

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações sobre Perfurações

A seguir será apresentada uma revisão a respeito de alguns itens relacionados à perfuração de poços que foram objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1. Brocas PDC

A broca PDC (Polycrystalline Diamond Compact) é uma avançada ferramenta para perfuração de poços que utiliza como matéria prima o diamante sintético. Seus cortadores são na forma de pastilhas, soldadas nas aletas da broca, sendo estas últimas de aço ou de matriz (material composto por carboneto de tungstênio). A principal diferença desta ferramenta para as brocas de diamante natural e TSP (Thermally Stable Polycrystalline), é o seu sistema hidráulico, que funciona através de jatos, similar às brocas de cone.

O corpo das brocas PDC é projetado e manufaturado em dois estilos estruturais diferenciados: matriz (carboneto de tungstênio) ou aço. Ambos proporcionam diferentes capacidades de corte e, como cada uma delas tem algumas vantagens características, a escolha entre elas deve acontecer conforme a necessidade de sua aplicação. A Figura 1 apresenta um modelo de broca PDC.

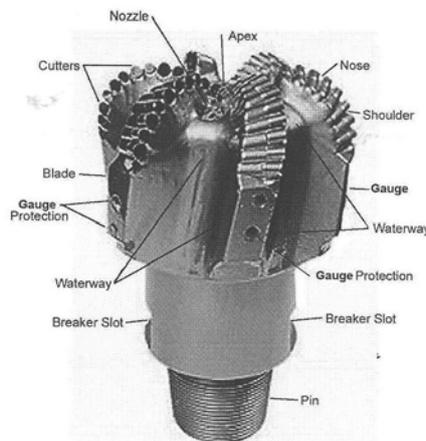


Figura 1 - Broca PDC (Wamsley e Ford, 2006).

O mecanismo de corte da broca PDC é por cisalhamento. Segundo Bourgoyne *et al.* (1986) e Wamsley e Ford (2006), algumas considerações influenciam o seu desempenho:

- Características das estruturas de corte: as estruturas de corte devem fornecer a cobertura adequada da seção do poço para perfurar satisfatoriamente, minimizando possíveis vibrações e também cumprindo com as necessidades produtivas. No início da década de 70, as brocas de PDC tinham projetos elementares que não incluíam métodos para limpeza e resfriamento. Na década de 80, a tecnologia PDC avançou rapidamente como resultado de um maior conhecimento sobre vibrações durante a perfuração e sua influência na produtividade. Atualmente, as estruturas de corte são reconhecidas como o principal elemento de balanceamento de forças para a broca e para a taxa de penetração durante a perfuração.

- Mecânica de corte: o método através do qual a rocha é cortada é importante no projeto e na seleção da broca. A ruptura da formação ocorre de duas maneiras: ruptura frágil e ruptura dúctil. O modo no qual a formação rompe depende da resistência da rocha, que é função das condições do fundo do poço tais como profundidade, pressão e temperatura. Quando ocorre uma ruptura frágil, a formação rompe com pouca ou nenhuma deformação. Na ruptura dúctil, a formação deforma elasticamente, seguida por uma deformação plástica até a ruptura. A força de penetração vertical aplicada através do peso dos comandos e a força horizontal gerada pela mesa rotativa são transmitidas para os cortadores. A força resultante define um plano, conhecido como plano de *thrust*. A Figura 2 apresenta um esquema do plano de *thrust* e do modelo de corte da broca PDC.

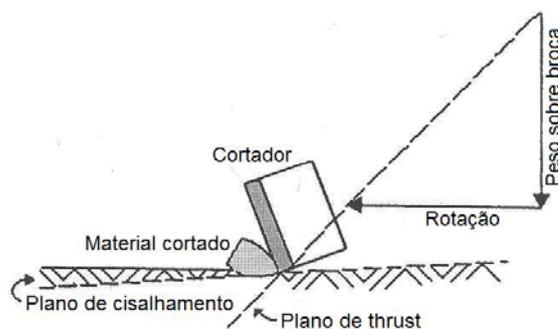


Figura 2 - Plano de *thrust* e modo de corte do cortador PDC (Wamsley e Ford, 2006).

Os cascalhos são cisalhados em um determinado ângulo inicial relativo ao plano de *thrust* o qual depende da resistência da rocha.

- Cortadores: possuem função de corte e, para ter um bom desempenho, eles devem ter um bom apoio estrutural e uma orientação eficiente em toda broca.

- Quantidade e disposição de cortadores: os cortadores são estrategicamente dispostos na face da broca para garantir uma cobertura completa da seção do poço. O número de cortadores existente em uma broca PDC é função do perfil da broca, do seu comprimento e do tamanho e tipo do cortador. Geralmente a quantidade de cortadores aumenta do centro da broca para as extremidades. Isto acontece porque os cortadores que estão próximos ao calibre (parte externa) devem viajar uma maior distância e mais rápido além de remover maior quantidade de rocha do que aqueles mais próximos do centro da broca. Se a quantidade de cortadores na face da broca for muito reduzida, a profundidade de corte aumenta, ROP aumenta, resultando em um torque maior, porém isto acaba reduzindo a vida útil da broca.

- Orientação do cortador: a sua orientação deve ser tal que, quando ele é carregado, devem surgir somente forças de compressão. Os cortadores deverão ser colocados de modo a obter um determinado ângulo de ataque (*back rake angle*), que é o ângulo entre a face do cortador e uma linha perpendicular à formação que está sendo perfurada. Este ângulo contribui para o desempenho da broca influenciando a eficiência da sua limpeza (feita através da circulação de fluido), aumentando a sua agressividade e prolongando a vida útil do cortador. Ele também influencia a trajetória do cascalho e, quanto maior este ângulo, menor a tendência de o cascalho ficar preso na broca. O ângulo de ataque é fundamental para definir a agressividade ou profundidade de corte por um cortador. Ele também reduz uma possível quebra do cortador por impacto quando formações mais resistentes são encontradas. Formações mais resistentes requerem um maior ângulo de ataque para dar durabilidade à estrutura de corte e reduzir a vibração. Cada cortador apresenta um ângulo diferente, que varia com a sua posição entre o centro da broca e a parte externa (calibre). A Figura 3 ilustra a ação do cortador ao cortar a formação e mostra o ângulo de ataque.



Figura 3 - Ângulo de ataque de um cortador PDC (Plácido e Pinho, 2009).

Outro ângulo importante é o *side rake*, que está relacionado à orientação dos cortadores em relação ao plano horizontal. A Figura 4 ilustra este ângulo.

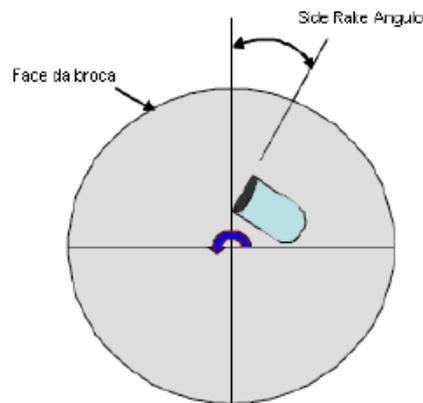


Figura 4 - Ângulo *side rake* (modificado de Bourgoyne *et al.*, 1991).

2.1.2. Sistemas de Aquisição de Dados

Os parâmetros de perfuração de poços podem ser monitorados utilizando-se dois sistemas diferentes: medidas por sensores de superfície e medidas de fundo de poço. Estas duas modalidades de monitoramento diferem quanto à confiabilidade de informações obtidas, sendo que as medidas feitas em fundo de poço, próximas da broca, são mais fidedignas. É importante o entendimento destes dois métodos de monitoramento antes de realizar uma análise de otimização de perfuração.

O sistema de monitoramento dos parâmetros através de sensores de superfície utiliza vários tipos de sensores localizados na sonda que medem parâmetros mecânicos e hidráulicos. Os dados de fundo de poço são coletados por

ferramentas como MWD (*measure while drilling*), que consiste em um agrupamento de sensores alocados próximo à broca, no BHA (*Bottom Hole Assembly*), que transmitem informação para a sonda em tempo real.

A seguir, são apresentadas algumas das variáveis medidas por sensores de superfície, cujo conhecimento é relevante para o desenvolvimento deste trabalho (segundo Tavares, 2006). A Tabela 1 apresenta um resumo destes parâmetros.

Tabela 1 - Parâmetros medidos por sensores de superfície (modificado de Tavares, 2006)

Parâmetros medidos por sensores de superfície
Carga no Gancho
Torque
Altura do Gancho
Rotação da Coluna
Deslocamento Vertical da Plataforma
Pressão de Injeção de Lama
Concentração Total de Gás
Vazão de Retorno de Fluido do Poço
Peso de Lama na Entrada e na Saída do Poço
Temperatura do Fluido de Perfuração

1- Carga no gancho: é a força total sustentada pelo gancho. Ela inclui o peso da coluna de perfuração e de equipamentos auxiliares, diminuída de qualquer força que tenda a reduzir este peso, como fricções na parede do poço (www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=hook%20load). A carga no gancho é monitorada através de um extensômetro posicionado na *dead-line*, conforme ilustrado na Figura 5.

