tres cones com dentes tipo engranagem

**1940**



Uso de brocas de diamante natural em poços de petróleo

**1951**



Se introduzem os inserts de carboneto de tungsteno como elementos de corte

**1953**



Os primeiros cristais de diamante sintético obtidos pelo "Diamond Team" da GE

**1976**



Compactos de diamante sintético em suas diversas apresentações. Os primeiros cortadores PDC eram hastes insertadasno corpo da broca

**1978**



Primeiras brocas PDC. Hastes insertadas no corpo de aço das brocas com arranjo simples em espiral

**1994**



A interfase não-plana da superfície entre os materials ajuda a aliviar as tensões internas nos cortadores

**1994 – Presente...**



A espessura da capa de diamante pode ser incrementada para dar mais durabilidade ao cortador PDC. Primeiro plano: cortador TECMAX



Insertos para brocas de cones com capa de diamante para melhorar a resistencia a abrasividade



Broca PDC moderna para aplicações com Sistema Rotatorio Direcional. Inclui cortadores ativos no calibre



Selos gêmeos (Gemini) foram lançados visando incrementar a vida dos rolamentos das brocas de cones

### A EVOLUÇÃO CONTINUA...



Figura 5 - Histórico de evolução das brocas. (Fonte: PLACIDO, 2009)

Uma das necessidades fundamentais na realização da perfuração é conhecer o máximo possível, sobre a geologia do local. É baseado na análise dos parâmetros geológicos (tipo de rocha, terreno, clima, possibilidades de abalos sísmicos, preservação ambiental, etc.) que se pode escolher as melhores formas de atacar as rochas para superar suas resistências. As formas de ataques são: acunhamento, cisalhamento, esmerilhamento, esmagamento e até mesmo a utilização de jatos de fluidos de perfuração (THOMAS, 2001).

Outros dois parâmetros geológicos importantes para saber o tipo de broca a ser utilizado na perfuração é a dureza e abrasividade da rocha.

Na indústria petrolífera as brocas de perfuração são classificadas em dois tipos:

- Brocas com partes móveis
- Brocas sem partes móveis

#### 2.2.1 Brocas com partes móveis

Em 10 de agosto de 1909, Howard Hughes patenteou a primeira broca cônica. Esta broca permitiu que a perfuração rotativa competisse com o método de percussão em formações mais duras. Aos poucos a perfuração rotativa foi substituindo o método de percussão em várias aplicações. Ultimamente a perfuração para percussão vem sendo praticada na perfuração de poços de água, de superfície e raramente em aplicações especiais em poços de petróleo.

A Figura 6 mostra alguns tipos de brocas rotativas com partes moveis.



Figura 6 – Principais tipos de brocas rotativas (Fonte: Smith Bit, 2011)

Praticamente todas as brocas com partes móveis têm o mesmo mecanismo de corte. Elas são formadas por cones (Figura 6) que realizam movimentos circulares. É importante notar que essas brocas possuem uma sincronia que permite todos os cones girarem sem que os seus dentes se interceptem em nenhum ponto. As principais vantagens desses movimentos circulares são a penetração direta na rocha e a trituração desta, que posteriormente são levadas para parte superior da coluna até que sejam expelidas.

A forma construtiva dos dentes das brocas e os materiais pelos quais estes são fabricados são fatores de relevância na elaboração de um projeto de brocas cônicas e devido à necessidade da indústria petrolífera, muito se tem evoluído nesse sentido. Ao longo dos anos variou desde cortadores formados por dentes fresados no corpo dos cones (1909); dentes de aço recobertos com metal duro (liga de carboneto de tungstênio, 1928); ao desenvolvimento de insertos de carboneto de tungstênio para formações geológicas mais duras (1951). Hoje, os locais de perfuração apresentam maiores dificuldade para extração do petróleo, comparados com os casos anteriores, dessa necessidade surgem às brocas PDC que tem como estrutura principal os bits de diamante compactado.

As brocas cônicas rotativas têm sido cada vez menos utilizadas em perfurações petrolíferas, devido ao aumento de complexidade na perfuração dos poços que, cada vez mais, exige maior desempenho das brocas. No caso de perfurações para extração de petróleo realizada no Estado do Rio Grande do Norte, onde não é exigida tanta sofisticação, o uso de brocas cônicas ainda se torna viável. Tanto pelo seu menor custo em relação às brocas sem partes móveis, como pelas condições geológicas que não são as mais complexas.

Um dos principais problemas associados a esse tipo de broca são seus rolamentos. Sua durabilidade é bem menor quando comparada com as brocas sem partes móveis. Os rolamentos de rolos ou esferas das brocas de cones que fixam os cones à matriz da broca responsável pelo movimento tiveram que evoluir de acordo com a necessidade da indústria petrolífera. O rolamento de fricção em brocas para formações duras foi o que mais evoluiu, devido ao excesso de peso exercido sobre broca por esses tipos de formações. Isso acabava limitando a durabilidade dos rolamentos cilíndricos.

Ao longo dos anos foram estudadas todas as possibilidades de otimização dos rolamentos, desde a geometria do selo, materiais com melhor desempenho até lubrificantes. Tudo isso favoreceu para o aumento da vida das brocas.

Outro fator complicado de se controlar, assim como os rolamentos, é a vida útil do calibre das brocas. O seu contato dinâmico com as formações abrasivas das rochas é o principal causador de desgaste. O avanço mais significativo neste campo foi à introdução de insertos de diferentes geometrias, recobertos com diamante sintético. Na Figura 7 observa-se uma broca desgastada e seu calibre fora da geometria circular. Já na Figura 8 é mostrada uma broca desgastada, porém estando calibrada.



Figura 7 - Broca de inserto desgastada sem calibre. Fonte: Disponível em <<http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&firstFileToShow=100>> Acesso em 19 de mar. 2013.



Figura 8 - Broca desgastada, porém estando calibrada. Fonte: Disponível em <<http://www.4shared.com/all-images/wl4AQQIP/Brocas.html?&firstFileToShow=100>> Acesso em 19 de mar. de 2013.

Em termos hidráulicos, os jatos usados nas brocas de cones melhoraram muito a limpeza do fundo do poço e os mecanismos de remoção de material deste. Hoje os projetistas incluem jatos dirigidos, estendidos, centrais e difusores, que contribuem muito para a remoção das rochas trituradas do fundo do poço, além de auxiliar no resfriamento e na lubrificação das brocas.

O uso de modelos matemáticos computacionais, como os métodos dos elementos finitos, têm ajudado os projetistas a entenderem melhor a interação



broca-rocha, e assim melhorar a taxa de penetração, durabilidade e comportamento vibracional.

As brocas de cones possuem cortadores que giram sobre seu próprio eixo. Seu projeto varia de acordo com a estrutura de corte que também depende da formação geológica da rocha.

A má distribuição de força sobre os cones é um grande problema no projeto dessas brocas. Por mais que se tenha uma pequena diferença na distribuição de força como mostra a Figura 9, isso já seria o suficiente para causar um momento no eixo do cone e por sua vez ocasionar um desgaste prematuro ou até mesmo a quebra dos rolamentos.

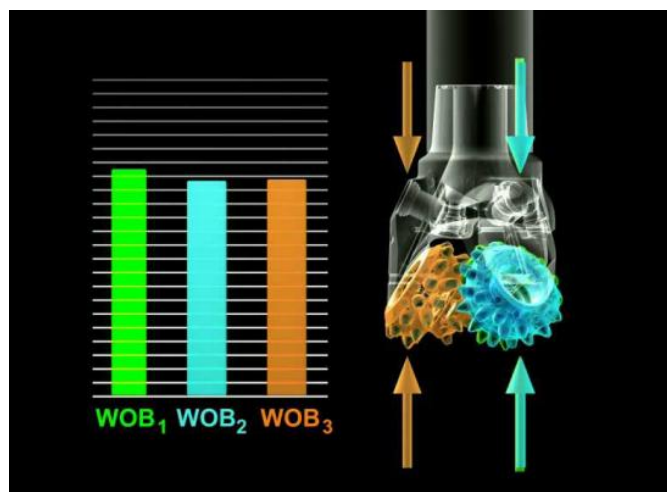


Figura 9 - Problemas na distribuição de forças aplicadas sobre os cones (Weight of Bits) (Fonte: Halliburton, 2009)

## 2.2.2 Fatores que influenciam no projeto de brocas cônicas

Os principais fatores que são levados em consideração em projetos de brocas cônicas são três: mecanismo de corte, sistema de rotação e corpo da broca.

### 2.2.2.1 Mecanismo de Corte

Ao analisar o funcionamento das brocas tricônicas, pode-se considerar que seu funcionamento seja ligeiramente como uma broca sem partes móveis. É necessário que se tenha um *offset* entre os cones, que é a medida da distância entre

o eixo da broca e o eixo dos cones no momento em que um deles se encontra parado. É um pouco difícil de imaginar esse mecanismo. Mas é esse deslocamento entre esses eixos que permite, periodicamente, que cada cone pare de girar, enquanto a broca permanece em rotação, para então arrancar um pedaço da rocha, comportando-se então como uma broca sem partes móveis.

Na Figura 10 seguinte é apresentado um esquema montado para facilitar a visualização do *offset*.

