

2

Revisão Bibliográfica

2.1

Perfuração de Poços

A técnica de perfuração de poços já era utilizada desde o período de 1120 a 250 a.C. na China, onde a extração de água, sal e gás ocorria através do sistema de percussão em que a fonte de energia era a propulsão humana. Com o passar do tempo, o sistema foi desenvolvido e somente em 1829 que a força humana foi substituída por uma fonte de energia a vapor que, posteriormente, evoluiu para o motor de combustão interna. Este último vem sendo aplicado até os dias de hoje na indústria de construção civil e para extração mineral, sendo conhecido como perfuração a cabo (RIBEIRO, 2000).

O primeiro sistema de perfuração rotativo surgiu na França, em 1863, mas somente em 1920 que foi desenvolvido nos EUA o sistema rotativo com circulação de fluido utilizando como fonte de energia os motores de combustão interna (RIBEIRO, 2000).

O método de perfuração mais utilizado na indústria de petróleo é a perfuração rotativa realizada através de uma sonda, conforme ilustrado na figura 1. Nesta operação as formações rochosas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração, a qual é composta basicamente por comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas).

Os fragmentos da rocha gerados durante a perfuração são conhecidos como cascalhos e sua remoção é realizada de forma contínua através de um fluido de perfuração (ou lama) injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*. O mesmo retorna para a superfície através do espaço anular formado entre a coluna e as paredes do poço, do revestimento e do riser (caso este esteja sendo utilizado).

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é

descida no poço, sendo o espaço anular entre o revestimento e a parede do poço cimentado, com o objetivo de isolar as formações atravessadas e permitir o avanço da perfuração com segurança.

Após concluída a operação de cimentação, a coluna de perfuração é descida novamente no poço, tendo em sua extremidade uma nova broca de diâmetro inferior ao diâmetro interno do revestimento para prosseguir com a perfuração. Este processo se repete por diversas vezes, caracterizando as fases do poço de acordo com os diferentes diâmetros das brocas (THOMAS, 2001).

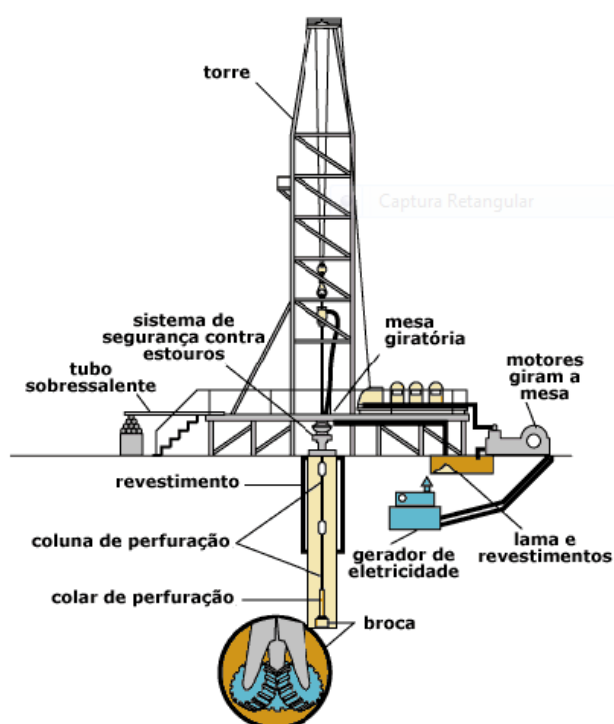


Figura 1: Esquema de uma sonda de perfuração rotativa

Fonte: www.howstuffworks.com (2001)

2.2

Perfuração Direcional

Poços verticais são considerados apenas na teoria, pois na realidade todos os poços verticais perfurados tendem a sofrer desvios naturais que, quando quantificados, caso sua inclinação ultrapasse 5°, algumas ações corretivas devem ser adotadas a fim de reduzi-la. Poços verticais quando se desviam muito do

planejado são conhecidos como poços tortuosos e podem trazer problemas de mapeamento de subsuperfície e também atingir a profundidade final em uma locação afastada do objetivo desejado (ROCHA *et al.*, 2008)

Inúmeras são as causas que geram poços tortuosos e estas mudanças em suas trajetórias podem trazer severos problemas à operação de perfuração, tais como (THOMAS, 2001):

- Desgaste por fadiga dos tubos de perfuração: as tensões cíclicas geradas pela rotação da coluna, em trechos de desvio excessivo, podem causar fadiga;
- Formação de chavetas: devido às ações de compressão e rotação do tubo de perfuração na parede do poço, sulcos podem ser formados nos trechos de desvio e durante a retirada da coluna de perfuração os comandos tendem a ficar retidos nestes, causando a prisão da coluna;
- Dificuldade na descida de colunas de revestimento.