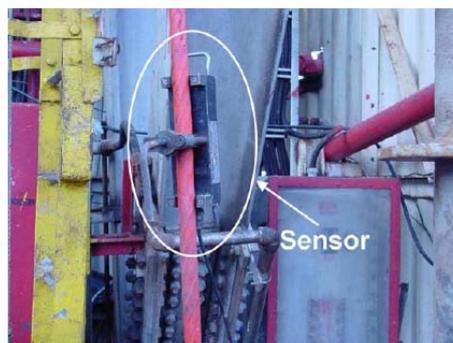


Figura 5 - Sensor de carga no gancho (Tavares, 2006).

2- Torque: o conhecimento deste parâmetro é relevante para monitorar a perfuração. Isto porque um aumento ou queda exagerada do torque representa algum problema na perfuração. Um aumento exagerado do torque pode acontecer

devido ao atrito lateral com a parede do poço (especialmente em poços direcionais) e a redução do torque é geralmente causada por um enceramento da broca (Rocha *et al.*, 2009).

3-Altura do gancho: alguns parâmetros importantes podem ser obtidos conhecendo-se a altura do gancho, como a profundidade do poço, a velocidade do gancho, o tempo e a velocidade de perfuração (Jinyu, 2009).

Segundo Tavares (2006), a altura no gancho é monitorada através de um sensor conta-giros, posicionado no próprio guincho, ou por um sensor chamado *geolograph*, posicionado na plataforma, que mede a altura real do gancho em relação a esta.



Figura 6 - Sensor de altura do gancho (Tavares, 2006).

4- Rotação da Coluna (RPM): esse parâmetro é fornecido pela sonda, mas pode-se colocar sensores de rotação no *top-drive* ou na mesa rotativa (Tavares, 2006). Em geral, quanto maior for o número de revoluções por minuto, maior é a taxa de penetração gerada, porém maior o desgaste da broca. O intervalo de rotações a ser utilizado em uma perfuração depende do tipo de broca e é sugerido pelas empresas fabricantes. Esses intervalos de aplicação de RPM podem ser obtidos no catálogo de brocas *World Oil's Drill Bit Classifier*.

5- Deslocamento vertical da plataforma: segundo Tavares (2006), o deslocamento vertical da plataforma é monitorado por um sensor conectado ao pistão do tensionador do *riser* de perfuração;

6- Pressão de Injeção de Lama: é um parâmetro importante, que, do ponto de vista de otimização de perfuração, deve ser bem projetada com o intuito de limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície. A má utilização da energia hidráulica resulta numa ação deficiente da

broca sobre a rocha a ser perfurada, já que os dentes da broca têm que retrabalhar os cascalhos acumulados no fundo do poço (Thomas et al., 2001).

7- Concentração total de gás no retorno da lama: a incorporação de gases da formação no fluido de perfuração é conhecida como corte de lama por gás. Neste processo, o gás vai se expandindo à medida que é trazido à superfície, causando uma diminuição na massa específica do fluido de perfuração nas profundidades mais rasas do poço, podendo acontecer um kick (fluxo de fluidos do interior da formação para o interior do poço durante as operações de perfuração). Em poços profundos, a redução da pressão no fundo é relativamente pequena, podendo permitir a continuidade da perfuração sem ter que aumentar o peso de fluido (Rocha et al., 2009).

8- Vazão de Retorno de Fluido do Poço: é medida por um sensor posicionado na *flowline* (conduto de fluxo gravitacional inclinado com a função de direcionar os fluidos que retornaram do poço à superfície para o equipamento de tratamento de fluidos) (Tavares, 2006). A vazão de retorno deve ser continuamente monitorada durante o tempo em que o poço esteja sendo controlado. Através desta medida é possível saber se ocorreu um kick (aumento da vazão), perda de circulação ou se houve presença de gás no riser (retorno de fluido de perfuração do riser na superfície).

9- Peso de lama na entrada e na saída do poço: medida por um sensor imerso em dois pontos do fluido, a diferença entre as leituras determina o peso de lama. Este parâmetro controla a pressão hidrostática no poço, impede a invasão de fluidos e o colapso do revestimento. O peso de lama excessivo pode gerar perda de circulação através da propagação de fraturas na rocha.

10- Temperatura do fluido de perfuração: A temperatura é medida por um sensor imerso em dois níveis no fluido de perfuração (Tavares, 2006). Conforme nos aproximamos do centro da Terra, ocorre um aumento da temperatura. Como consequência, durante a perfuração o fluido tende a retornar com uma temperatura mais elevada do que aquela a qual entrou no poço. Em zonas de compactação normal, o gradiente geotérmico aumenta gradualmente com a profundidade, já em zonas de pressão anormal, os gradientes se tornam mais acentuados. Assim, a análise da temperatura do fluido de perfuração pode ser considerada um indicativo de zonas de pressão anormalmente alta (Rocha et al., 2009).

Alguns parâmetros utilizados para monitorar e otimizar a perfuração são calculados a partir dos medidos por sensores, conforme pode ser visto abaixo:

- Profundidade vertical: distância vertical a partir de um ponto do poço (geralmente a profundidade final) até a elevação do *kelly bushing* (www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=true%20vertical%20depth).

- ROP – *Rate of Penetration* (taxa de penetração): mede a velocidade com que a broca perfura um determinado intervalo de formação. É calculada dividindo-se a distância perfurada em metros pela unidade de tempo considerada (geralmente horas). Quanto maior a taxa de penetração, menor o tempo de perfuração e menores os custos de sonda. Quando se objetiva otimizar uma perfuração, deve-se alcançar a máxima taxa de penetração possível diminuindo, assim, o tempo de execução. Este parâmetro é uma consequência de diversos fatores: tipo de broca utilizada, tipo de rocha perfurada, torque gerado, funcionamento da hidráulica de remoção de cascalhos, velocidade de rotação aplicada, peso aplicado à coluna, entre outros.

- WOB – *Weight on Bit* (peso sobre a broca): é a quantidade de peso imprimido sobre a broca no fundo do poço para perfurar. É obtido subtraindo-se o peso da coluna da carga no gancho. O peso sobre a broca é um parâmetro de controle durante a perfuração e, quando ele for medido por sensores de superfície, em sua leitura pode haver influência do empuxo gerado pelo fluido de perfuração e pelo atrito. Por isto, para otimizar a perfuração garantindo a correta transmissão de peso à broca, é importante a obtenção de medidas de fundo de poço, que são feitas o mais próximo da broca possível, minimizando estes erros de leitura.

Os dados experimentais de dois poços utilizados no desenvolvimento desta pesquisa foram medidos por um equipamento que faz medidas em fundo de poço conhecido como CoPilot™. O CoPilot™ é uma ferramenta de diagnóstico e aquisição de dados que fica conectada ao *Bottom Hole Assembly* (BHA). Ele pode ser utilizado tanto em BHAs onde se tenha *Rotary Steerable System*, quanto em colunas convencionais e também com motores de fundo (em modo rotativo ou *sliding*). O CoPilot™ contém uma variedade de sensores que medem 14 parâmetros, incluindo o peso sobre a broca, torque, pressão, rotação, aceleração, temperatura, e *bending moment* e envia estas informações em tempo real para o operador através de um monitor localizado na plataforma. Isto auxilia nas

decisões a serem tomadas e a corrigir os parâmetros de perfuração aplicados quando for necessário.

O CoPilot™ pode ser posicionado em qualquer parte do BHA, dependendo de quais as aplicações ou dados requeridos. Estes dados melhoram a qualidade da perfuração, pois através de seu monitoramento, é possível gerar menos desgaste nos componentes da coluna e do BHA. A aquisição de parâmetros em fundo de poço gera maior confiabilidade nos dados adquiridos já que estes são medidos em tempo real o mais próximo da broca possível. A Figura 7 ilustra o sistema de aquisição de dados através do CoPilot™.

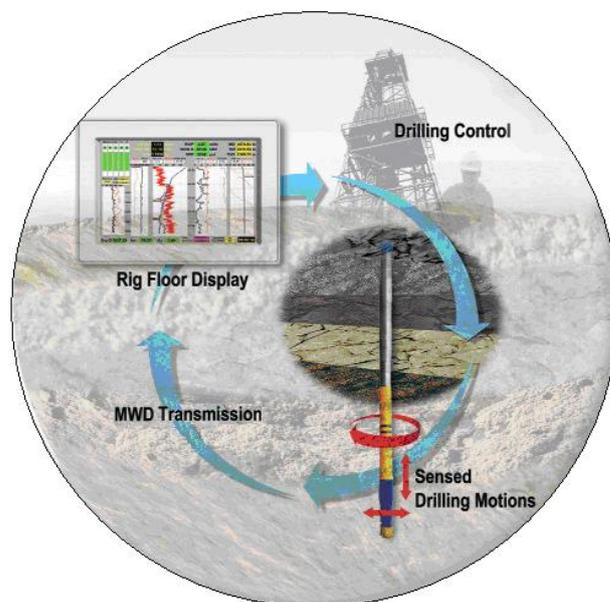


Figura 7 - Sistema de aquisição de dados do CoPilot™.