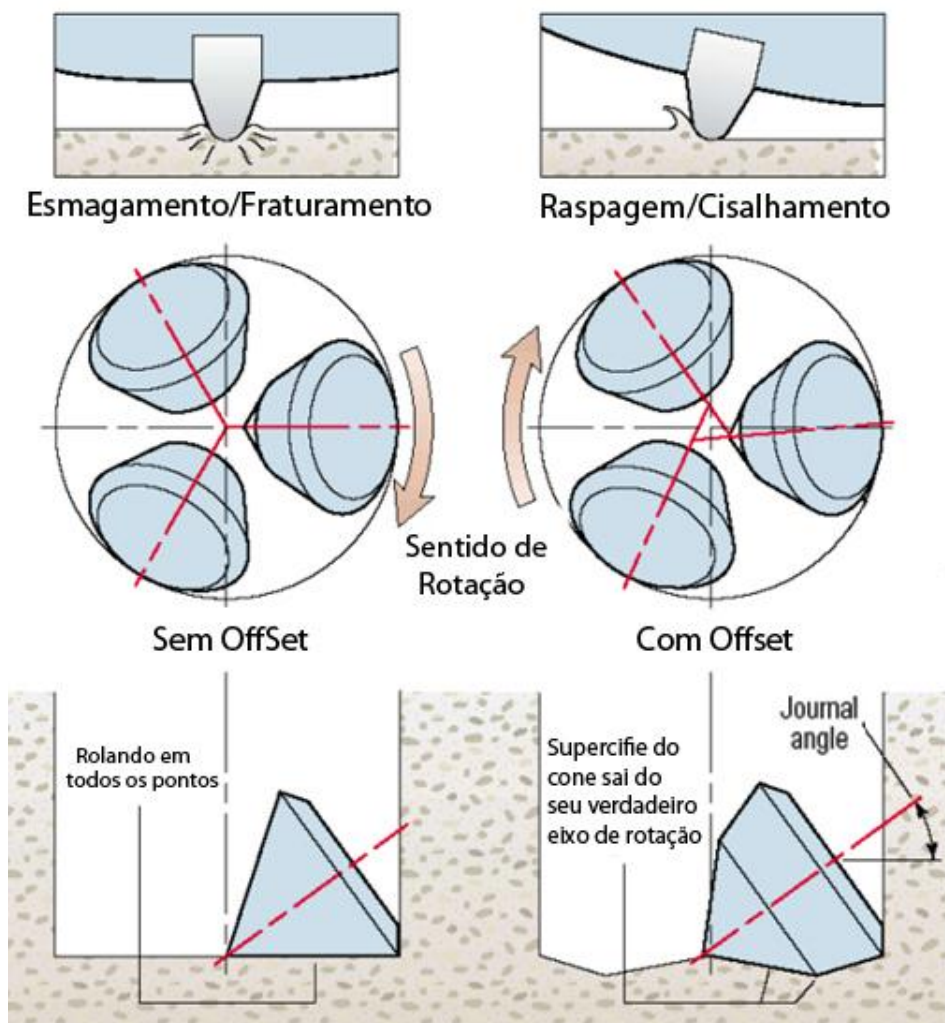


Figura 10 - Offset das Brocas Tricônicas (Imagem adaptada: BOURGOYNE et al, 1991).

Baseado no esquema mostrado na Figura 10 pode-se observar que para formações rochosas, que exigem mais esforços da broca, ou seja, em formações mais moles, pode-se ter um *offset* bem maior, comparado com situações de rochas

mais duras. Nos casos de rochas duras o *offset* é praticamente nulo. Intuitivamente pode-se perceber que um *offset* elevado em rochas duras, ocasionaria grandes exigências mecânicas da broca cônica, uma vez que elas não devem ser usadas nesse tipo de aplicação, pois nessas circunstâncias a operação se torna praticamente um esmerilhamento ao invés de trituração/esmagamento.

A geometria dos cones afeta a forma como os dentes cortam a formação rochosa. Um cone que tenha uma superfície única com seu eixo no centro de rotação da broca, ou seja, sem *offset*, rodará no fundo do poço sem nenhuma ação de deslizamento ou arraste. Os cones das brocas para formação moles possuem dois ou mais ângulos em relação ao eixo horizontal, nenhum dos quais tem seu centro no centro de rotação da broca, com *offset*. Com isso, a superfície exterior do cone tende a rodar em torno de seu eixo teórico e as fileiras interiores, perto do centro, em seu próprio eixo (PLÁCIDO, 2007).

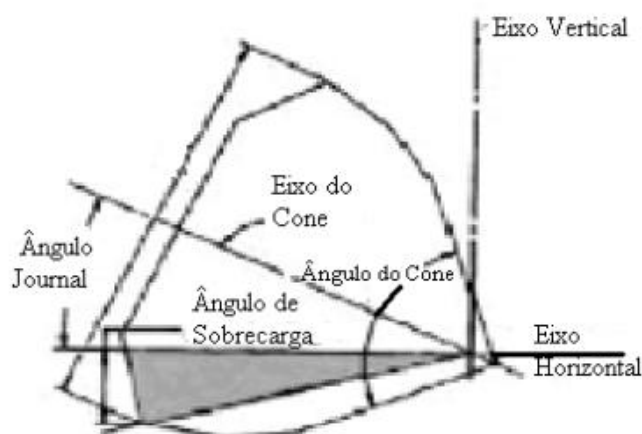


Figura 11 – Geometria de uma broca cônica para formações moles (ADAPTADA: PLÁCIDO, 2007).

Na Figura 11 a taxa de penetração em formações moles é elevada. Possuindo ângulos de ataques maiores e com isso se consegue efetuar perfurações com mais eficiência. O *offset* é calculado entre o eixo de rotação da broca e o plano vertical. Com isso, determina-se o grau de raspagem dos dentes, os quais podem ser de aço ou metal duro.

Em um experimento realizado com uma broca de inserto IADC 427 com diâmetro de 20cm, configurada com um ângulo *offset* elevado, é usada para

comparar a diferença de performance em dois tipos de formações rochosas. Na Figura 12 observa-se o comportamento deste tipo de broca obtendo-se taxas de perfuração mais elevadas no folhelho (dúctil e brando) comparado às do dolomito (frágil e duro).

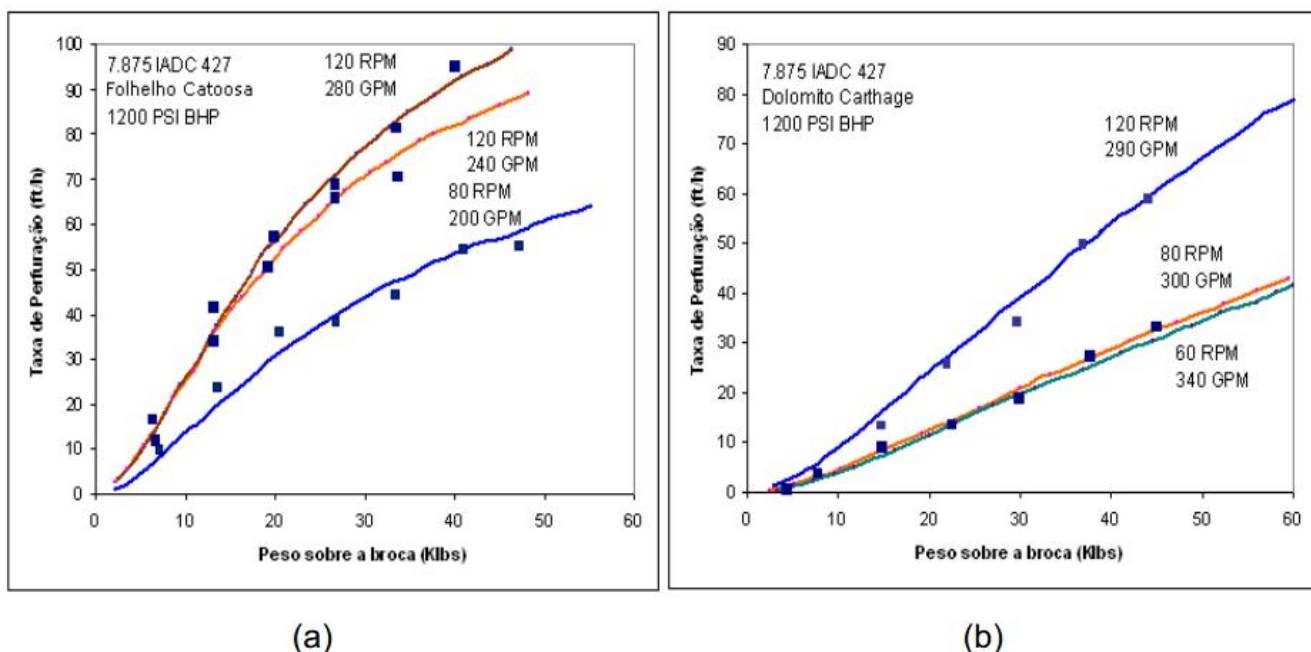


Figura 12 - Comparação referente taxa de perfuração de uma broca tricônica com ângulo *offset*. (a) Folhelho (brando e dúctil) (b) Dolomito (frágil e duro) ( WINTERS, 1987).

Na Figura 13 os testes foram realizados com as mesmas rochas da Figura 12. Neste experimento foi usada uma broca de inserto IADC 737 para formações mais duras e com pequeno ângulo *offset*. O que se pode notar são informações previsíveis para brocas com ângulo *offset* pequenas, perfurando formações duras, ou seja, estas apresentam taxas de perfuração bem mais elevadas. Por mais que o folhelho tenha resistência menor que o dolomito, 55,2Mpa contra 96,5Mpa, a broca perfurou com maior taxa devido às configurações do ângulo *offset*. Portanto, a forma como os insertos de tungstênio interagem com a rocha é um parâmetro muito importante na seleção de brocas.

Outro parâmetro importante de se observar é a rotação e o fluxo de fluido de perfuração. Na Figura 13, os dados mostram que foram mantidas as mesmas vazões de fluido (200 GPM) e elevados apenas às rotações. Com isso a aumento na penetração foi de quase 10 ft/h.