Os Poços direcionais são definidos como poços perfurados onde os objetivos a serem atingidos, determinados pela geologia, estão localizados em coordenadas diferentes da cabeça do poço, ou seja, de sua locação na superfície. Este desvio intencional é obtido a partir da técnica de perfuração direcional.

A perfuração direcional tem sido utilizada em grande escala na indústria do petróleo devido à existência de áreas com muitas falhas geológicas que acabam provocando um grande distanciamento entre os objetivos e a locação na superfície, além da existência de situações que devido à acentuada inclinação dos sedimentos o controle da verticalidade se faz necessário. No entanto, este controle se torna muito difícil e oneroso para o custo final do poço sendo, neste caso, uma boa solução o deslocamento da sonda para uma locação onde seja possível atingir o objetivo desejado através de desvios na trajetória do poço (ROCHA *et al.*, 2008).

Os poços direcionais, segundo Rocha *et al.* (2008), são perfurados com diversas aplicações dentre as quais podemos citar:

- Atingir alvos de difícil acesso como, por exemplo, alvo marítimo com a sonda localizada em terra, zonas urbanas, montanhosas e áreas inóspitas;

- Realizar um *sidetrack*, ou seja, um desvio para a perfuração de um novo poço a partir de um poço já perfurado. Como exemplo, tem-se: a re-perfuração de poços perdidos e o aproveitamento de um trecho do poço original no caso de não se atingir o alvo na primeira perfuração.
- Explorar áreas em que com a perfuração de um poço vertical não foi possível encontrar as formações desejadas e aproveita-se o mesmo já perfurado para fazer um *sidetrack* e atingir o objetivo baseado em novas interpretações dos dados sísmicos correlacionados com dados de perfil elétrico e amostras de calha;
- Perfurar a partir de uma plataforma única para o desenvolvimento de campos de petróleo (perfuração em *cluster*);
- Explorar novas reservas, ou seja, perfuração de poços exploratórios ou para delimitação do reservatório ou investigação dos reservatórios adjacentes;
- Perfurar em áreas urbanas e de proteção ambiental;
- Perfurar em zonas fraturadas e áreas de domos salinos com o objetivo de conectar as fraturas e aumentar a produtividade do campo;
- Controlar *Blowout*, ou seja, perfurar um poço direcional de alívio com o objetivo de atingir o poço que está fluindo descontroladamente;
- Perfurar poços multilaterais e horizontais, isto é, os multilaterais são “ramos” perfurados a partir de um mesmo poço chamado de origem ou poço-mãe. Já os poços horizontais são os que atingem ângulos próximos de 90° possibilitando a exposição de grandes trechos dos reservatórios e o aumento da produção de óleo;
- Perfurar poço piloto, ou seja, poço vertical perfurado até a zona produtora com o intuito de verificar o topo do reservatório, os contatos óleo/água e gás/óleo, a estratigrafia do reservatório ou as camadas de melhor permeabilidade. Este é perfurado antes da construção do poço horizontal que será um desvio a partir dele.

Nos dias de hoje o poço horizontal, um tipo particular de poço direcional, está em evidência, pois proporciona um aumento na produtividade e na recuperação final de hidrocarbonetos em função de ter um trecho perfurado

horizontalmente dentro da formação produtora com o objetivo de aumentar a área de drenagem no reservatório.

Vale ressaltar que um poço para ser considerado horizontal não precisa que sua inclinação alcance, necessariamente, 90°. Dentre as principais aplicações para este tipo de poço, pode-se citar: exploração de reservatórios de fina espessura, prevenção de problemas como a formação de cone de água/gás e extensão dos poços por meio de orifícios múltiplos de drenagem.

Especialistas têm concordado que os poços horizontais tornaram-se o método preferido de recuperação de óleo e gás dos reservatórios, pois oferecem maior área de contato com a camada produtiva do que os poços verticais. O custo de um poço horizontal pode chegar a ser duas ou três vezes maior que o do poço vertical, no entanto, seu fator de produção pode ser aumentado em até 15 ou 20 vezes, tornando-o mais atraente (*horizontaldrilling.org*).

Este planejamento deve ser suportado por simulações prévias de torque, arraste e hidráulica a fim de indicar a possibilidade ou não de perfurar um poço sem encontrar maiores problemas, ou seja, permitindo manobrar, girar e desviar uma coluna de perfuração, além de assentar uma coluna de revestimento quando necessário.

2.3

Acompanhamento da perfuração em tempo real

2.3.1

Centros de Suporte à Decisão (CSD)

O centro de suporte à decisão é um centro de suporte às operações em tempo real capaz de unir em um único ambiente uma equipe multidisciplinar e recursos (*softwares/ hardwares*) de alta tecnologia que o tornam um centro de decisões auto-colaborativo e de fácil comunicação entre todos os envolvidos na operação (Landmark).