2.2. Contribuição da Hidráulica em Perfurações de Poços

As bombas de lama são utilizadas na atividade de perfuração de poços transmitindo energia ao fluido de perfuração. Este, por sua vez, percorre através de equipamentos de superfície, o interior da coluna de perfuração, jatos da broca e espaço anular. Ao longo deste caminho, o fluido de perfuração perde carga devido à passagem por conexões, pela broca e principalmente devido ao atrito gerado com as paredes do poço (Rocha et al., 2008).

A má utilização da energia hidráulica dificulta o trabalho da broca de cortar a rocha, pois os cascalhos começam a acumular no fundo do poço, ou, dependendo da formação (ex.: rochas argilosas), estes começam a grudar nos

cortadores da broca, causando o seu enceramento. Com isto, a broca gasta uma energia maior, já que ela tem que retrabalhar o material acumulado no fundo do poço (Thomas, 2004).

Segundo Thomas (2004), algumas técnicas são utilizadas para otimizar os parâmetros hidráulicos:

- máxima velocidade nos jatos;
- máxima potência hidráulica nos jatos;
- máxima força de impacto;
- máxima força de impacto efetiva.

Holster e Kipp (1984) desenvolveram ensaios de perfuração em laboratório para determinar o efeito da potência hidráulica da broca na taxa de penetração utilizando-se brocas PDC. Os testes foram realizados em três tipos de rochas (*Mancos shale*, *Pierre shale* e *Berea Sandstone*) e dois tipos de fluido de perfuração (*water-based mud* e *oil-based mud*). A Figura 8, a Figura 9 e a Figura 10 apresentam os resultados das análises para o folhelho reativo (*Pierre shale*) e para o arenito.

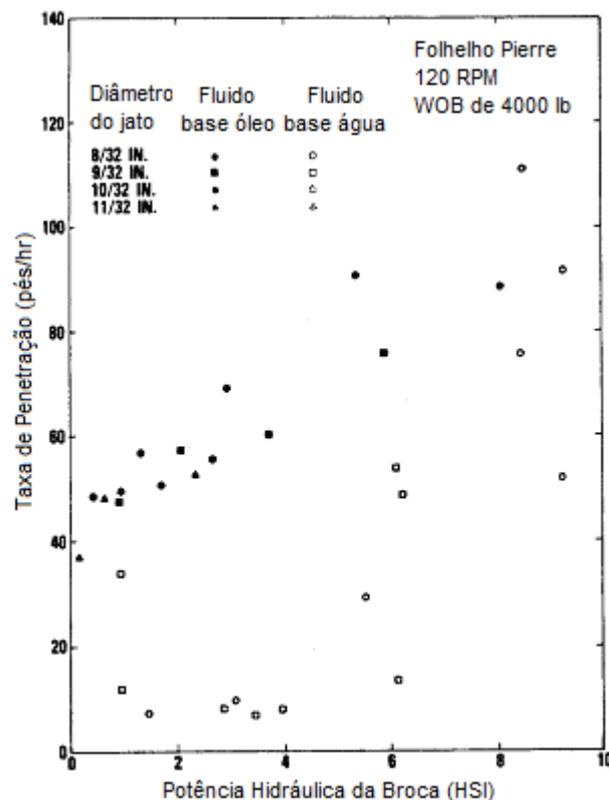


Figura 8: Avaliação da influência da potência hidráulica da broca no folhelho Pierre com fluido base-óleo e fluido base-água (modificado de Holster e Kipp, 2002).

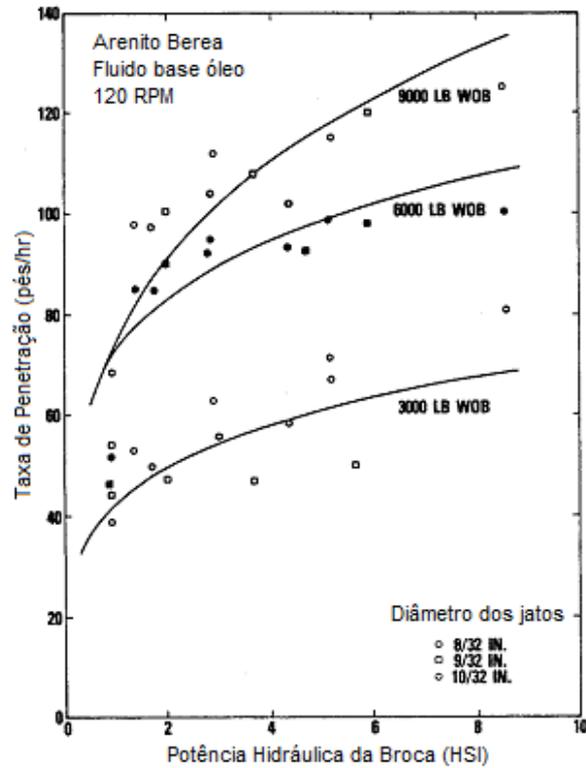


Figura 9: Avaliação da influência da potência hidráulica da broca no arenito Berea com fluido base-óleo (modificado de Holster e Kipp, 2002).

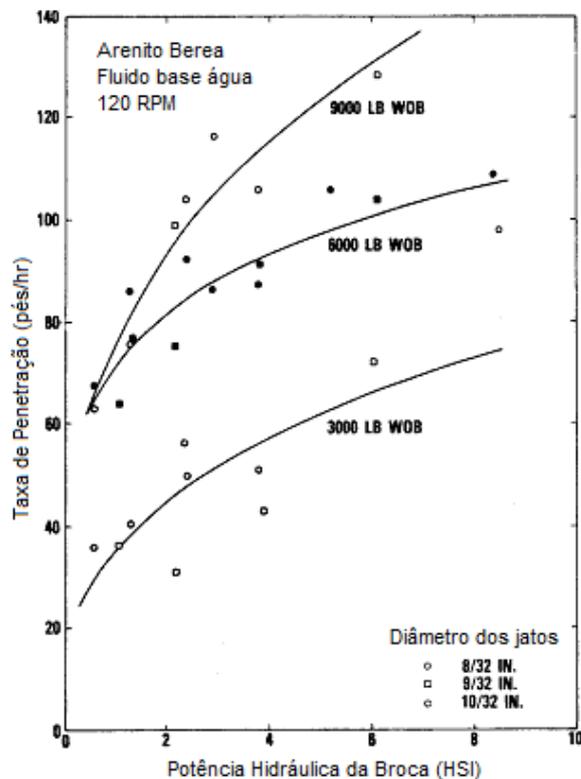


Figura 10: Avaliação da influência da potência hidráulica da broca no arenito Berea com fluido base-água (modificado de Holster e Kipp, 2002).

Analisando a Figura 8, percebe-se que a potência hidráulica da broca afeta de maneira significativa a taxa de penetração, utilizando-se o fluido base-óleo. Os dados obtidos com fluido base-água foram erráticos. Abaixo de 5 hp/in², segundo os autores, a broca perfurava com grande dificuldade devido ao enceramento. O aumento da potência hidráulica acima de 5 hp/in² influenciou positivamente a taxa de penetração. Portanto, conclui-se que, para o folhelho, o fluido base-óleo evitou que os cascalhos ficassem grudados nos cortadores da broca, produzindo assim, taxas de penetração maiores do que aquelas produzidas com fluido base-água.

Através da Figura 9 e da Figura 10 percebe-se uma melhora na taxa de penetração quando a potência hidráulica da broca aumenta, tanto para os ensaios com fluido base-óleo como para os com fluido base-água. Como o arenito Berea é uma rocha bastante permeável, os autores sugerem que o aumento da ROP resulte da conversão da energia cinética dos jatos de fluido em energia elástica nos poros da rocha. Isto reduziria a tensão efetiva e aumentaria a taxa de penetração.

Pessier e Fear (1992) também verificaram em ensaios de laboratório de grande escala que a eficiência mecânica máxima pode ser mais que dobrada com a otimização da hidráulica em brocas tricônicas. A Figura 11 ilustra este comportamento.

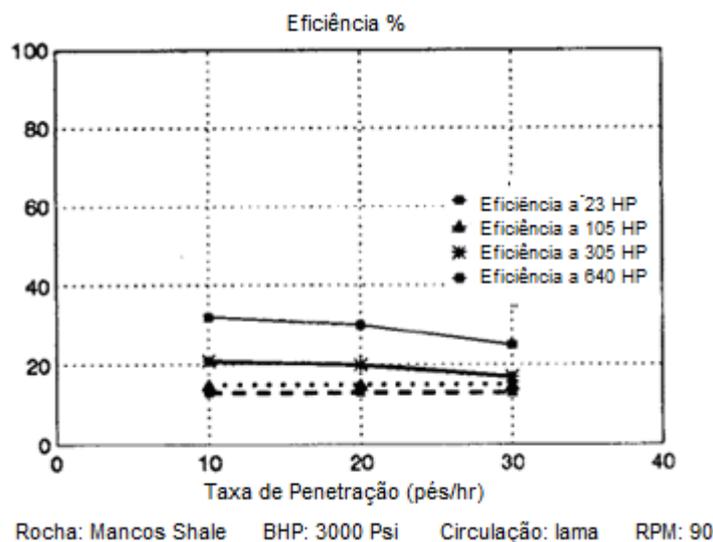


Figura 11: Influência da potência hidráulica na eficiência mecânica máxima – broca TCI (modificado de Pessier e Fear, 1992)

2.3.