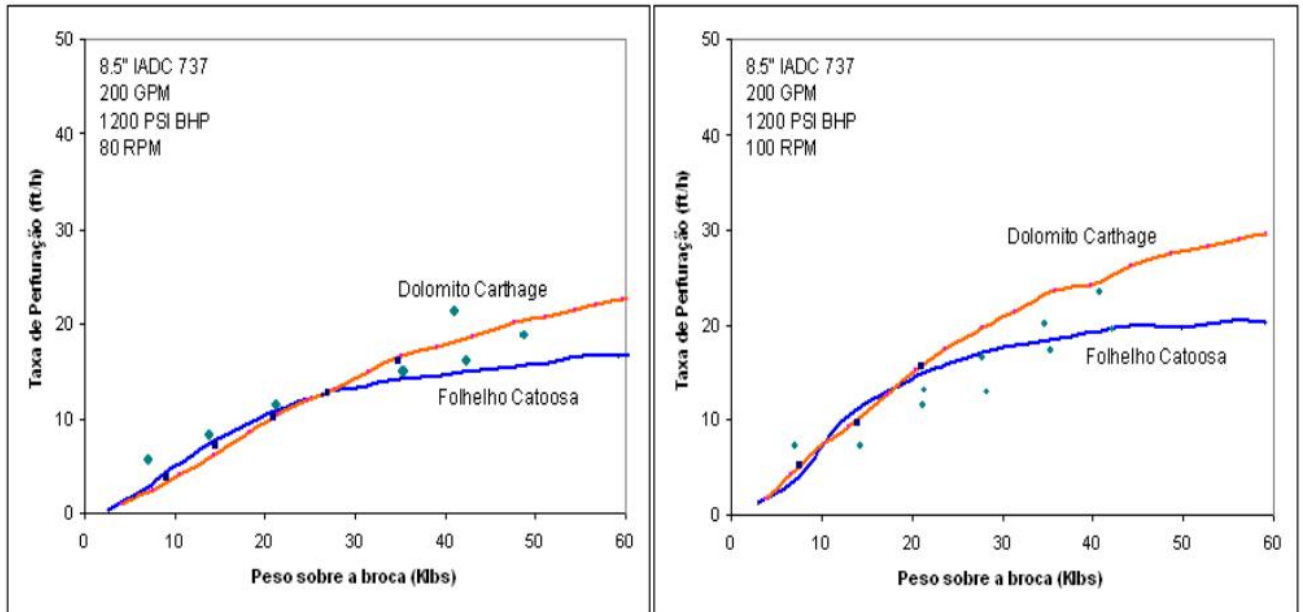


Figura 13 - Comparação referente taxa de perfuração de uma broca tricônica com ângulo offset tendendo a zero (WINTERS, 1987).

#### 2.2.2.2 Sistema de Rotação

As brocas tricônicas possuem três configurações básicas quanto aos seus sistemas de rotação: rolamento convencional com cilindros e esferas, auto-lubrificado com cilindros e esferas e de fricção auto-lubrificáveis. (PLACIDO,2007)

Em brocas mais modernas, como as atualmente existentes, os rolamentos convencionais são empregados apenas na parte superior dos poços, onde o tempo de manobra não é excessivo, como também em aplicações em que a rotação é alta, onde os roletes absorvem a maior parte dos esforços radiais sobre os cortadores.

Devido à necessidade de se ter cones mais resistentes, foram introduzidos insertos de metal duro, levando a um aumento na durabilidade dos cones. Mas, a medida que os insertos suportaram mais esforços, a broca foi submetida a maiores rotações para se obter uma taxa de penetração melhor. Isso fez com que todo o carregamento fosse transmitido para os sistemas de rotação, diminuindo a vida útil dos rolamentos.

### 2.2.2.3 Corpo da Broca

Um dos propósitos do corpo da broca é direcionar o fluido de perfuração para tornar a limpeza mais efetiva no fundo do poço.

As bombas modernas têm potência suficiente para limpar o fundo do poço e também a broca. Em algumas formações moles, os jatos do fluido de perfuração retiram o material por sua própria força hidráulica. A erosão do corpo da broca, provocada pelo fluido a altas velocidades, pode ser reduzida com o emprego de metal duro.

### 2.2.3 Código IADC

O IADC (*International Association of Drilling Contractors*) desenvolveu um sistema padronizado para classificação das brocas tricônicas. Estas são classificadas de acordo com o tipo de dentes (aço ou insertos), a classe de formação para a qual foram projetadas (em termos de série e tipo), as características mecânicas, e em função do fabricante. Para fazer comparações e evitar confusão entre os tipos de brocas equivalentes em relação aos seus diferentes fabricantes, o IADC criou o seguinte código de classificação:

#### **N1 N2 N3 A**

• **N1:** Identifica o tipo e o desenho da estrutura de corte com respeito ao tipo de formação, conforme abaixo:

- 1 - Dentes de aço para formações moles;
- 2 - Dentes de aço para formações médias;
- 3 - Dentes de aço para formações duras;
- 4 - Dentes de metal duro para formações muito moles;
- 5 - Dentes de metal duro para formações moles;
- 6 - Dentes de metal duro para formações médias;
- 7 - Dentes de metal duro para formações duras;

8 - Dentes de metal duro para formações muito duras.

• **N2:** Indica o grau de dureza da formação na qual se usará a broca. Varia de mole à dura, conforme a seguir:

- 1 - Para formações moles;
- 2 - Para formações médias moles;
- 3 - Para formações médias duras;
- 4 - Para formações duras.

• **N3:** Indica o sistema de rolamento e lubrificação da broca em oito classificações, conforme abaixo:

- 1 – Rolamento convencional não selado;
- 2 – Rolamento convencional não selado com refrigeração a ar;
- 3 – Rolamento convencional não selado com proteção de calibre;
- 4 – Rolamento selado auto-lubrificado;
- 5 – Rolamento selado com proteção de calibre;
- 6 – Rolamento de fricção (*journal*) selado;
- 7 – Rolamento de fricção (*journal*) selado com proteção de calibre;
- 8 – Para perfuração direcional;
- 9 – Outros.

• **A:** Os seguintes códigos de letras são utilizados na quarta posição para indicar algum atributo adicional do projeto da broca:

- A – Para perfuração a ar
- B – Rolamento com selo especial
- C – Jato central
- D - Melhor controle direcional
- E – Jato com extensão
- G – Proteção extra no corpo para calibre
- H – Para poço horizontal

- J – Jatos estendidos para poço direcional
- L – Jatos chatos
- M – Para uso de motor de fundo
- R – Corpo com solda reforçadas
- S – Brocas de dentes de aço normal
- T – Brocas de dois cones
- W – Insertos reforçados
- X – Insertos com cinzel
- Y – Inseto tipo cônico
- Z – Outros tipos de inseto

#### **2.2.4 Brocas sem partes móveis**

Plácido e Pinho (2009) consideram que as brocas sem partes móveis são aquelas que têm elementos cortantes fixos aos corpos. Estas têm como características operacionais a utilização da potência hidráulica da sonda de perfuração para obter altas velocidades de escoamento do fluido através da face da broca para resfriar os cortadores e remover os cascalhos do fundo do poço. Esse resfriamento constante evita o desgaste prematuro dos cortadores, possibilitando que a broca esteja sempre em contato com a superfície da rocha durante o processo de perfuração.

Pode-se classificar as brocas sem partes móveis, da seguinte forma:

- Brocas de laminas de aço;
- Brocas de diamantes naturais;
- Brocas de diamantes artificiais (PDC).

#### **2.2.5 Brocas de lâminas de aço**

As brocas de lâminas de aço, conhecidas como brocas Rabo de Peixe (*Fish Tail*) foram as primeiras brocas a serem usadas na perfuração rotativa. Sua característica é a perfuração por cisalhamento. Esse tipo de broca utiliza jatos que lhes permite uma boa limpeza das lâminas. O principal problema destas brocas é que a vida útil de sua estrutura cortante é muito curta, mesmo aplicando material



mais duro nas lâminas. Com o aparecimento das brocas tricônicas, as brocas de lâminas de aço caíram em desuso. A Figura 14 ilustra uma das primeiras brocas de lamina de aço usadas na indústria petrolífera.

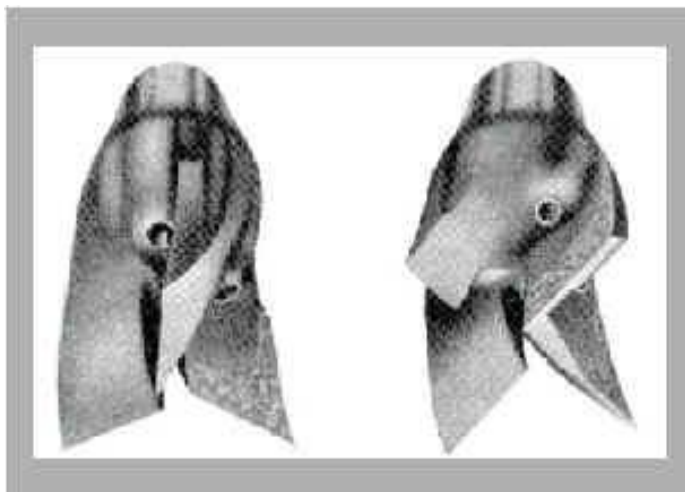


Figura 14 - Brocas de Lamina de Aço (Fonte: [www.geocities.ws](http://www.geocities.ws))

#### **2.2.6 Brocas de diamantes naturais**

O uso de diamante natural para corte de minerais e metais na indústria metal-mecânica e de construção (ferramentas abrasivas de diamante, brocas para tornos, etc.), passando por sua utilização na perfuração de poços de mineração, se estendeu para a indústria de petróleo e gás no fim do século XX. Isso devido ao aumento da demanda mundial de petróleo durante a segunda guerra mundial e a necessidade de perfurar poços mais profundos, onde são encontradas formações geológicas mais duras e abrasivas.

O diamante está “incrustado” na matriz da broca e sobressai em um terço de seu tamanho sobre a superfície. O mecanismo de perfuração desta broca é por raspagem e esmerilhamento do fundo do poço. A pouca profundidade de corte é compensada com altas revoluções aplicadas para se obter taxa de penetração. Este tipo de broca é tipicamente usado com motores de fundo ou turbinas. Uma alta vazão do fluido de perfuração é mantida para resfriar a broca e alcançar altas rotações. Na Figura 15 temos a ilustração de uma broca de diamantes naturais



Figura 15 - Broca de perfuração rotativa sem partes móveis (broca de diamante natural) Fonte: Bourgoyne et. Al. (1991).