Esta equipe multidisciplinar é responsável pelo planejamento e otimização da perfuração, além da resolução de alguns problemas operacionais que possam vir a ocorrer. É composta por funcionários da operadora e das companhias de

serviço envolvidas na operação, tais como: engenheiros de perfuração, geólogos, petrofísicos, químicos, consultores técnicos, técnicos de informática, entre outros.

Centros de suporte a decisão assumem as responsabilidades de algumas funções críticas e rotineiras, tradicionalmente realizadas nas sondas. Com isto, a equipe que trabalha em um CSD consegue estar virtualmente presente em múltiplas sondas em operação, permitindo uma melhor colaboração entre os profissionais de ambos os lugares (terra e mar) e, desta maneira, tornando possível detectar e agir, em tempo real, nas práticas de perfuração inseguras e ineficazes (Oort *et al.*, 2005).

Para Oort *et al.* (2005) o termo tempo real significa que dados estão sendo avaliados e decisões sendo tomadas concomitantemente com a realização de determinada operação na sonda, permitindo o CSD interagir com a equipe presente na mesma e com as atividades de perfuração em andamento.

Como principais objetivos de um CSD, segundo Vogel *et al.* (2010), pode-se citar:

- Otimizar o uso dos dados obtidos pelos sensores de superfície e de fundo de poço;
- Fazer correlações com modelos geológicos;
- Fazer correlações com as profundidades e refinar os dados recebidos;
- Atualizar os dados recebidos nos aplicativos utilizados para as modelagens de torque & arraste, hidráulica, entre outras, e comparar com os dados previstos;
- Promover maior agilidade e embasamento nas tomadas de decisão;
- Melhorar a eficiência na perfuração de poços;
- Reduzir o tempo não-produtivo e os custos associados.

As atividades desenvolvidas no CSD seguem a filosofia da melhoria contínua através do Ciclo PDCA e se subdividem nas seguintes etapas:

- Planejamento (*Plan*)

Nesta etapa são coletadas todas as informações relevantes do poço (dados de correlação e dados do programa de poço) e são realizadas as análises de planejamento utilizando aplicativos de engenharia para a modelagem de torque & arraste, hidráulica, *surge* & *swab*, descida de revestimento, entre outras.

- Acompanhamento (*Do*)

Nesta etapa ocorre o monitoramento em tempo real da operação de perfuração do poço, por uma equipe multidisciplinar tecnicamente capacitada, focada em analisar as tendências dos parâmetros provenientes de sensores de superfície e de fundo de poço, comparando as tendências reais com os modelos de previsão.

- Controle (*Check*)

Depois de realizada a comparação do planejado com o realizado, lições aprendidas são obtidas servindo como base para o planejamento dos próximos poços que forem perfurados na mesma área e com características similares.

- Lições Aprendidas (*Act*)

Nesta etapa colocam-se em prática as lições aprendidas durante a perfuração de um poço.

2.3.2

Fluxo da Informação e Confiabilidade dos Dados

O processo do fluxo da informação se inicia na sonda onde os dados são gerados através dos sensores de *mudlogging* e da ferramenta de PWD. A sonda deve ser equipada com sensores, sistemas de aquisição e visualização de dados e sistemas de comunicação para permitir a exportação dos mesmos.

Estes dados podem ser enviados via satélite ou diretamente pela torre de transmissão ao servidor localizado em terra (no escritório) e, por fim, são disponibilizados nos computadores do CSD. Este é estruturado para recebê-los em tempo real, 24h por dia, e deve ter sistemas automatizados e de alta tecnologia para a captura dos dados de maneira rápida, deixando-os aptos a serem usados. Este fluxo da informação está detalhado na figura 2.