Aplicação dos Conceitos de Energia Específica em Perfurações de Poços de Petróleo

O conceito de energia específica tem sido utilizado na Indústria do Petróleo tanto para criar programas de otimização de perfuração, como para decidir quando é o melhor momento para trocar de broca. Primeiramente será introduzida a sua definição, seguido de exemplos de sua aplicação em perfuração de poços.

A energia específica é definida como sendo o trabalho executado por unidade de volume escavado. Esta energia se refere à soma total de todo esforço aplicado na broca para que esta perfure e corte a rocha. A energia que é gasta na trituração do cascalho, em perdas friccionais, etc., está incluída na soma.

Teale (1965) foi o primeiro estudioso a aplicar o conceito de transferência de energia específica no processo de perfuração de poços. Ele interpreta a perfuração como sendo função de dois esforços:

- O esforço necessário para penetrar a rocha devido ao peso sobre a broca para o tempo de 1 minuto;
- O esforço necessário para remover a camada de rocha devido à rotação para 1 minuto.

Já que a energia específica depende do tipo de rocha perfurada, todos os tipos de broca têm valores característicos e singulares de energia específica associados a um determinado tipo de formação. As Eq. (1) e (2) apresentam o trabalho executado devido à aplicação do peso sobre a broca e do torque para o tempo de 1 minuto.

$$\Delta W_{\text{axial}} = WOB \cdot ROP \cdot 1 \text{ min} \quad (1)$$

$$\Delta W_{\text{rotacional}} = T \cdot N(2\pi) \cdot 1 \text{ min} \quad (2)$$

Sabendo-se que trabalho equivale à variação de energia e sabendo-se que energia específica é definida como sendo o trabalho executado por unidade de volume escavado, pode-se representar matematicamente este parâmetro conforme a Eq. (3).

$$SE = \frac{\Delta W_{axial} + \Delta W_{rot}}{\Delta volume} \quad (3)$$

A variação de volume durante a perfuração para o tempo de 1 minuto é expressa pela Eq. (4).

$$\Delta V = A.(ROP).1 \text{ min} \quad (4)$$

Substituindo as Eq. (1), (2) e (4) na Eq. (3), obtém-se a relação proposta por Teale (1965):

$$SE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{2\pi NT}{A_B \cdot ROP} \quad (5)$$

Onde:

T = torque da broca (pés.lb)

WOB = peso sobre broca (libras)

ROP = taxa de penetração (polegadas / min)

A_B = área da seção transversal da broca (polegadas ao quadrado)

N = revoluções por minuto

Convertendo-se a unidade da taxa de penetração para pés/hora, obtém-se:

$$SE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi NT}{A_B \cdot ROP} \quad (6)$$

Teale (1965) também estabeleceu uma relação importante entre a energia específica e a resistência à compressão não confinada da rocha (UCS). Foram examinados diversos ensaios sob pressões atmosféricas e o autor calculou a energia específica para os mesmos. Foi observado que para todos os testes a energia específica atinge um valor mínimo, que é bastante próximo do valor da UCS. É importante observar que as unidades que expressam a energia específica são idênticas àquelas que expressam a resistência à compressão. A Figura 12 ilustra um dos testes feitos pelo autor onde se pode comprovar a proximidade de valores.

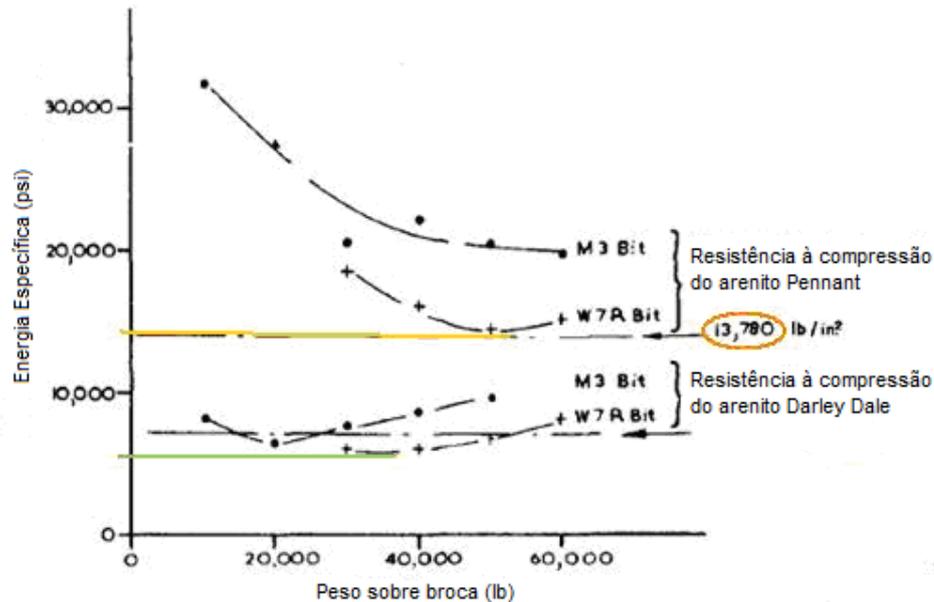


Figura 12 - SE versus UCS para duas brocas de cone (modificado de Teale, 1965).

A partir desta relação, pode-se comparar a energia específica mínima de uma rocha com a energia específica que está sendo medida durante a perfuração. A taxa entre estes dois parâmetros resulta na eficiência da perfuração. A Eq. (7) apresenta a eficiência mecânica proposta por Teale (1965).

$$EFF = \frac{SE_{min}}{SE} \quad (7)$$

Onde:

EFF = eficiência mecânica máxima

SE_{min} = energia específica mínima = resistência à compressão não confinada (UCS)

É importante salientar que a relação exposta acima ($SE = UCS$) é válida para perfurações sob pressão atmosférica. Pessier e Fear (1992) realizaram ensaios em rocha sob pressões hidrostáticas em que sugeriram a utilização da relação apresentada na Eq. (7) considerando a energia específica mínima equivalente à resistência à compressão confinada (CCS). Esta relação foi proposta devido à observação de um grande aumento da energia específica, que os autores relacionam ao aumento da resistência da rocha quando a mesma está sob condições confinadas.

Waughman et al. (2002) desenvolveram um procedimento para determinar qual o melhor momento de substituir brocas PDC desgastadas através do monitoramento da energia específica e do perfil de raios gama. Este procedimento foi estabelecido através de análise de um poço perfurado em *North West Shelf of Austrália*, com posterior aplicação em tempo real a outras duas perfurações de poços na mesma localidade. A metodologia proposta pelos autores consiste em:

- Conhecer o tipo de formação que está sendo perfurada em tempo real através de medidas de raios gama em fundo de poço;
- Calcular em tempo real a energia específica ao longo da perfuração;
- Estabelecer valores de energia específica de referência para cada início de perfuração em folhelhos com broca afiada;
- Comparar a energia específica em tempo real à energia específica de referência;
- Estimar o desgaste da broca comparando a energia específica em tempo real ao valor da energia específica de referência.

Através da sua análise, Waughman et al. (2002) concluíram que a percepção de que uma broca deve ser retirada do poço somente quando está bastante desgastada para garantir boa performance, deve ser reavaliada.

Judzis et al., (2009) realizaram ensaios de laboratório em grande escala, onde as amostras foram submetidas a elevadas pressões, utilizando quatro tipos de brocas (tricônica, PDC com 4 lâminas, PDC com 7 lâminas e impregnada), três tipos de rochas (*Crab Orchard sandstone*, *Mancos shale* e *Carthage marble*) e cinco diferentes tipos de fluido. Este trabalho analisa a performance das diferentes brocas nos três tipos de rocha, avalia a energia específica gerada com a utilização dos três tipos de broca e avalia a contribuição do tipo de fluido e do peso de fluido na geração de energia específica e nas taxas de penetração. Todos os ensaios foram realizados para uma pressão de confinamento de 11000 psi. A Figura 13 e a Figura 14 apresentam, para o arenito e para o calcário, os valores de energia específica obtidos para os diferentes tipos de broca.

Observando-se a Figura 13, percebe-se que a utilização de fluido base-água ao invés de água aumentou em mais de cinco vezes os valores de energia específica. Dentre os ensaios realizados com fluido base-água de 11 ppg, nota-se

que a broca PDC foi a que gerou menores valores de energia específica e broca impregnada foi a que gerou os mais altos valores.