O uso deste tipo de broca é limitado, sendo utilizado em casos especiais para perfurar formações geológicas muito duras e para cortar núcleos de formações com coroas de diamante natural, ou na aplicação de brocas desviadoras (*Side Track*) para desviar poços em formações muito duras e abrasivas. Atualmente elas são utilizadas principalmente em operações de testemunhagem, uma vez que existem brocas modernas mais baratas capazes de perfurar formações geológicas mais duras.

### **2.2.7 Brocas de PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*)**

As brocas de PDC utilizam diamante sintético formado por um compacto de diamantes policristalinos compactados. Seus cortadores são na forma de pastilhas, montada nas aletas da broca. O que as diferencia das brocas de diamante natural e TSP (brocas de diamante termicamente estável), que será abordado mais adiante nesse trabalho, é seu sistema hidráulico que apresenta uma lubrificação por meio de jatos, similar às brocas de cones.

O PDC padrão, consiste de uma fina camada de diamante policristalino integralmente sinterizada sobre um substrato de carboneto de tungstênio (WC). O solvente/catalisador usado para ligar os grãos de diamante é o cobalto, o qual

desempenha um importante papel durante a sinterização. Pode ser cortado na forma de qualquer geometria desejada pela técnica de usinagem por eletroerosão a fio, tendo em vista sua característica de condutor elétrico conferido pela porção residual de cobalto (pois o Co apresenta alta condutividade elétrica, da ordem de  $19,05 \times 10^6$  ( $\Omega \cdot m^{-1}$ )). As características que tornam este tipo de broca efetivo nas aplicações de perfuração são:

- 1) Seu gume se mantém afiado à medida que a camada de diamante gradualmente se desgasta, devido à menor resistência à abrasão do suporte de WC;
- 2) O WC fornece um suporte rígido à camada de diamante, naturalmente mais frágil. Desse modo, o produto resultante combina a alta dureza, alta resistência à abrasão e alta condutividade térmica do diamante com a tenacidade do WC. Esta alta tenacidade do substrato confere à ferramenta resistência mecânica e resistência ao choque mais elevadas (CLARK, 1987).

As brocas PDC usam o cisalhamento como mecanismo principal para efetuar o seu corte. Pelo seu desenho, seus cortadores em forma de pastilha e por seus bons resultados na perfuração rotativa, este tipo de broca tem sido muito usado na perfuração de poços de petróleo. Também apresenta muitas vantagens econômicas por sua versatilidade.

A forma como são inseridos seus cortadores influencia diretamente em seu desempenho. Na Figura 16 a seguir se ver uma broca PDC de corpo de aço.



Figura 16 - Broca PDC Corpo de Aço

Observa-se a Figura 17, que exemplifica o mecanismo de cisalhamento, pode-se fazer uma analogia ao processo de usinagem, onde a pastilha de PDC é semelhante à ferramenta de corte, que no caso irá cisalhar a rocha.

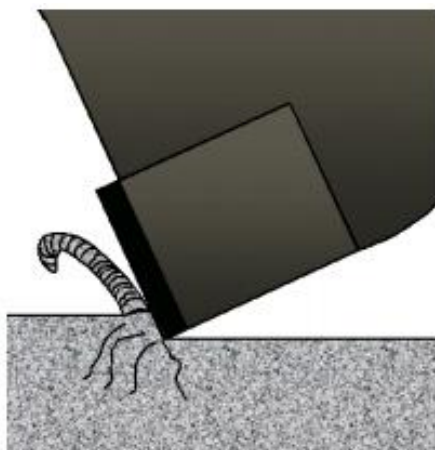


Figura 17 - Mecanismo de arranque de material por uma pastilha de PDC (Fonte: PLÁCIDO, 2009)

O cortador de diamante policristalino sinterizado (PDC) é unido ao seu substrato através de uma técnica de soldagem chamada de brasagem. Esta é geralmente realizada por meio de aquecimento por maçarico ou por indução magnética, usando-se um metal de adição feito de liga de prata fundido em torno de 680°C (CLARK, 1987).

Após este processo de fixação da pastilha ao substrato, a pastilha de PDC é afiada por retificação, a fim de fortalecer sua resistência ao lascamento. No estágio final, a amostra é polida com micropó de diamante para prover à peça trabalhada um melhor acabamento superficial (D'EVELYN, 2001).

O conjunto pastilha PCD mais substrato WC apresentado na Figura 18 é unido ao corpo da broca por sinterização.

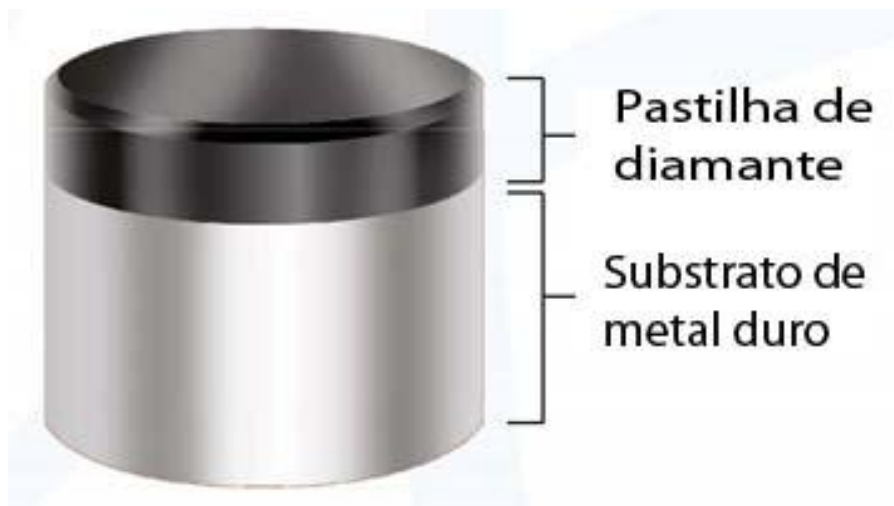


Figura 18 - Esquema dos cortadores usado em brocas PDC (Imagem adaptada: BAKER HUGHES, 2008)

De acordo com Chiaverini (1986) a sinterização é realizada sempre abaixo do ponto de fusão do metal-base da mistura, comprimindo as peças aquecidas a temperaturas específicas, eventualmente acima do ponto de fusão do metal secundário da mistura, controlando a velocidade de aquecimento, temperatura, velocidade de resfriamento e atmosfera do ambiente de aquecimento.

Suas propriedades mecânicas podem ser degradadas em consequência de alterações estruturais devido ao aquecimento excessivo provocado durante a manufatura da broca e a perfuração. Estes efeitos dependem tanto da temperatura quanto do tempo de manutenção na temperatura especificada (CLARK, 1987).

Algumas melhorias podem ser aplicadas nessas pastilhas. Uma delas é como a camada de PDC é unida ao corpo da pastilha de carboneto de tungstênio. Por meio de estudos realizados pela empresa americana Baker Hughes, percebeu-se que ao mudar a geometria da superfície de carboneto de tungstênio, que irá receber o PDC, se obteria um grande alívio de tensões. Essa geometria é basicamente dimensionada para que dificulte o deslizamento entre ambas às superfícies. Essa técnica pode ser vista nas Figuras 19a e 19b a seguir.



Figura 19 - Técnica para alívio de tensões em pastilhas de PDC (Fonte: BAKER HUGHES, 2008).

#### 2.2.7.1 Brocas impregnadas

Pode-se considerar que as brocas impregnadas são uma otimização das brocas de diamantes. Seus elementos cortantes, assim como nas brocas de PDC, são inseridos em uma matriz de carboneto de tungstênio. O campo de uso é igual ao das brocas de diamantes, em rochas duras e de alta abrasividade. Porém, sua utilização é específica em situações onde se exige mais esforços mecânico e térmico. A Figura 20 ilustra uma broca impregnada.



Figura 20 - Broca impregnada (Fonte: BAKER HUGHES, 2008)

Em virtude de seu custo ser elevado em relação às do tipo PDC, seu uso é restrito a situações especiais. Tendo em vista a relação custo/benefício e levando-se em consideração situações gerais de perfuração, é mais viável se utilizar a broca do tipo diamante policristalino compactado. A Figura 21 mostra como está distribuído às aplicações das brocas impregnadas em relação as cônicas e PDC.

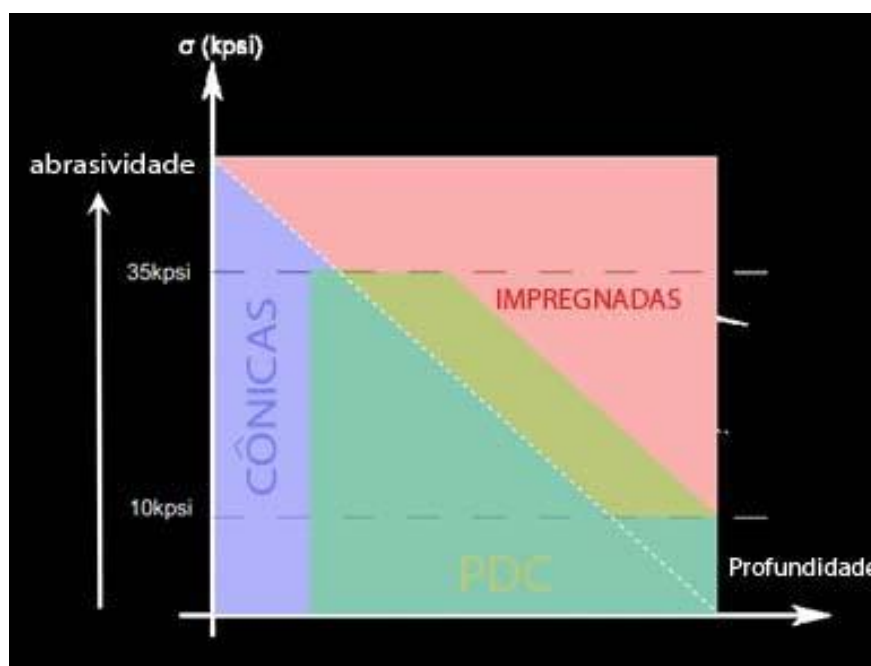


Figura 21 - Gráfico para visualizar parâmetros de uso de brocas impregnadas  
(Fonte: Schlumberger, 2004)

#### 2.2.7.2 Brocas de diamante termicamente estável (Pastilhas TSP)

Apesar do sucesso alcançado com o PDC padrão, ainda existem limitações para um uso mais disseminado dele na indústria de perfuração. Uma delas é a incapacidade das pastilhas resistirem ao carregamento de alto impacto na perfuração de rochas duras (CLARK, 1987).