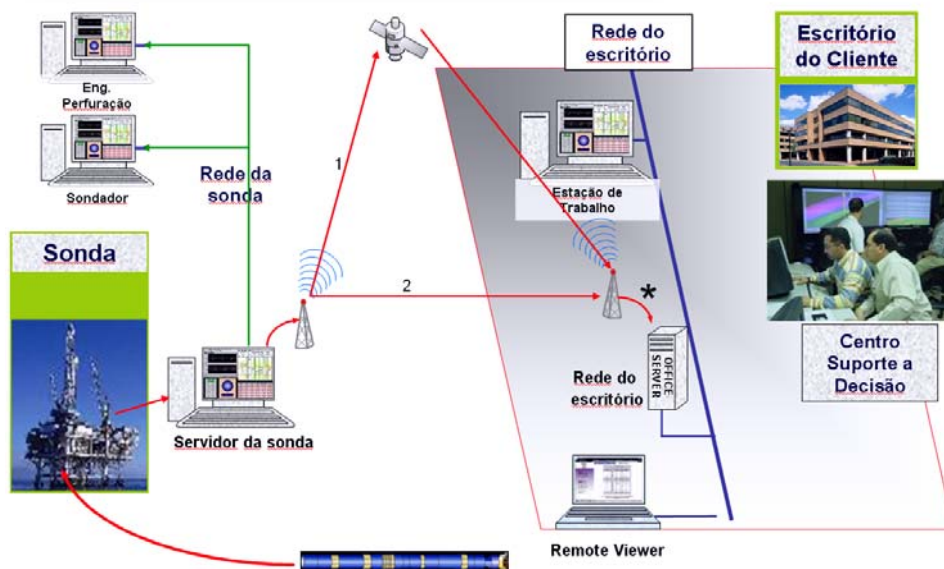


Figura 2: Esquema do fluxo da informação em tempo real

Fonte: Landmark

Na indústria de petróleo existem diversos casos que exemplificam os benefícios gerados pelo acompanhamento das operações em tempo real. Benefícios estes, tais como: aumento do volume de produção, melhor taxa de retorno do investimento, tomadas de decisão com mais precisão e qualidade, melhorias à saúde, meio ambiente e segurança e redução dos gastos operacionais.

No entanto, para Mochizuki *et al.* (2006) as tecnologias relacionadas ao acompanhamento das operações em tempo real podem ajudar no alcance dos objetivos desejados, mas isto não é possível sem algumas mudanças na forma que as pessoas trabalham relacionando-se umas com as outras e no fluxo de trabalho. Logo, os três fatores críticos que estão relacionados aos projetos de acompanhamento em tempo real são:

- Pessoas: se manifestam através da cultura corporativa, da estrutura organizacional e do treinamento obtido;
- Processo de trabalho: mostra como o trabalho é realizado;
- Tecnologia: permite o acompanhamento em tempo real.

Em seu trabalho técnico apresentado no SPE (*Society of Petroleum Engineers*) em 2006, Mochizuki *et al.* classificou em categorias as tecnologias associadas ao acompanhamento em tempo real das operações, apresentou as lições

aprendidas de casos históricos e os valores percebidos pela empresa em cada projeto. Por fim, concluiu que a medida de sucesso mais importante para os projetos relacionados ao acompanhamento em tempo real é o valor agregado gerado à empresa, ou seja, um sucesso técnico não necessariamente significa sucesso econômico.

Tomadas de decisões de extrema relevância para a operação são baseadas em informações confiáveis resultantes de dados de qualidade e análises precisas realizadas com aplicativos de engenharia. A habilidade na utilização destas informações em tempo real promove uma melhor segurança, a otimização da operação de perfuração e a mitigação dos riscos. A confiança nos dados obtidos faz com que o tempo de resposta e a incerteza diminuam. Portanto, segundo Vogel *et al.* (2010) os fatores que levam a decisões eficientes são:

- Boa qualidade dos dados em tempo real;
- Confiança na informação utilizada;
- Resultados quantificáveis;
- Comunicações simplificadas.

Estes fatores fazem parte das técnicas de gerenciamento de dados e transferência da informação apresentadas por Vogel *et al.* (2010), que permitem aumentar a eficiência da perfuração em tempo real e, assim, reduzir os custos.

2.4

Benefícios do Monitoramento de Torque e Arraste

O monitoramento do efeito do torque e do arraste em tempo real tem sido realizado já há algum tempo na indústria do petróleo e pode ser bastante vantajoso. Este processo automático permite monitorar mudanças nas tendências de torque e do arraste para cada seção da coluna de perfuração durante as diversas operações: perfuração, manobra e repasse (KUCS *et al.*, 2008).

Este monitoramento permite avaliar as atuais condições de fundo de poço (através do valor medido de torque) e identificar qualquer aumento ou redução na fricção da coluna de perfuração (através do valor medido de peso no gancho), fazendo com que o sondador possa trabalhar de maneira controlada próximo aos limites de capacidade de carregamento do tubo e também adotar medidas

instantâneas contra o aumento do torque e do arraste, antes que se atinjam seus valores críticos (VOS *et al.*, 2000).

O difícil, na verdade, é definir o que é um valor normal destes parâmetros e, por isso, a importância em se analisar a tendência dos mesmos comparando-os com os dados calculados (gerados em um aplicativo de engenharia). Para tal deve-se considerar um intervalo de fator de fricção e não apenas um valor específico.