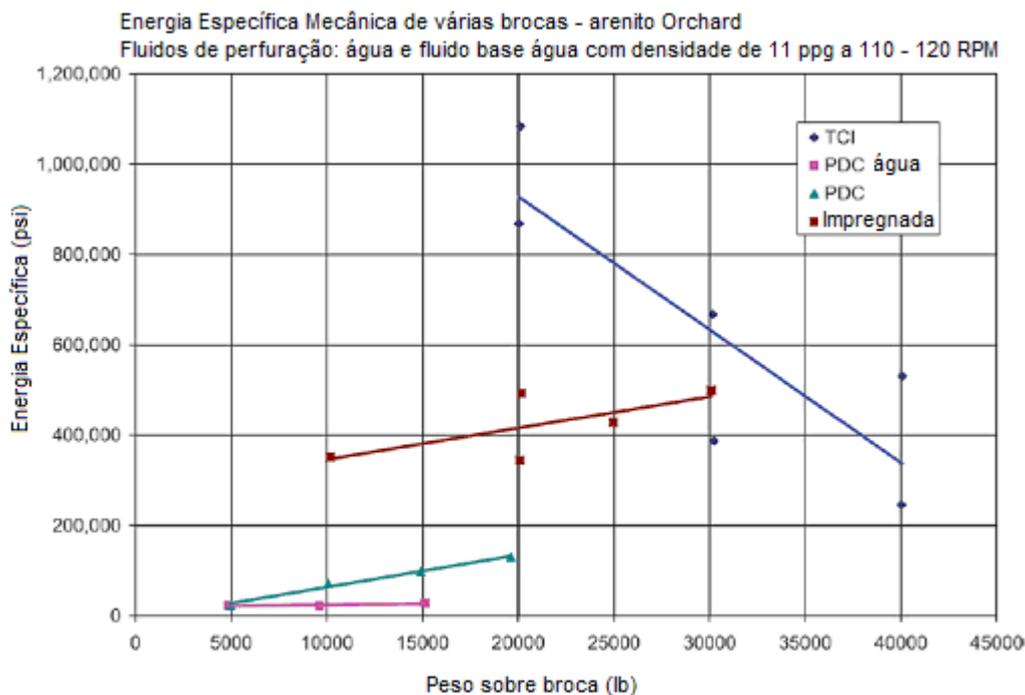


Figura 13: Energia específica obtida através de brocas PDC, TCI e Impregnada para fluido base-água – arenito Crab Orchard (Modificado de Judzis et al., 2009)

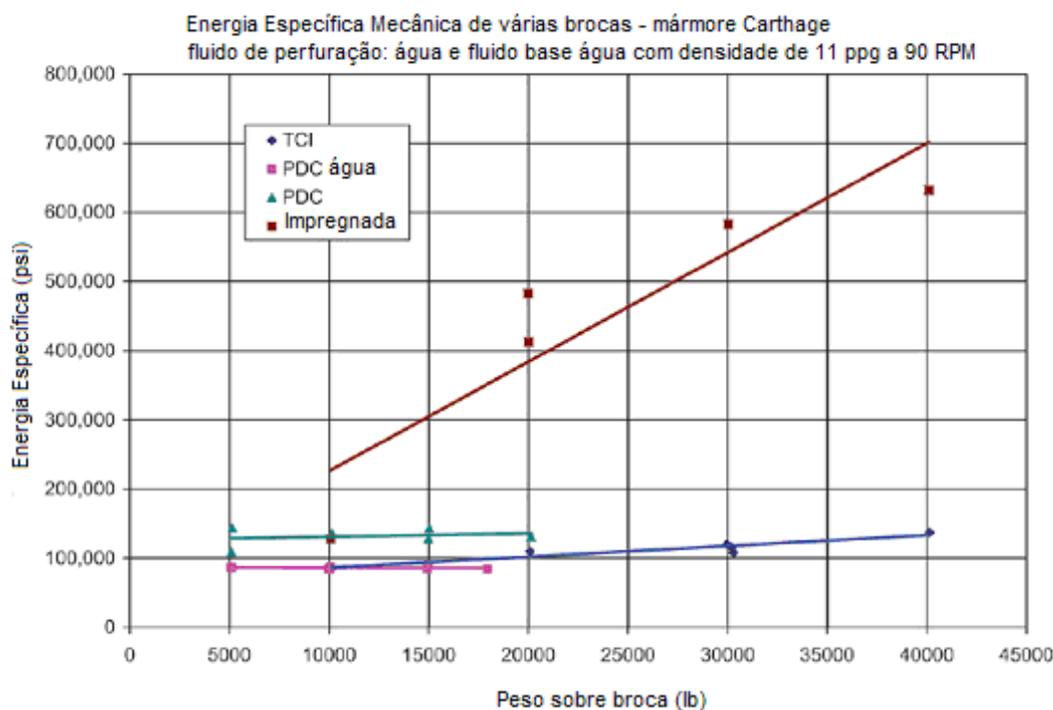


Figura 14: Energia específica obtida através de brocas PDC, TCI e Impregnada para fluido base-água – calcário Carthage (Modificado de Judzis et al., 2009)

Nas curvas apresentadas na Figura 14, o ensaio executado com água pura resultou nas menores energias específicas. Dentre os ensaios perfurados com fluido base-água, a broca tricônica foi a que gerou menor energia específica, seguida pela broca PDC. A broca impregnada novamente gerou as maiores energias específicas, indicando uma ineficiente perfuração nestas rochas.

A Figura 15 e a Figura 16 apresentam a influência da resistência, respectivamente, do arenito Crab Orchard e do calcário Carthage na energia específica. A resistência à compressão confinada a uma pressão confinante de 11000 psi é de 85000 psi para o arenito e de 40000 psi para o calcário.

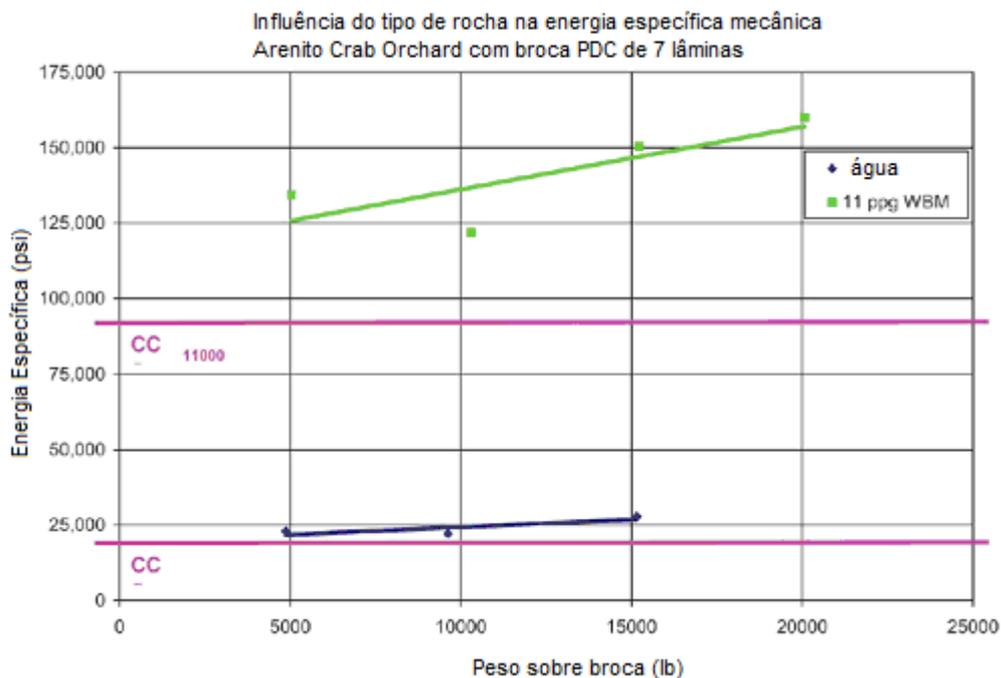


Figura 15: Influência do tipo de rocha na energia específica – arenito Crab Orchard (Modificado de Judzis et al., 2009)

Através da Figura 15 e da Figura 16, percebe-se que a curva de energia específica é consideravelmente maior do que a resistência à compressão confinada da rocha. Uma interpretação para este resultado seria a existência de um trabalho adicional realizado devido ao aumento da resistência da rocha que acontece quando a pressão de fundo de poço é elevada. Outra interpretação seria um trabalho adicional realizado pela broca para remover os cascalhos que ficam presos aos seus dentes. Neste aspecto, os autores citam a importância de um bom projeto da hidráulica para facilitar a retirada do material perfurado da face da broca, aumentando a taxa de penetração.

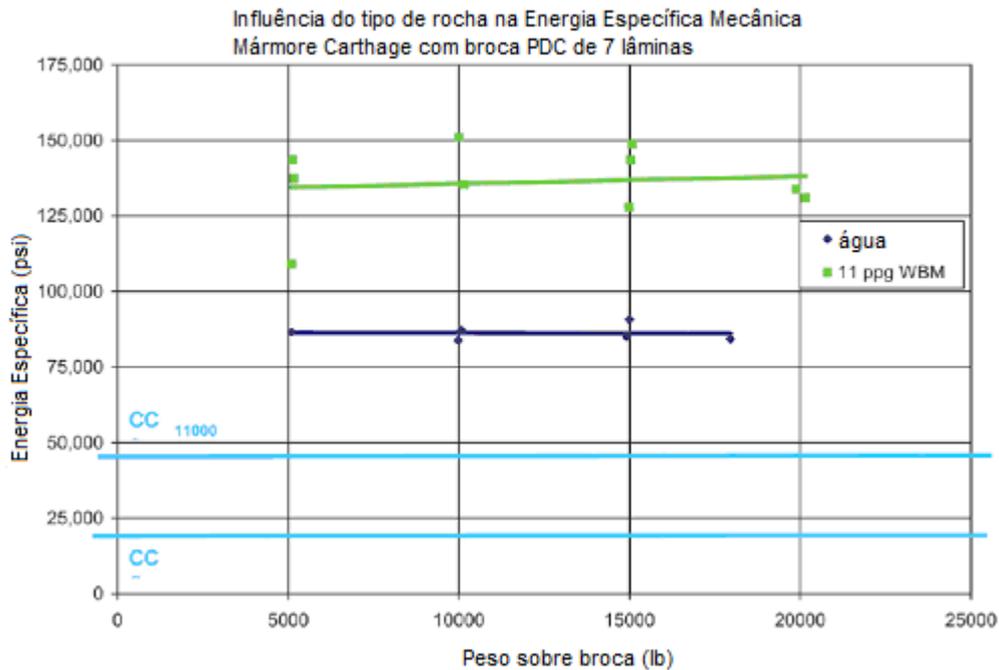


Figura 16: Influência do tipo de rocha na energia específica – calcário Marble (Modificado de Judzis et al., 2009)

2.4. Modelos Analíticos de Otimização de Perfuração Baseados na Transferência de Energia Específica

Alguns autores têm apresentado modelos analíticos para otimizar a perfuração por meio da aplicação de conceitos de transferência de energia mecânica. Estes modelos serão apresentados nos próximos sub-itens deste capítulo e serão utilizados nas análises de dados realizadas no presente trabalho.