Além disso, a fricção extremamente alta oferecida pela rocha dura, produz altas temperaturas e a taxa de desgaste da pastilha aumenta significativamente, especialmente acima de 300°C. Devido a estes fatores, a pastilha PCD perde toda sua integridade estrutural acima de 700°C (DEPARTAMENT OF ENERGY, 2001).

Assim, a instabilidade térmica do PDC padrão após exposição à altas temperaturas restringe seu uso às formações relativamente macias. Até certo ponto,

a primeira limitação pode ser superada através do uso de pastilhas menores, porém isto aumenta a complexidade de fabricação da broca, especialmente quando há restrições sobre a temperatura de brasagem que pode ser usada (CLARK, 1987).

Há duas razões pelas quais os produtos padrões à base de cobalto se degradam ao serem aquecidos até altas temperaturas (CLARK, 1987):

- 1) A presença de cobalto na camada do PDC sob altas temperaturas catalisa a retro-conversão do diamante para grafite, ou seja, acelera o processo de grafitização do diamante;

- 2) Há uma grande diferença entre os coeficientes de expansão térmica do diamante e do cobalto, o que provoca o surgimento de altas tensões internas sob temperatura elevada. Estas tensões internas podem ocasionar a nucleação e propagação de trinca através do material compósito diamantado, podendo levar à ruptura e inutilização do material processado

Como alternativa, o PDC pode ser sinterizado com materiais que não catalisam a retro-conversão para grafite, como o carboneto de silício (SiC), que é o ligante do diamante tipo TSP. Entretanto, no TSP, ocorre muito pouca ligação diamante-diamante e a resistência à abrasão normalmente é consideravelmente inferior à do PDC sinterizado com o Co. Com isso estabilidade térmica é bastante aumentada e ao mesmo tempo a alta resistência à abrasão é retida, embora à custa de se introduzir alguma porosidade (D'EVELYN, 2001).

A De Beers foi a primeira empresa a desenvolver este material diamantado de alta estabilidade térmica, o qual pode ser usado tanto em rochas duras quanto em rochas moles e ainda permitir o uso da tecnologia padrão de sinterização com auxílio de metal durante a manufatura da broca. A introdução do metal no policristal trouxe as seguintes vantagens (CLARK, 1987):

- 1) Catalisa a reação de união entre as partículas de diamante e subsequente densificação do compósito, diminuindo os parâmetros de sinterização (pressão, temperatura e tempo);

- 2) É responsável por uma quantidade significativa da coerência do material obtido.

O problema da estabilidade térmica foi superado através da utilização de uma fase ligante inerte cujo coeficiente de expansão térmica tem um valor próximo



ao do diamante. Além disso, o material não é ligado a um suporte de carboneto de tungstênio, a exemplo do PDC padrão, e sim a um suporte de carboneto de silício. Ele é fabricado através das mesmas técnicas de alta pressão e alta temperatura associadas com a síntese de diamante e outros produtos à base de diamante, porém, ao invés de cobalto, ele contém silício como metal-ligante das partículas de diamante de tamanho micrométrico (da ordem de até 30  $\mu\text{m}$ ). O silício reage prontamente com o carbono do diamante formando o composto químico SiC. Este composto expande menos do que o cobalto com a temperatura, apresentando uma expansão térmica mais compatível com a do diamante. Além disso, de acordo com informações oriundas do *U.S. Department of Energy* (2001), ele sofre menos desgaste do que o PDC padrão quando a temperatura do gume excede 300°C. Em vista destes fatores, a pastilha de TSP é um material mais desejável para aplicações que envolvam temperaturas muito altas. Ele é capaz de resistir à altas temperaturas seja durante a brasagem, seja em operação, sendo termicamente estável até a temperatura de 1200°C em atmosfera inerte ou em vácuo (CLARK,1987).

Comparando com as brocas de diamantes, estas são mais usadas em formações rochosas como calcário, arenitos finos e duros, dentre outras que se enquadram com essas propriedades geológicas. Sua estrutura de corte tem geometria triangular pontiaguda e, assim como as brocas de diamante, apresentam problemas de circulação de fluido no sistema hidráulico. O contato direto com a rocha dificulta as vias de circulação do fluido lubrificante.

## 2.4 DESGASTE DAS BROCAS

Para realizar um estudo adequado sobre o desgaste das brocas, é levado em consideração três parâmetros fundamentais: operação, transporte e por último, e mais relevante, é a formação geológica. Com o surgimento de técnicas de operação, manejo e transporte, pode-se descartar esses dois parâmetros, pois não são variáveis tão complicadas de serem controladas. Portanto, a formação geológica é o fator mais relevante para se ter controle não só do desgaste, mas de todo o projeto da broca até, sua aplicação.

Desgaste é a perda progressiva de substância de uma superfície de um corpo em decorrência do movimento relativo com outra superfície. (GAHR, 1987)

Segundo Brandim (2003) desgaste é o dano causado a uma superfície sólida envolvendo uma perda progressiva de material devido à movimentação relativa entre a superfície e um ou vários tipos de materiais.

Desta definição podemos tirar três conclusões importantes:

- Dano a uma superfície – o desgaste é um fenômeno tipicamente superficial.
- Movimentação relativa – é importante para ajudar e identificar os tipos de desgaste e os fatores que podem acelerá-lo.
- Tipo de material – ajuda na identificação do tipo de desgaste e na maior ou menor severidade de um tipo de desgaste para materiais diferentes.

O desgaste pode ocorrer na forma de perda de material ou dano superficial. O grande número de termos usados para descrever os tipos de desgaste dificultam a discussão de seus problemas. Diferentes tipos de desgaste em função dos mecanismos de desgaste são encontrados, dentre eles, cita-se: abrasão, adesão, erosão, *fretting*, fadiga superficial e corrosão.

## **2.4.1 Fatores que interferem no desgaste de brocas**

### 2.4.1.1 Mecanismo de desgaste de brocas PDC

O desgaste se caracteriza pela mudança geométrica ou dimensional nos insertos de PDC que surgem durante a realização da remoção de material das rochas. Tais características de desgaste são classificadas como desgastes suaves, desgastes agudos, desgastes em que a peça fica sem uniformidade e até mesmo deformações plásticas (JAHANMIR, 1978). Outros mecanismos de desgaste também são percebidos quando o restante do material no fundo do poço é retirado tais como abrasividade, aderência, desgaste corrosivo, erosivo, etc. O conhecimento de todas as variáveis que causam esses desgastes facilita a execução da perfuração,

Podemos resumir os principais tipos de mecanismo de desgastes na Tabela 1, onde os cinco primeiros casos acontecem devido a interações mecânicas e o último tipo é causado pelas configurações do meio.

Tabela 2- Principais mecanismos de desgaste. (ADAPTADA: ERSOY e WALLER, 1995)

MECANISMO DE DESGASTE	TIPO DE CONTATO	MOVIMENTO	MECANISMO DE DESGASTE
ABRASIVO	ELASTICO/PLASTICO O	DESLIZAMENTO	ABRASÃO
ADESIVO	ELASTICO/PLASTICO O	DESLIZAMENTO	ADESÃO
EROSIVO	ELASTICO/PLASTICO O	IMPACTO/DESLIZAMENTO O	ABRASÃO
FRETTING	ELASTICO/PLASTICO O	OCILATÓRIO	ADESÃO E ABRASÃO
FADIGA	ELASTICO/PLASTICO O	ROTATIVO	FADIGA
CORROSIVO	ELETROLÍCO	ELETROQUIMICO	REAÇÃO QUÍMICA

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgastes dos bits de perfuração. O desgaste gerado pela abrasão é motivado pela presença de partículas duras no material e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao desgaste abrasivo. Muitas vezes, partículas duras arrancadas pelos bits por aderência ou mesmo por abrasão é arrastada pelo movimento da broca, causando desgaste abrasivo no corpo da mesma.

O desgaste por abrasão é responsável pela maior parte dos casos em brocas de perfuração. Mais de 80% das formações geológicas encontradas na Terra são classificadas como duras e com grandes quantidades de minerais potencialmente abrasivos como sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

O desgaste abrasivo pode ser classificado como a dois ou a três corpos. Na abrasão a dois corpos, as partículas abrasivas são movidas livremente sobre a superfície do material como areia em uma calha. No desgaste abrasivo a três

corpos, as partículas abrasivas agem como elementos de interface entre o corpo sólido e o contra-corpo. O desgaste quando envolve três corpos é cerca de duas a três vezes menores do que quando envolve dois corpos. Pois, no caso de três corpos, devido à variação no ângulo de ataque, apenas uma pequena porção das partículas causam desgaste. (GAHR,1987). A Figura 22 é um exemplo de abrasão com presença de 3 corpos.

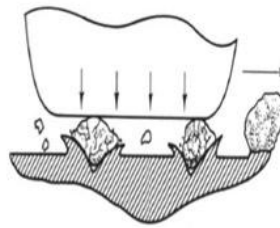


Figura 22 - Desgaste abrasivo. Fonte: Disponível em <  
<http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste>>.