Segundo Vos *et al.* (2000), os parâmetros necessários para o cálculo de torque & arraste são:

- Dados de *survey*;
- Detalhes do BHA e do tubo de perfuração (diâmetro interno e externo, peso, comprimento, tipo de conexão, limite de escoamento e de ruptura, entre outros);
- Densidade do fluido de perfuração;
- Dados da sonda de perfuração (peso da catarina, entre outros);
- Diâmetro do poço (referente à fase analisada);
- Dados dos sensores (profundidade da broca, peso no gancho, torque na superfície, peso sobre a broca, torque na broca, rotação da coluna de perfuração, entre outros).

Bret *et al.* (1989) apresentou, a partir de estudos de casos, exemplos de como o modelo de torque e arraste é capaz de melhorar a operação em todas as etapas do ciclo de engenharia de perfuração: planejamento, implementação e pós-análise. No planejamento de um poço este modelo pode ser usado para avaliar a viabilidade de diferentes trajetórias e determinar as especificações da sonda. Na etapa de implementação, os dados coletados durante a perfuração podem ser comparados aos resultados obtidos na modelagem de torque e arraste e, desta maneira, ajudar na detecção e prevenção de problemas relacionados a um desvio na tendência de seus valores, tais como: formação de chavetas, limpeza de poço ineficiente, instabilidade das paredes do poço, prisão por diferencial e desgaste do revestimento. Já na etapa de pós-análise é possível explicar o porquê do poço não ter atingido o objetivo.

O uso da análise de torque e arraste em poços de longo alcance permite identificar áreas problemáticas com relação à trajetória de poços direcionais. Em

função disso, Rae, Lesso e Sapijanskas (2005) estudaram poços perfurados no Mar do Norte e mostraram a importância da análise de torque e arraste em cenários como este, assim como, os riscos associados.

A formação de leito de cascalho no espaço anular é um dos maiores problemas durante a perfuração de poços direcionais e horizontais. O efeito do leito de cascalho sobre a coluna de perfuração acarreta um aumento da fricção podendo levar a mesma a ficar presa e também a perda do poço. No entanto, com o acompanhamento em tempo real dos valores de peso no gancho, medido para cada seção perfurada, pode-se detectar este problema a tempo de evitá-lo (KUCS *et al.*, 2008).

Outro problema que pode ser previamente detectado, através do monitoramento do torque e do arraste, é a prisão da coluna de perfuração por diferencial de pressão através do aumento da fricção entre a coluna e as paredes do poço. Devido à diferença de pressão entre a parede do poço e a formação, a força normal da coluna contra a parede do poço aumenta. Portanto, a melhor maneira de evitar a prisão é monitorar em tempo real o peso da coluna fora das cunhas.

Vos *et al.* (2000) apresentou que a combinação do monitoramento do torque e do arraste juntamente com o ECD mostra correlações claras e fornece informações extras sobre as condições de limpeza do poço, além de otimizar as operações de repasse, permitindo que elas sejam realizadas somente quando necessário e de maneira correta a fim de economizar tempo de sonda. Com os resultados obtidos, a partir de estudos de casos de poços perfurados utilizando a ferramenta de PWD e o monitoramento em tempo real, foi possível verificar as seguintes situações:

- Uma melhor avaliação da limpeza do poço e da formação de leito de cascalhos através do acompanhamento dos valores de ECD e fator de fricção;
- Como o efeito da manobra curta, do lubrificante e da mudança no peso de fluido de perfuração influencia os fatores de fricção;
- O nível de influência que o tipo de fluido de perfuração e seus aditivos têm nos valores de torque e arraste.

Além dos problemas ocorridos durante a perfuração de poços, outros podem ocorrer também durante a manobra da coluna de perfuração. O monitoramento do torque e do arraste durante a manobra é capaz de fornecer importantes informações sobre a estabilidade do poço a fim de identificar as zonas problemáticas. Pode-se citar, segundo KUCS *et al.* (2008), as seguintes situações críticas que podem ocorrer e ser detectadas durante as operações de manobra:

- Formação de batentes, ou seja, durante a descida da coluna de perfuração se for detectada uma redução do peso no gancho, deixando-o menor do que o valor normal esperado significa que está passando por uma zona com presença de batentes;
- Presença de chavetas, isto é, se durante a manobra de retirada da coluna de perfuração do poço as zonas de risco de formação de chavetas forem conhecidas e se houver um aumento no valor do peso no gancho na passagem dos componentes do BHA que apresentam um elevado risco de ficarem presos, significa que chavetas foram formadas nesta zona;
- Zonas de poço estreito, ou seja, durante a manobra, tanto de retirada quanto de descida da coluna de perfuração, pode-se observar na passagem pela mesma formação, respectivamente, aumento e redução no valor de peso no gancho divergindo do normal.