2.4.1. Modelo analítico de Otimização da Perfuração – Dupriest

O monitoramento da energia específica tem sido utilizado em ensaios de laboratório para avaliar a eficiência da perfuração. Poucos autores utilizaram este método diretamente em campo, como Waughman et al., 2002, Caicedo et al. (2005) e Dupriest et al. (2005).

Dupriest *et al.* (2005) criaram um fluxo de trabalho para otimizar a taxa de penetração aplicável em tempo real durante as operações de perfuração. Este fluxo de trabalho é conhecido como *Fast Drill Process* (FDP) em que o operador pode modificar os parâmetros de perfuração, tendo acesso a dados que estão sendo

medidos durante a operação e transmitidos simultaneamente aos engenheiros, inclusive dados sobre a energia específica.

A energia específica utilizada neste sistema foi calculada partindo da equação proposta por Teale e modificada com o objetivo de ajustar seus valores aos da resistência à compressão confinada. Conforme visto na seção anterior, Pessier e Fear (1992) sugeriram que a energia específica pudesse ser relacionada à resistência à compressão confinada da rocha e que os picos de eficiência se situam em torno de 30 a 40 %.

Dupriest *et al.* (2005) propuseram a implementação de um artifício matemático com o objetivo de aproximar os valores de SE aos da CCS. Para isto basta multiplicar a Energia específica por 35 % (valor médio de pico de eficiência), conforme apresenta a Eq. (8). O ajuste dos valores de energia de forma que estes possam ser comparados com a resistência à compressão confinada durante o pico de performance da broca, proporciona uma boa referência aos operadores sobre a sua performance.

$$SE_{adj} = SE \cdot EFF_M \quad (8)$$

Onde:

EFF_M = eficiência mecânica máxima, cujo valor é 0.35.

Para compreender de que maneira são analisados os dados de energia específica computados em tempo real, o autor deste método utiliza como base uma visão estruturada sobre como a broca perfura. Para isto, o autor propõe a execução de ensaios de *drilloff*, no qual a perfuração é interrompida e um elevado peso sobre a broca é aplicado à coluna. O sistema de aplicação de peso é fixado de tal maneira que impeça a coluna de avançar enquanto continua-se aplicando rotação e circulando fluido para o interior do poço. Conforme a broca perfura, o peso sobre a broca declina até que esta não consiga mais cortar a rocha. A Figura 17 ilustra um gráfico obtido através deste ensaio.

A curva da Figura 17 é dividida em três regiões. Na região I a performance é limitada devido a uma profundidade de corte inadequada que ocorre quando o peso sobre a broca aplicado é muito baixo. Conforme o peso sobre a broca é

aumentado (e conseqüentemente a profundidade de corte também é aumentada), esta passa a se aproximar do seu pico de eficiência.

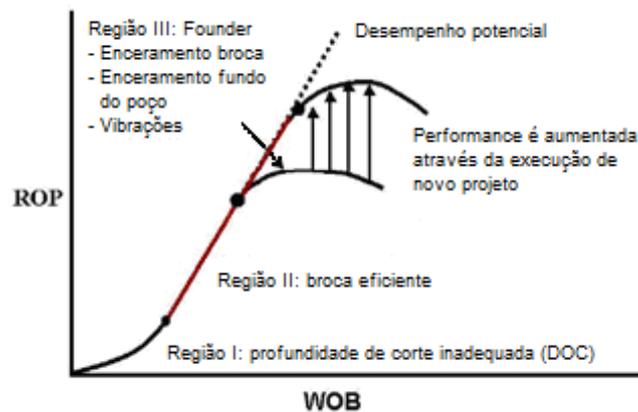


Figura 17 - Ensaio de *drilloff* (Dupriest et al., 2005).

Conforme dito acima, Dupriest *et al.* sugerem que as brocas conseguem transferir somente de 30 a 40 % da energia aplicada no processo de corte da rocha, mesmo quando estão operando no seu pico de desempenho. Entretanto, se a profundidade de corte for inadequada, a eficiência diminui juntamente com a taxa de penetração.

A região II da curva do ensaio de *drilloff* inicia quando a profundidade de corte passa a ser adequada para estabilizar a performance da broca. Neste trecho linear, a eficiência permanece a mesma conforme o peso sobre a broca é aumentado. Um aumento deste parâmetro gera um acréscimo proporcional da taxa de penetração. Apesar de a eficiência da broca ser praticamente constante, há um acréscimo da energia específica e, como resultado, a taxa de penetração cresce proporcionalmente. É neste trecho que os autores consideram que a perfuração está otimizada e que a energia específica ajustada ($0.35SE$) está próxima da resistência à compressão confinada da rocha.

O ponto a partir do qual esta proporcionalidade deixa de existir é conhecido como *founder point*. O terceiro segmento da curva (região III) inicia-se a partir do *founder point* onde se desenvolve uma condição na qual a transferência de energia para a rocha é limitada por algum fator (geralmente vibrações e enceramento da broca). O *founder point* é um valor muito próximo da máxima taxa de penetração que pode ser gerada. Atingido este limite, o aumento deste parâmetro só é conseguido através de um novo projeto para a perfuração.

Conhecendo este mecanismo de perfuração, Dupriest *et al.* (2005) sugerem a realização de um ensaio de *Drilloff*, a partir do qual se determina a faixa de valores de WOB onde a curva ROP x WOB é linear e, conclui-se do ensaio que a perfuração deve ocorrer dentro deste intervalo de valores de WOB. O artifício apresentado pela Eq. (8) é utilizado para monitorar os valores de energia específica, que devem estar próximos da resistência à compressão confinada quando a perfuração está otimizada.

Este método de otimização da perfuração apresenta como vantagem a possibilidade de ser utilizado em tempo real, auxiliando a equipe a selecionar os parâmetros adequados para maximizar a eficiência da perfuração e performance da broca. O monitoramento das vibrações e da energia específica ajustada fornece um entendimento sobre as causas de a curva ROP x WOB atingir o ponto conhecido como *founder* (a partir do qual a energia específica fica limitada por algum motivo como vibrações ou enceramento da broca).

Apesar de este método ser utilizado atualmente e resultar em melhorias no desempenho das perfurações, o entendimento sobre o comportamento da energia específica continua sem esclarecimento. Não houve uma investigação sobre qual o valor de resistência ideal para relacionar à energia gasta no processo de corte de rocha, optou-se pela implementação de um artifício que aproximasse os valores da energia à resistência confinada da formação.

2.5. Modelo SEROP (Specific Energy ROP Model)

No ano de 2005, Caicedo *et. al.*, propuseram um modelo para a previsão e otimização da taxa de penetração para brocas PDC baseado na análise da teoria da energia específica e da resistência à compressão confinada da rocha. A maioria dos modelos para cálculo da taxa de penetração utilizava a resistência não confinada da rocha para caracterizá-la. Porém, este parâmetro não é representativo da resistência aparente da rocha à broca, especialmente quando a perfuração ocorre a grandes profundidades. Caicedo *et. al.*, (2005) utilizaram um método bastante aplicado em mecânica das rochas para a obtenção da resistência à compressão confinada da formação.

Este método foi desenvolvido a partir da teoria de Mohr-Coulomb e resulta em valores mais realísticos e representativos da resistência aparente da rocha à broca do que a utilização da resistência não confinada. A Eq. (9) apresenta o cálculo deste parâmetro.

$$CCS_{DP} = UCS + DP + 2DP \cdot \frac{\sin \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (9)$$

Onde:

UCS = resistência à compressão não confinada da rocha (psi);

CCS_{DP} = resistência à compressão confinada da rocha permeável (psi);

ϕ = ângulo de atrito interno da rocha;

DP = pressão diferencial (psi).

A definição do parâmetro pressão diferencial é dependente do tipo de formação que está sendo perfurada. Para o caso de uma rocha permeável, a pressão diferencial pode ser determinada como sendo igual à diferença entre a pressão de fluido circulante e a pressão de poros.

$$DP = ECMP - PP \quad (10)$$

Onde :

$ECMP$ = pressão de fluido circulante (*equivalent circulating mud pressure*) (psi);

PP = poro-pressão (psi).