Acesso em 19 mar. 2013

Microsulcamento e microcorte são mecanismos dominantes em materiais mais dúcteis, Figura 23. A ocorrência de um deles vai depender do ângulo de ataque das partículas abrasivas. O microcorte consiste na formação de pequenos cavacos, quando as tensões de cisalhamento impostas pelo deslocamento da partícula abrasiva sobre a superfície são suficientemente elevadas para a ruptura do material dúctil. O microcorte ocorre a partir de um ângulo de ataque crítico. Este ângulo de ataque crítico é função do material que está sendo desgastado e das condições de teste. A transição do mecanismo de microsulcamento para microcorte depende também do coeficiente de atrito. Normalmente o mecanismo passa de microsulcamento para microcorte com o aumento da dureza do material que está sendo desgastado. Aumentos ainda maiores de dureza resultam na passagem de microcorte para microtrincamento.



Figura 23 - Micrografias da superfície dos sólidos que sofreram desgaste abrasivo (a) microsulcamento, (b) microcorte (c) microlascamento - Fonte (GAHR,1987)

O microtrincamento pode ocorrer quando são impostas grandes tensões sobre as partículas abrasivas, particularmente em superfícies de materiais frágeis. Neste caso, grande quantidade de restos de rochas é retirada da superfície devido a formação e propagação de trinca.

O desgaste erosivo se caracteriza pela perda progressiva de material da superfície devido ao impacto contínuo de partículas sólidas. A taxa com que um material é erodido, depende de fatores tais como tamanho, forma, dureza, ângulo e velocidade de impacto das partículas erodentes, assim como da temperatura e propriedades da superfície erodida. Em temperaturas elevadas, o desgaste erosivo pode vir acompanhado de oxidação, e podem ocorrer diferentes estágios desde uma erosão dominante, erosão-oxidação, ou oxidação dominante (SUNDARARAJAN, 1997). Na indústria petrolífera a erosão ocorre quando o fluido de perfuração está a uma vazão alta e contendo resíduos de partículas sólidas relativamente grandes, oriundas das rochas trituradas, o que ocasiona a perda de material da matriz e dos cortadores de PDC por erosão. A Figura 24 mostra como acontece o impacto de partículas.

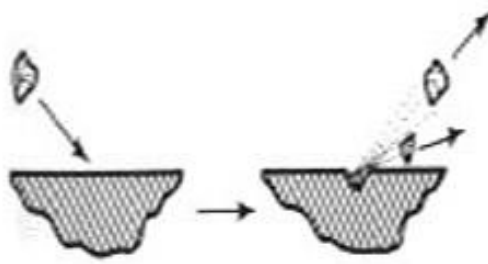


Figura 24 - Desgaste erosivo. Fonte: Disponível em <  
<http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste>>.  
Acesso em 19 mar. 2013

O desgaste por adesão ocorre nos contatos de asperezas. A área real de contato entre superfícies é aprox. 1/10.000 da área aparente. A pressão sobre as asperezas que suportam o contato pode ser extremamente alta. Deformação plástica pode ocorrer e algumas asperezas terão tal contato íntimo que a adesão pode ocorrer. O desgaste adesivo ocorre quanto às junções formadas neste processo deformam-se plasticamente, transferem-se ou fraturam. O desgaste adesivo é a fase de iniciação de quase todos os sistemas de desgaste de escorregamento à seco, mas a medida que o desgaste progride ele se torna de modo misto. Desde que outras formas de desgaste podem estar co-atuando com o desgaste adesivo, é preferível se referir a esta forma de desgaste em outros termos, como desgaste metal (RIJEZA, 2013).

O desgaste adesivo pode ocorrer quando as superfícies deslizam uma contra a outra. A alta pressão local entre as asperezas em contato resulta em deformação plástica, adesão e conseqüentemente a formação de junções localizadas. O deslizamento relativo entre as superfícies em contato causa ruptura destas junções e frequentemente transfere material de uma superfície para outra. Isto pode aumentar o risco de sobrecarga devido à tensão, velocidade ou temperatura. Sendo relacionado a um grande aumento do coeficiente de fricção e desgaste. Em casos extremos é impossível haver novo movimento relativo. A formação de junção no local do contato entre as duas superfícies, pode ser formada por adesão ou coesão.

A tendência para formar juntas aderidas depende das propriedades físicas e químicas dos materiais em contato, do modo e valor da carga, bem como

de contaminantes e rugosidades. Uma vez que a adesão depende da real área de contato, ela é influenciada pela resistência dos materiais, deformação plástica, estrutura do cristal e número de planos de escorregamento. A Figura 25 observa-se a remoção de material por desgaste adesivo (RIJEZA, 2013).

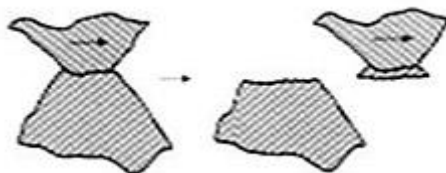


Figura 25 - Desgaste adesivo. Fonte: Disponível em <  
<http://www.rjeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste>>.  
Acesso em 19 mar. 2013

O *Fretting* é um tipo de desgaste onde há o movimento oscilatório de pequena amplitude entre duas superfícies como pode-se ver na Figura 26. É usualmente tangencial e não intencional. Geralmente ocorre entre peças para as quais não há previsão de movimento relativo. O desgaste inicia-se por adesão microscópica. Uma vez que a superfície é piorada o desgaste progride por formação de “pitting”. Geralmente é desconsiderado, mas torna-se importante quando o pitting gera uma falha por fadiga. (RIJEZA, 2013)

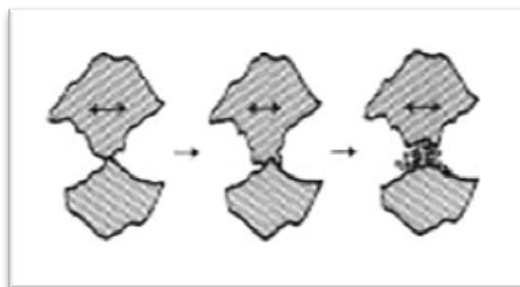


Figura 26 - Fretting. Fonte: Disponível em <  
<http://www.rjeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste>>.  
Acesso em 19 mar. 2013

A corrosão é um desgaste ocasionado na superfície, gerado pela interação desta superfície com o ambiente onde ela está trabalhando. Existem inúmeros tipos de corrosão, e cada uma delas deve ser bem identificada para poder se proporcionar a melhor proteção possível para as brocas.

## **2.4.2 Formação geológica**

O conhecimento da formação geológica é um dos fatores mais importantes, para uma boa operação de perfuração de um poço. Neste caso todas as propriedades físicas da rocha são levadas em consideração. As principais são: abrasividade e resistência específica da rocha.

### **2.4.2.1 Resistência específica da rocha**

Está relacionada com a litologia e com os eventos geológicos que ocorreram durante sua existência. Existem rochas que foram confinadas a grandes profundidades e posteriormente ficaram a profundidades menores devido a levantamentos tectônicos. Por isto, são mais compactas do que as de tipos similares, mas que não trocaram de profundidade ao longo do tempo. A resistência específica da rocha também depende da cimentação, da forma e tamanho dos grãos.

### **2.4.2.2 Peso Sobre a Broca – WOB**

À medida que a broca perfura os dentes ou cortadores se desgastam, e geralmente se aplica cada vez mais peso. Este aumento de peso pode ser feito até chegar a um ritmo de penetração adequado ou até chegar ao limite prescrito nas recomendações de operação da broca, caso contrário, a broca terá um desgaste prematuro, seja ela de cones ou diamante.

### **2.4.2.3 RPM – Rotação da broca**



A rotação é expressa em RPM (rotações por minuto). A alta rotação, por si só, não limita o funcionamento das brocas, principalmente as de diamante, já que podem ser usadas com motor de fundo ou turbina. Existem, também, brocas tricônicas especiais para altas velocidades de rotação. Para evitar velocidades críticas, deve-se usar o senso comum: a rotação mais adequada é aquela que produz a um máximo ritmo de perfuração sem causar problemas. Deve-se observar que em formações moles um aumento na rotação resulta em um aumento proporcional do ritmo de penetração. É possível que em algumas formações mais duras ocorra o contrário.

Um caso particular são brocas de cones projetadas para serem usadas com motor de fundo ou turbina. Nestas condições a velocidade de rotação é alta, os motores de fundo, dependendo de seu diâmetro, podem chegar a uma rotação de 50 a 600rpm, e as turbinas a uma rotação maior que 1000rpm. O projeto específico consiste em melhorias no sistema de rolamento, hidráulica, recobrimento de metal duro para proteger contra a abrasão, selo e graxa para operar em condições de alta temperatura com segurança.

### **2.4.3 Extração da lama**

A limpeza do fundo do poço também é um dos fatores que afetam o desgaste da broca, por isso o fluido de perfuração tem a função de limpa o poço e carregar os cascalhos. Desta maneira, evita-se que a broca embole ou retrabalhe. Também efetua o esfriamento dos dentes ou cortadores e lubrifica a broca evitando assim o desgaste.

### **2.4.4 Influência da escala de dureza Mohs**

A Escala de Mohs quantifica a dureza dos minerais, isto é, a resistência que um determinado mineral oferece ao risco, ou seja, à retirada de material da sua superfície. O diamante risca o vidro, portanto, é mais duro que o vidro. Esta escala foi criada em 1812 pelo mineralogista alemão Friedrich Mohs com 10 minerais de diferentes durezas existentes na crosta terrestre. Atribuiu-se valores de 1 a 10. O valor de dureza 1 foi dado ao material menos duro da escala, que é o talco, e o valor

10 dado ao diamante, como visto na Figura 27, que é a substância mais dura conhecida na natureza. Esta escala não corresponde à dureza absoluta de um material. Por exemplo, o diamante tem dureza absoluta 1.500 vezes superior à do talco. Entre 1 e 9, a dureza aumenta de modo mais ou menos uniforme, mas de 9 para 10 há uma diferença muito acentuada, pois o diamante é muito mais duro que o coríndon (ou seja, que o rubi e a safira).