2.5

Benefícios do Monitoramento de Hidráulica

A perfuração de poços de alta inclinação tem como um dos fatores mais críticos a limpeza do poço, uma vez que, os sólidos têm uma tendência natural devido à gravidade de se depositarem na parte inferior do espaço anular, deixando o estado em suspensão e formando um leito (COSTA, 2006).

Os fatores que afetam a limpeza do poço durante a operação de perfuração em poços direcionais, horizontais ou de longo alcance são muitos e análises de sensibilidade foram realizadas ao longo dos anos por diversos pesquisadores, a fim de se determinar quais os fatores de maior influência na limpeza do poço. Dentre os pesquisadores podemos citar Jefferson e Zamorra (1995), Azar e Sanchez (1997), Li e Walker (1999) e Kelessidis e Mpandelis (2003), segundo os quais, os fatores mais relevantes são:

- Velocidade do fluido no anular

Este fator domina o processo de transporte de cascalhos no espaço anular e espera-se que com um aumento da vazão ocorra uma melhoria na remoção dos sólidos. No entanto, este aumento na vazão está limitado à potência do equipamento hidráulico (bombas de lama), a máxima densidade equivalente de circulação (ECD) permitida e a facilidade de erosão da seção de poço aberto.

- Rotação da coluna de perfuração

A rotação da coluna de perfuração afeta a taxa de remoção dos cascalhos no espaço anular e acredita-se que este efeito é um dos que mais contribui para a limpeza do poço. Esta taxa de remoção depende da reologia do fluido de perfuração, do tamanho dos cascalhos, da vazão e do comportamento dinâmico da coluna.

Em contrapartida, existem certas limitações que são impostas ao poço, ou seja, a rotação da coluna de perfuração induz a tensões cíclicas que podem acelerar a ruptura do tubo de perfuração devido à fadiga, causando excessivos desgastes no revestimento e até a destruição mecânica da parede do poço aberto. Além disso, em poços estreitos, elevadas rotações na coluna de perfuração podem gerar um aumento da perda de carga devido ao atrito no anular e, conseqüentemente, um aumento no valor do ECD;

- Propriedades do fluido de perfuração

A escolha do fluido de perfuração é de extrema importância e o mesmo tem como principais propriedades que influenciam a limpeza do poço a densidade e a viscosidade.

A densidade tem como principal função estabilizar o poço mecanicamente e prevenir a entrada de fluido da formação para dentro do mesmo. O aumento desta implica em uma maior força de empuxo e uma melhora no transporte de sólidos, porém esta não é a solução ideal para melhorar a capacidade de carregamento dos sólidos, uma vez que, este aumento pode provocar problemas indesejáveis, tais como:

- Indução à fratura das formações, com conseqüente perda de fluido;
- Aumento da possibilidade de prisão de coluna de perfuração por diferencial de pressão;
- Redução na taxa de penetração da broca durante a perfuração;

- Aumento do valor de ESD/ ECD.

Outro aspecto importante é sua influência na velocidade de sedimentação da partícula, ou seja, um aumento na densidade provoca uma redução na velocidade de queda da partícula, como pode ser visto na figura 3.

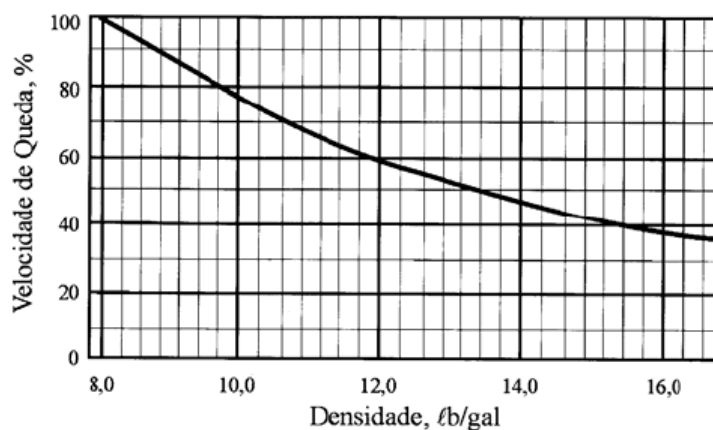


Figura 3: Gráfico da variação de velocidade de quedas das partículas em função da densidade

Fonte: MACHADO (2002)

A viscosidade tem como principal função permitir a suspensão de materiais (cascalhos) no fluido de perfuração e da fração sólida do fluido.

Logo, de acordo com abordado anteriormente, um fluido de perfuração deve possuir alta viscosidade para baixas taxas de cisalhamento a fim de gerar uma melhor limpeza do poço e baixa viscosidade para altas taxas de cisalhamento para gerar uma melhor suspensão dos sólidos.