Para o caso de uma rocha não permeável, a pressão diferencial pode ser obtida aplicando-se uma relação descrita por Skempton (1954) para o cálculo da pressão de poros. Para uma formação impermeável, a atividade de perfuração gera um alívio das tensões na parte da formação localizada imediatamente abaixo da broca. Este alívio da sobrecarga faz com que a rocha se expanda, aumentando seu volume e diminuindo a sua pressão de poros. Este aumento da poro-pressão é considerado no cálculo da poro-pressão de Skempton, conforme apresenta a Eq. (11).

$$SkemptonPore\ Pressure = PP - \frac{(OB - ECMP)}{3} \quad (11)$$

Onde:

OB = pressão de sobrecarga (psi);

PP = poro-pressão (psi).

Portanto, para formações não permeáveis, a pressão diferencial resulta da diferença entre a pressão de fluido circulante e a poro-pressão de Skempton. A equação da resistência à compressão confinada para este caso é apresentada pela Eq. (13).

$$DP_{SK} = ECMP - SkemptonPore\ Pressure \quad (12)$$

$$CCS_{SK} = UCS + DP_{SK} + 2DP_{SK} \cdot \frac{\sin \phi}{(1 - \sin \phi)} \quad (13)$$

Onde:

UCS = resistência à compressão não confinada da rocha (psi);

CCS_{SK} = resistência à compressão confinada da rocha impermeável (psi);

ϕ = ângulo de atrito interno da rocha;

$ECMP$ = pressão de fluido circulante (*equivalent circulating mud pressure*) (psi);

DP_{SK} = pressão diferencial de Skempton (psi).

As duas soluções apresentadas acima (CCS_{DP} e CCS_{SK}) são consideradas como casos extremos. Uma representa a condição de formação permeável e a outra, a condição de formação não permeável. Para calcular a resistência à compressão confinada para formações com permeabilidade intermediária, Caicedo et al. (2005) utilizaram a técnica de interpolação entre as Eq. (9) e (13). Para isto, foi inserido nos cálculos o parâmetro porosidade efetiva (pe), para quantificar a permeabilidade da formação. A porosidade efetiva é a relação entre o volume de poros interconectados e o volume total de uma rocha. A metodologia para calcular a resistência à compressão confinada para formações com permeabilidade intermediária é ilustrada nas Eq. (14), (15) e (16).

$$CCS_{MIX} = CCS_{DP} \quad \text{Se } pe \geq 0,20 \quad (14)$$

$$CCS_{MIX} = CCS_{SK} \quad \text{Se } pe \leq 0,05 \quad (15)$$

$$CCS_{MIX} = CCS_{DP} \frac{(pe - 0,05)}{0,15} + CCS_{SK} \frac{(0,20 - pe)}{0,15} \quad \text{Se } 0,05 \leq pe \leq 0,20 \quad (16)$$

Onde:

CCS_{MIX} = resistência à compressão confinada intermediária (psi);

pe = porosidade efetiva.

A presente metodologia é sugerida pelos autores para calcular a resistência à compressão confinada da rocha que será utilizada nos cálculos para obtenção de uma taxa de penetração ótima para a perfuração. O modelo analítico proposto pelos autores que define a taxa de penetração ótima de uma perfuração será apresentado adiante.

Este modelo utiliza a teoria da energia específica para estabelecer uma relação entre a energia que é aplicada ao sistema (torque e peso sobre a broca) e a energia efetivamente entregue à rocha, considerando as perdas que ocorrem neste processo (quantificadas pelo parâmetro eficiência mecânica) e é obtido a partir da Equação (6). Nesta Equação, verifica-se que a energia aplicada ao sistema é equivalente à soma de duas parcelas de trabalho realizado: uma parcela resultante do esforço vertical (WOB) e uma parcela resultante do trabalho torcional (torque). Os parâmetros de controle aplicados à perfuração são o WOB e as revoluções por minuto. O torque é uma consequência da aplicação destas duas grandezas, do tipo de broca utilizada, tipo de rocha perfurada, entre outros fatores.

O torque pode ser relacionado ao peso sobre a broca através da Eq. (17).

$$T = \mu.WOB.\frac{D_B}{3} \quad (17)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito ao deslizamento da broca;

D_B = diâmetro da broca (polegadas).

O coeficiente de atrito ao deslizamento é um parâmetro que relaciona uma propriedade de resistência da rocha (pois o atrito é dependente do tipo de rocha) ao tipo de broca (pois o atrito varia conforme o tipo de broca utilizado). Portanto, esta grandeza estabelece uma ligação entre os parâmetros de perfuração, o tipo de broca e a resistência da rocha.

Substituindo o parâmetro torque da Eq. (6) pela Eq. (17), resulta na seguinte Equação:

$$SE = WOB \cdot \left[\frac{1}{A_B} + \frac{120\mu N}{D_B \cdot ROP} \right] \quad (18)$$

Onde:

WOB = peso sobre broca (libras);

ROP = taxa de penetração (pés / hr) ;

D_B = diâmetro da broca;

μ = coeficiente de atrito ao deslizamento da broca;

A_B = área da seção transversal da broca (polegadas ao quadrado);

N = revoluções por minuto.

A parcela de energia que é perdida durante este processo (por problemas de encerramento, vibração, entre outros) pode ser quantificada pela eficiência da broca. A Eq. (7) define matematicamente este parâmetro.

Substituindo o parâmetro energia específica da Eq. (7) na Eq. (18) e isolando o termo taxa de penetração, obtém-se o modelo de otimização proposto por Caicedo *et al.*:

$$ROP = \frac{13,33\mu.N}{D_B \cdot \left(\frac{SE \text{ min}}{EFF \cdot WOB} - \frac{1}{A_B} \right)} \quad (19)$$

Esta é a equação de otimização utilizada pela Chevron para selecionar os parâmetros de perfuração que resultem na maior ROP possível. As grandezas eficiência mecânica (EFF) e coeficiente de atrito ao deslizamento (μ) foram obtidas através de ensaios de laboratório de grande escala. Os resultados destes ensaios são apresentados no artigo de Caicedo *et al.* (2005) para broca PDC com

mais de sete lâminas, com cortadores de 19 mm e densidade do fluido de perfuração de 9,5 ppg.

O modelo SEROP utiliza a Eq. (19) para selecionar o melhor conjunto de parâmetros de perfuração para cada poço. É importante salientar que as grandezas μ e EFF devem ser obtidas experimentalmente em laboratório utilizando-se o mesmo tipo de rocha, mesmo peso de lama e tipo de broca da perfuração que se deseja otimizar. Os dados obtidos em ensaios de grande escala que foram publicados pela empresa aplicam-se apenas a um tipo de broca (broca PDC com mais de sete lâminas). O restante dos ensaios (para outros tipos de broca) não foram divulgados.

Este modelo é capaz de melhorar o desempenho da perfuração e da broca e aprimorar a determinação dos parâmetros ótimos de perfuração, reduzindo o custo do poço. Além disto, utiliza propriedades da rocha e variados ambientes de perfuração para a previsão da ROP para todos os tipos de broca. Portanto, a aplicação deste modelo é global, não é restritiva a uma determinada região nem precisa de calibração de parâmetros de condições locais.

A desvantagem deste método é que ele utiliza a comparação entre resistência à compressão confinada e a energia específica para determinar a eficiência da perfuração. Sabe-se atualmente que a CCS não é a propriedade da rocha que melhor representa o gasto mínimo de energia. Isto foi percebido por pesquisadores como Ledgerwood III (2007) e Judzis *et al.* (2007), os quais observaram que seus valores são consideravelmente menores do que os da energia específica, mesmo quando a broca perfura aparentemente com elevada performance.

2.6. Modelo analítico de otimização da perfuração – Armenta

Armenta (2008) propôs uma nova correlação incluindo no cálculo da energia específica um termo relacionado ao efeito hidráulico do fluido de perfuração. O autor define o novo modelo como sendo uma energia específica de perfuração (DSE), sendo ela a quantidade de energia requerida para destruir e remover da face da broca uma unidade de volume de rocha. A DSE inclui parcelas de energia torsional, axial e hidráulica.

Pessier e Fear (1992) observaram nos resultados de seus ensaios de laboratório que as perdas por fricção no sistema de circulação aumentam com a profundidade. Isto faz com que a broca tenha uma menor potência hidráulica, enquanto esta deveria receber uma potência hidráulica de maior magnitude para manter uma perfuração com razoável eficiência.