Dureza	Mineral	Fórmula química
1	Talco (pode ser arranhado facilmente com a unha)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Gipsita (ou gesso) (pode ser arranhado com unha com um pouco mais de dificuldade)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcita (pode ser arranhado com uma moeda de cobre)	$CaCO_3$
4	Fluorita (pode ser arranhada com uma faca de cozinha)	$CaF_2$
5	Apatita (pode ser arranhada dificilmente com uma faca de cozinha)	$Ca_5(PO_4)_3(OH, Cl, F)$
6	Feldspato / ortoclásio (pode ser arranhado com uma liga de aço)	$KAlSi_3O_8$
7	Quartzo (capaz de arranhar o vidro. Ex.: ametista)	$SiO_2$
8	Topázio (capaz de arranhar o quartzo)	$Al_2SiO_4(OH, F)_2$
9	Coríndon (capaz de arranhar o topázio. Exs.: safira e rubi)	$Al_2O_3$
10	Diamante (mineral mais duro que existe, pode arranhar qualquer outro e é arranhado apenas por outro diamante)	C

Figura 27 - Escala da dureza Mohs (Imagem: Britannica Online Encyclopedia)

## 2.5. Estudo de caso

Conforme testes de desgaste apresentados em MATOS (2008), foram utilizadas 3 pastilhas adquiridas da Christensen Roder, tipo PDC IADC 2 “Buttress”. Com altura e diâmetro iguais a 12,95 mm, altura da camada diamantada de 2 mm, com chanfro de 25° e altura do chanfro de 0,5 mm. Própria para perfuração de poços em folhelhos moles a duros, arenitos moles e rochas carbonáticas, para taxas de penetração de 3 a 15 m/h.

Para material de corte, foi utilizado um granito cinza classificado petrograficamente como Biotita Monzogranito, com estrutura orientada, de granulometria variando de 4 a 20 mm. Os corpos de prova foram preparados em forma de discos, com diâmetro externo de 70 cm e altura de 5 cm.

Na realização dos testes de corte realizou-se rotações de 20, 30 e 40 rpm no disco de granito, sem a utilização de líquido refrigerante e pressurização de espuma lubrificante (varia de 60 a 150Mpa). Essas medidas foram determinados em face ao uso destes valores na perfuração de poços de óleo e gás com brocas PDC.

As pastilhas PDC foram pesadas antes e após cada ensaio para o cálculo de desgaste das mesmas, em balança digital Sartorius. Com ensaios que duraram 5 minutos cada, foram registrados, em tempo real, a profundidade de corte no disco de granito (desgaste da mesa), bem como a temperatura lida diretamente na pastilha PDC via termopar. Antes e após cada ensaio as pastilhas PDC foram pesadas para o cálculo de desgaste.

Observou-se que ao aumentar a carga sobre o cortador, a temperatura nas proximidades da ferramenta aumenta. O ângulo de corte e a rotação da mesa não exerceram influência significativa na temperatura das pastilhas PDC, para qualquer velocidade da mesa. À medida que é aumentada a carga sobre as pastilhas, o atrito contra os corpos de prova de granito também aumenta. Também se observa que a temperatura aumenta nas proximidades da ferramenta com o aumento da rotação.

Quando é analisada a variação do ângulo de corte da pastilha de PDC nos valores de  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$  e  $30^{\circ}$ , independentemente do ângulo de corte utilizado, o desgaste permaneceu com o mesmo valor. Porém, como já é esperado, quando há aumento da carga aplicada há maior desgaste na mesa de granito, por exemplo no experimento onde a aplicação da carga de 15 kgf causou maior desgaste do que a carga de 10 kgf (Figura 28).

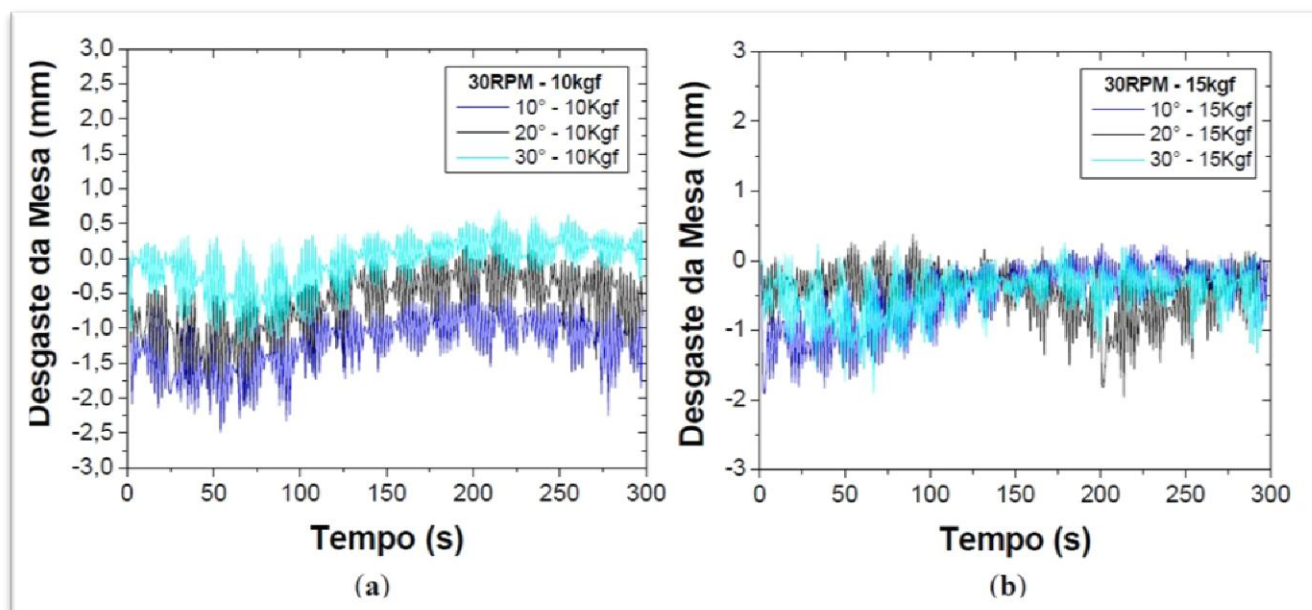


Figura 28 - Desgaste da Mesa de Granito via rotação a 30rpm. (a) 10kgf e (b) 15kgf.  
(MATOS et. al., 2009)

Como apresentado na Figura 29, a rotação da mesa de granito em 20rpm, ocorrem melhores resultados de corte com as pastilhas PDC para ângulo de corte de 30° e carga vertical de 15kgf. A melhor situação ocorre para a carga de 15 kgf, no caso da rotação a 40 rpm e ângulo de corte de 10°. O estudo demonstra que o único mecanismo observado foi o de cisalhamento, pois não foi verificado um impacto por vibração pronunciado para as rotações da mesa de granito de 20, 30 e 40 rpm. É a competição entre os mecanismos de corte por cisalhamento e por impacto para a rotação de 30rpm que geram as diferenças nas tendências e nos valores de desgaste. Enquanto que o mecanismo de impacto apresenta-se um pouco mais pronunciado que o de cisalhamento, para a rotação de 40 rpm.

Observando os valores de perda de massa (desgaste) das pastilhas PDC, verifica-se que o menor valor foi obtido quando se aplica rotação de 30 rpm e carga de 15 kgf, com ângulo de corte de 10°. O que vemos nesse estudo é um maior desempenho das pastilhas PDC foi na condição de 15 kgf / 30 rpm / 10°.