- Tamanho e forma das partículas

O tamanho, a forma e a densidade relativa dos cascalhos afetam o comportamento dinâmico em um meio fluido, sendo as duas primeiras resultado do tipo de broca utilizada na perfuração, não sendo possível seu controle e, a última, cujo valor médio adotado como conhecido é de 2,6 para a maioria das rochas.

- Excentricidade da coluna de perfuração

A eficiência na remoção das partículas do espaço anular sofre grande influência da posição da coluna de perfuração dentro do poço, principalmente, em uma seção inclinada. A excentricidade da coluna de perfuração é

governada pela trajetória do poço e pelo comportamento dinâmico da mesma, uma vez que, devido ao efeito da gravidade a coluna tende a se posicionar na parede inferior do poço. Os poços podem ser classificados em três tipos de acordo com a excentricidade, ou seja, com a centralização da coluna de perfuração dentro do poço (figura 4):

- Concêntrico: a coluna está centralizada;
- Parcialmente excêntrico: a coluna está deslocada do centro parcialmente;
- Totalmente excêntrico: a coluna está totalmente deslocada chegando a se apoiar na parede inferior do poço.

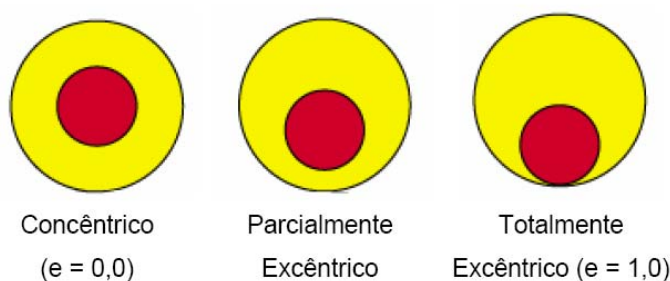


Figura 4: Tipos de excentricidade da coluna de perfuração

Fonte: Costa (2004)

A pior posição que uma coluna de perfuração pode assumir é a de totalmente excêntrico ($e=1$), pois no caso de poços inclinados baixas velocidades de fluxo do fluido são geradas no espaço anular abaixo da mesma, justamente no local onde estão concentrados a maior parte dos cascalhos. Já no espaço anular acima da mesma são geradas altas velocidades de fluxo do fluido (figura 5)

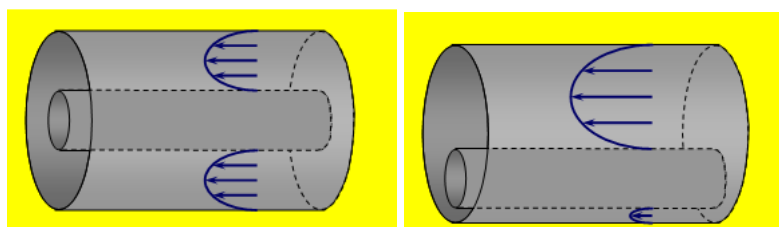


Figura 5: Velocidades de fluxo do fluido de perfuração no anular

- Taxa de penetração

Um aumento neste fator gera um aumento na concentração de sólidos no espaço anular. Para se manter uma limpeza aceitável e eficaz, outras variáveis

como a vazão e a velocidade de rotação da coluna de perfuração devem ser controladas, pois caso o limite destas seja alcançado, uma redução na taxa de penetração é indicada apesar de causar um impacto negativo no custo do poço.

Logo, os efeitos gerados na limpeza do poço devido a mudanças nos fatores mencionados acima podem ser claramente observados nos resultados obtidos a partir dos estudos de casos apresentados no trabalho técnico de Costa *et al.* (2004), ou seja:

- Quanto maior a vazão e a velocidade de rotação da coluna de perfuração, menor será a altura do leito formado;
- Quanto mais denso o fluido de perfuração melhor é a taxa de remoção dos cascalhos e menor a altura do leito formado;
- Quanto maior for o tamanho das partículas mais difícil será a sua remoção aumentando a tendência de formação de leito. Um aumento na taxa de penetração provoca uma maior concentração de sólidos, podendo aumentar a altura do leito, uma vez que mais cascalhos estão sendo gerados no espaço anular.

Okrajni e Azar (1986) apresentaram um importante estudo sobre transporte de cascalhos em poços direcionais, onde investigaram o efeito da reologia do fluido na limpeza de poços. O trabalho estabeleceu que o mecanismo de transporte de cascalhos e o comportamento do fluxo em poços altamente inclinados são totalmente diferentes do comportamento dos poços verticais. Foi observado que uma alta viscosidade do fluido, o que melhora a remoção de cascalhos em poços verticais, pode ser prejudicial em poços altamente inclinados (considerando a não existência de rotação da coluna de perfuração), onde a baixa viscosidade pode promover um aumento da turbulência do fluido, particularmente útil para ajudar na limpeza de poços horizontais. Com base nesses resultados e em estudos prévios, os autores concluíram que a limpeza de poços é dependente do ângulo da inclinação do poço, de propriedades reológicas do fluido, da excentricidade da coluna de perfuração e da taxa de penetração.