Conforme explicado anteriormente, a energia específica (SE) obtida para formações submetidas a elevadas pressões é geralmente maior do que a resistência à compressão confinada (CCS). Segundo Armenta (2008), o novo termo hidráulico inserido na equação de energia específica proposta por Teale (1965) aproxima este parâmetro do valor da CCS e da quantidade de energia dissipada na perfuração. A equação da energia específica de perfuração (DSE) pode ser visualizada abaixo.

$$DSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120 * \pi * RPM * T}{A_B * ROP} - \frac{1,980,000 * \lambda * HP_B}{ROP * A_B} \quad (20)$$

Onde:

1,980,000 = fator de conversão de unidades (1hp = 550 pés.libras/seg)

λ = fator hidráulico da broca (adimensional)

HP_B = potência hidráulica da broca (*horse power*)

A_B = área da face da broca (polegada²)

ROP = taxa de penetração (pés/hora)

A divisão entre a potência Hidráulica da broca equivale ao índice de potência hidráulica HSI (Plácido e Pinho, 2009), que pode ser obtido pela Eq. (21) proposta por Holster e Kipp (1984).

$$HSI = \frac{HP_B}{A_B} = \frac{Q \cdot \Delta P}{1713 \cdot A_B} \quad (21)$$

Onde:

HP_B = potência hidráulica da broca (HP)

Q = vazão de fluido (gpm)

ΔP = queda de pressão através da broca (psi)

A_B = área da seção transversal da broca (in²)

1713 = fator de conversão

A Figura 18 apresenta os valores do fator hidráulico (λ) da broca conforme os diâmetros da mesma.

Para validar seu modelo de otimização, Armenta (2008) utilizou ensaios em simulador de grande escala realizados por Tibbits *et al.* (1981) em que foi aplicada a equação da DSE e foram analisados os resultados. A Figura 19 apresenta uma comparação entre os valores da CCS e da DSE.



Figura 18 - Valores do fator hidráulico da broca (Modificado de Armenta, 2008).

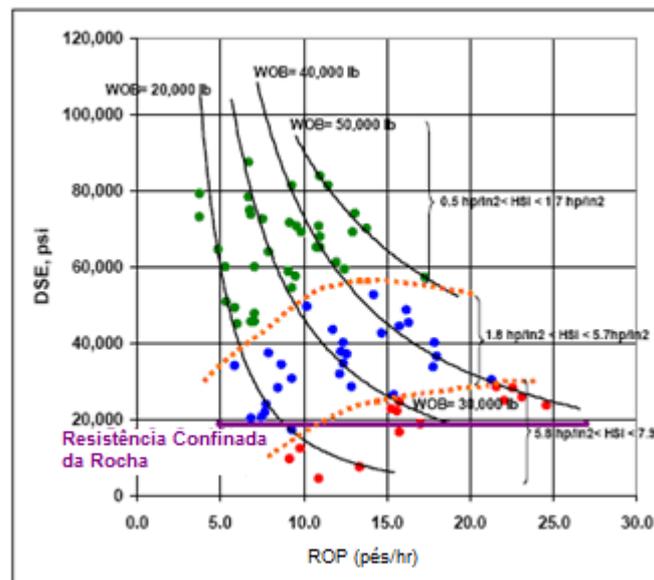


Figura 19 - DSE versus CCS (Modificado de Armenta, 2008).

As curvas apresentadas na Figura 19 representam ensaios executados com mesmos valores de peso sobre a broca. Observa-se que, conforme aumenta o HSI

(que é numericamente igual à potência hidráulica da broca dividida pela área da face da broca), todas as curvas tendem ao valor da resistência à compressão confinada. A Figura 20 apresenta uma correlação entre a energia específica (SE) e a CCS para os mesmos dados experimentais da Figura 19.

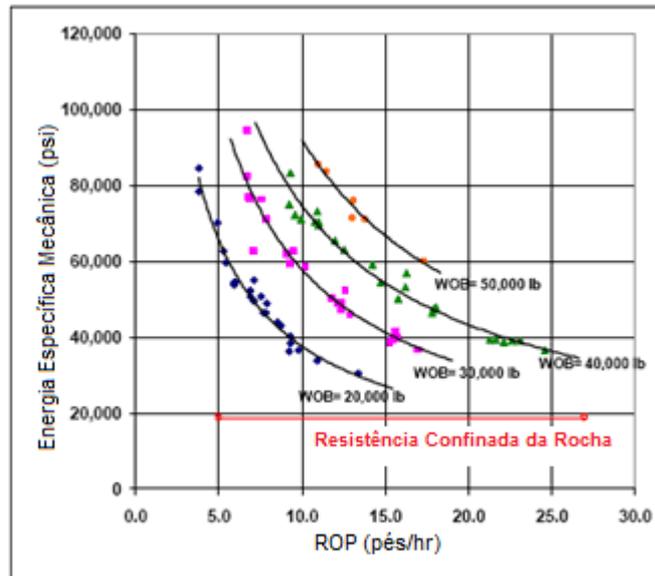


Figura 20 - SE versus CCS (Modificado de Armenta, 2008).

Comparando-se as Figura 19 e Figura 20, percebe-se que a primeira obteve correlações mais próximas de valores com a resistência à compressão confinada.

Armenta (2008) também aplicou seu modelo em uma perfuração em rocha submetida a pressões confinantes. O poço estudado foi perfurado com fluido base-óleo em camada de folhelho. Os dados obtidos da perfuração deste poço foram utilizados para calcular a DSE e tentar compreender quais os problemas ocorridos ao longo do processo. Uma broca foi utilizada para perfurar entre as profundidades de 2200 pés até 5300 pés, a partir de onde foi substituída por outra com características semelhantes. A Figura 21 ilustra os parâmetros de perfuração deste poço e a Figura 22 apresenta o cálculo da energia específica de perfuração.

Analisando-se a Figura 21 e a Figura 22, percebe-se que o valor da energia específica de perfuração diminuiu na profundidade em que foi utilizada a segunda broca para perfurar o poço. Esta queda da DSE é acompanhada por um aumento na taxa de perfuração. O autor acredita que o fato de a segunda broca iniciar a perfuração com uma taxa de penetração em torno de 4 vezes maior que a taxa de

penetração final da primeira broca deva-se ao encerramento desta, já que a broca não apresentava sinais de desgaste.

Segundo Armenta (2008), seu modelo analítico de otimização auxilia a identificação de problemas ocorridos em perfurações de poços já executadas, possibilitando correções de parâmetros e de projeto para futuras perfurações.

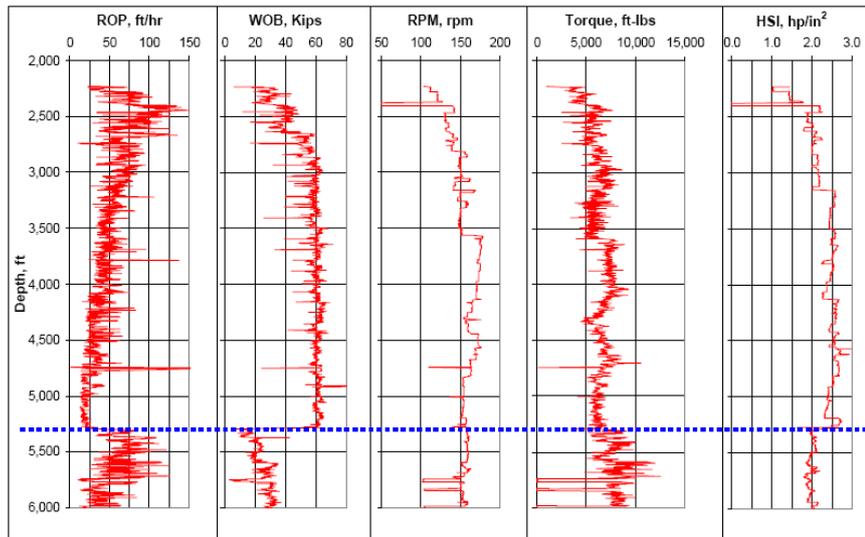


Figura 21 - Parâmetros de perfuração para o poço estudado (Armenta, 2008).

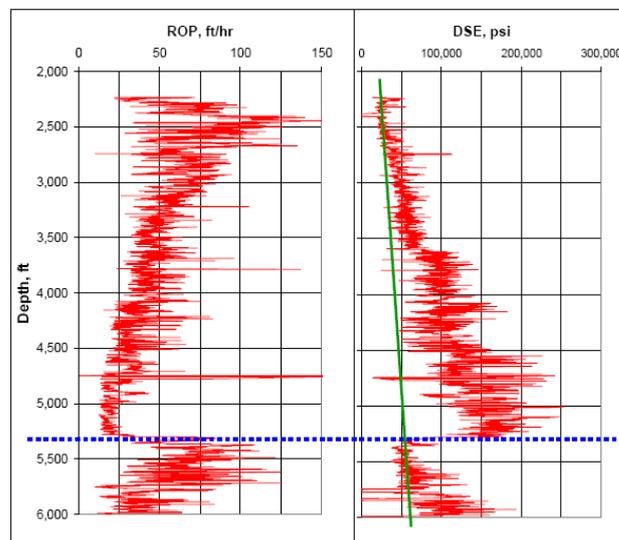


Figura 22 - Cálculo da DSE para o poço estudado (Armenta, 2008).

O autor também sugere que a energia específica de perfuração possa ser comparada com a resistência à compressão confinada da rocha, apresentando uma eficiência maior do que quando se utiliza a energia específica mecânica de Teale

(1965). Isto indicaria que a componente hidráulica possa ter uma parcela de influência durante o processo de remoção dos cascalhos do fundo do poço. Portanto, segundo Armenta (2008), as componentes mecânicas e hidráulicas de energia deveriam ser aumentadas juntas para que se possa aumentar a taxa de penetração eficientemente.

Os Capítulos 3 e 4 apresentam um estudo de caso onde este modelo de análise será aplicado a dados experimentais de campo e de laboratório para testar seu funcionamento.