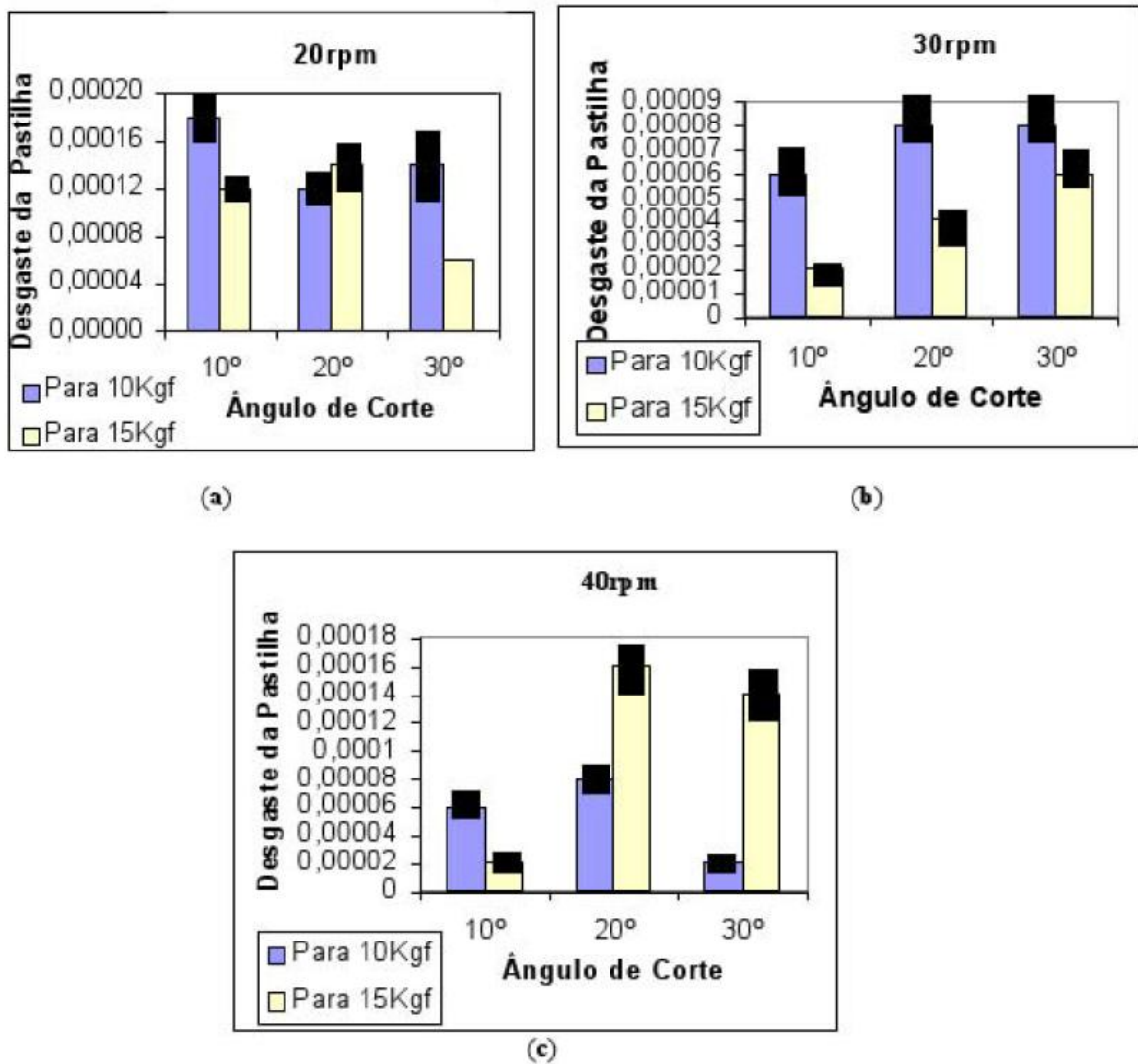


Figura 29 - Desgaste das Pastilhas PDC (em gramas) versus ângulo de corte para: a) 20rpm, b) 30rpm e c) 40rpm. As barras em preto indicam os desvios padrões dos resultados para a média de sete valores. (MATOS et. al., 2009)

O que podemos destacar como contribuição no estudo de Matos (2009), é que o uso de rotações baixas, cargas elevadas e ângulos de corte pequenos permitem desempenho e tempo de vida maior das pastilhas PDC de brocas de perfuração de poços de petróleo e gás.

### 3 CONCLUSÕES

Como foi tratado nesse trabalho, existe um conjunto de variáveis que devem ser consideradas num processo de perfuração de poços de petróleo para que se possa escolher o melhor tipo de broca a ser utilizada. Todas as decisões tomadas se baseiam nessas variáveis influenciando diretamente na escolha do tipo de broca e conseqüentemente no custo total da operação de perfuração.

Compete ao engenheiro responsável pela perfuração do poço de petróleo o conhecimento de todas essas variáveis, que vão desde os catálogos das brocas existentes no mercado bem como suas características do mecanismo de ataque, tipo de cortadores, dimensões, materiais, tipos de formações geológicas e a codificações IADC. O engenheiro responsável pelo poço deve conhecer a litologia das rochas, análises dos registros geofísicos de poços vizinhos, dados sísmicos da área, entender as características e propriedades dos fluidos de perfuração, sistemas hidráulicos, análises da evolução dos desgastes das brocas previamente empregadas, rendimentos obtidos nos poços vizinhos e históricos de perfurações.

Historicamente as brocas com partes móveis sempre tiveram bons resultados em perfurações petrolíferas em terra, à medida que a extração de petróleo tem se tornado cada vez mais complexa essas brocas passaram a apresentar resultados insatisfatórios, devido aos esforços mecânicos que foram impostos pelas rochas encontradas nas perfurações em mar. Os mecanismos de corte são basicamente esmagamento e raspagem que dependem diretamente da formação rochosa a ser perfurada, com base nesses dados pode-se configurar o ângulo offset para obter o melhor desempenho e maior taxa de perfuração. As brocas cônicas apresentam limitações de uso em perfurações que exijam muitos esforços mecânicos devido ao desgaste prematuro dos rolamentos, muito se tem feito para o melhoramento dos insertos de tungstênio que são inseridos nos cones, porém as limitações ficam restritas aos rolamentos que são responsáveis por receberem maior parte dos esforços. Com base nessas restrições impostas pelo desgaste prematuro dos rolamentos fez com que as pesquisas nesse campo se voltassem ao melhoramento das brocas PDC.

Existem varias formas de desgastes de brocas PDC, porém o mais comum de se encontrar e responsável pela grande parte dos casos é o desgaste abrasivo.

Carga excessiva e fadiga também contribuem para o desgaste dos bits. Desgaste volumétrico, devido a abrasão é proporcional ao peso exercido sobre a broca a uma determinada velocidade de rotação. Este desgaste ocorre numa nível microscópico, através de um processo de impacto/choque, impacto/fadiga sobre as superfícies de diamantes;

No impacto com a rocha, alguns bits de diamante apresentam esmagamento na qual é gradualmente removido. Outros grãos muitas vezes apresentam fratura. A velocidade à qual ocorre a abrasão dependente da diferença de dureza entre o cortador e a rocha. Portanto, em um tipo de rocha particular, as propriedades mais importantes devem ser levadas em consideração para que se faça uma escolha correta da broca. Isto ajuda a seleção dos parâmetros de operação que reduzem a taxa de desgaste e prolongam a vida útil. O processo de desgaste é muito complexo, envolve tantos fatores internos nos matérias quanto externo da formação. Com isso podemos chegar aos seguintes pontos.

Rocha que contém grandes partículas macias e têm uma quantidade considerável de poros, apresentam pequenas taxas de desgaste (calcário, por exemplo).

As taxas de desgaste dos bits aumentado rapidamente com o silicato conteúdo das rochas (arenito, por exemplo).

A taxa de desgaste dos bits esta diretamente ligada ao grau de dureza na escala de Morh das rochas.

A redução na velocidade de rotação melhorou o desempenho quanto ao desgaste, porem se obteve uma taxa de perfuração menor o que não seria tão interessante. É preciso ter conhecimento da geologia, pois uma boa relação entre o RPM e o avanço da broca irá trazer bons resultados.

O controle do fluxo da saída do fluido de perfuração não pode ser tão elevado, pois pode elevar os níveis de abrasividades tanto no bit quanto na matriz.

## REFERÊNCIAS

A. Ersoy, M. D. Waller, **Wear characteristics of PDC pin and hybrid core bits in rock drilling**, Department of Mineral Resources Engineering, Nottingham, 1995.

BAKER HUGHES INCORPORATED, **Advancing Reservoir Performance**. ALL RIGHTS RESERVED 2011

BOURGOYNE Jr, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG Jr, F.S. **Applied Drilling Engineering**. 2 ed. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1991.

BRANDIM, A. DE SÁ & ALCÂNTARA, N. GUEDES DE & HERNANDEZ, O. J. SARRIA& PARANHOS, R. P. DA ROCHA – Resistência ao Desgaste por abrasão em metal de solda do tipo Fe-C-Cr, obtidos por arco submerso. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação** – 2003.

Clark, I.E., (1987) “**Polycrystalline Diamond Drill Bits in Mining Applications**”. De Beers Industrial Diamond Division, Technical Service Centre, Ascot, United Kingdom, pp. 17-34.

Cardoso,C.L.; (2005). **Petróleo do poço ao posto**. 1ª edição , (4.4): 31.

D'Evelyn, M.P., (2001) “**Industrial Diamond**”. Technical Information Series, GE Research & Development Center, 31 pp.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber, 2003.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1970.

FERREIRA, Luís Andrade, **Uma Introdução à Manutenção** –, Publindústria, Porto, 1998.

GAHR, Karl-Heinz Zum. **Microstructure and wear of materials**. Tribology series, v10. Amsterdam: Elsevier, 1987. p.560

HALLIBURTON INCORPORATED, **Halliburton Drill Bits and Service**, ALL RIGHTS RESERVED 2009

MANSANO, Renato Brandão, **ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO E COMPLETAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO**, UFSC, Florianópolis, 2004.

NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. “**Curso de Sinterização**”. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Brasil, p. 32-66,1981.



PLÁCIDO, João Carlos Ribeiro; PINHO, Rodrigo. **Brocas de perfuração de poços de petróleo**. 2009. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/kellecampus/apostila-de-brocas>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

REBELLO, J.M.A. & PARANHOS, P. & LARA, J.A.C. & GUIMARÃES, A. S. – Resistência ao Desgaste por Abrasão, Dureza e Microestrutura de Revestimentos Duros Depositados por Arco Submerso. **ABS – XIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem**, p. 87 – 101, 1987.

RIJEZA. [www.rijeza.com.br](http://www.rijeza.com.br), 2013. Disponível em: <[www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste](http://www.rijeza.com.br/pesquisas/artigos-tecnicos/mecanismos-de-desgaste)>. Acesso em: 19 Março 2013.

RIBAS, P.R.F. et al. **Fatores que afetam a resistência ao desgaste de aços e ferros fundidos utilizados em componentes mecânicos que trabalham em mineração**. São Paulo: anais 57O.ABM, 2002. p.1810-1819

SUNDARARAJAN, G. e ROY, M. **Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures**. Tribology International, v. 30, p. 339-359, 1997.

S. Jahanmir, On the wear mechanism and the wear equations, in N.P. Suh and N. Saka (eds.), **Fundamentals of Tribology**. MIT Press, Cambridge, MA, 1978, pp. 455-467.

SCHLUMBERGER COMPANY, SMITH BITS, **DRILL BITS**, ALL RIGHTS RESERVED August 2011.

SYMES, Doctor R.F., (1988), **Enciclopédia Visual - Rochas e Minerais**, 7ª edição, (s/d), Lisboa, Editorial Verbo.

THOMAS, J.E. (ed.). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

U.S. Department of Energy (2001) **“Geothermal Technologies”**, 8 pp.