Sifferman e Becker (1992) conduziram uma série de experimentos de limpeza de poço e avaliaram o efeito de diversos parâmetros no transporte de cascalhos. Por fim concluíram que o efeito da rotação da coluna no transporte dos cascalhos depende também do tamanho dos mesmos e da reologia do fluido e que

o mesmo é mais pronunciado em situações com partículas menores e com fluidos mais viscosos.

Bassal (1995) realizou um estudo do efeito da rotação da coluna no transporte de cascalhos em poços inclinados. Os resultados mostraram que a rotação da coluna de perfuração possui um efeito significativo na limpeza de poços direcionais e que a melhoria obtida na remoção de partículas como resultado da velocidade de rotação da coluna de perfuração é função da combinação da reologia e vazão do fluido de perfuração, do tamanho das partículas, da inclinação dos poços e da maneira em que a coluna de perfuração se comporta dinamicamente. Geralmente, partículas pequenas são mais difíceis de transportar, mas a alta velocidade de rotação da coluna de perfuração e a alta viscosidade do fluido facilitam esse transporte. Bassal concluiu ainda que, uma baixa viscosidade do fluido possui um melhor efeito carreador em relação à alta viscosidade, sem rotação da coluna de perfuração.

Masuda *et al.* (2000) realizou experimentos a fim de analisar o comportamento dos cascalhos em fluidos com ambos os regimes, transiente e permanente. Um modelo numérico foi desenvolvido que permitia a interação entre os cascalhos formados e o fluido de perfuração sendo possível determinar sua pressão, velocidade do fluido e das partículas, além da concentração de ambos (cascalho e fluido) no anular em diferentes períodos. A maioria dos poços estudados eram inclinados e os resultados mostraram que os valores previstos de ECD, através do modelo numérico, eram próximos aos reais medidos na ferramenta de PWD.

O monitoramento em tempo real da hidráulica de perfuração é realizado através das análises, principalmente, de fatores como a vazão e a pressão. Além disso, os valores de torque, arraste e estabilidade de poço também colaboram para esta análise. Problemas como *washout* no tubo de perfuração, acúmulo de cascalhos, prisão da coluna de perfuração e instabilidade das paredes do poço são constantemente encontrados e estão relacionados à hidráulica. Estes resultam em tempo perdido a operação.

Um detalhado acompanhamento hidráulico da perfuração é essencial para se obter êxito no processo de perfuração de um poço, além de sua automação, pois faz com que os erros humanos sejam removidos do processo de obtenção e interpretação de dados (ZOELLNER *et al.*, 2011).

Poços perfurados em águas profundas, de alta temperatura e pressão, de longo alcance ou com janela operacional estreita (formada pela pressão de poros e fratura) merecem especial atenção durante o acompanhamento em tempo real de sua perfuração, em relação ao conhecimento da hidráulica no fundo de poço e ao gerenciamento da densidade equivalente de circulação (ECD), fazendo com que seja possível realizar uma operação de forma econômica, segura e eficaz. Este gerenciamento é atingido através do balanço de inúmeros parâmetros durante a perfuração, isto é, a densidade do fluido de perfuração é necessária para o controle da pressão e da estabilidade do poço, a viscosidade e a vazão são necessárias para o controle da limpeza do poço e o efeito de gelificação é necessário para manter os cascalhos em suspensão (Oort *et al.*, 2005).

O aumento do número de centros de suporte a decisão e a utilização da ferramenta de PWD foram dois fatores contribuintes para um melhor monitoramento do ECD, tornando possível uma maior interação entre a equipe em terra e da sonda. No entanto, esta ferramenta possui algumas limitações com relação ao seu uso, isto é, poços com orçamento limitado, seções do poço de alta temperatura e indisponibilidade dos dados em operações críticas como, por exemplo, a conexão (medidas de *surge* e *swab* só podem ser obtidas após o término da conexão quando a circulação for restabelecida, permitindo a transmissão dos dados do PWD para a superfície).

Para complementar as medidas do PWD quando o mesmo estiver sendo utilizado ou suprir a ausência de seus dados em situações de sua não utilização e impossibilidade de transmissão dos dados foi desenvolvido por Zamora *et al.* (2000) um sistema chamado WCS (*Wellsite Computer System*) para modelagem da hidráulica no fundo de poço, através de dados de perfuração na superfície obtidos em tempo real. Este calcula os valores do ECD e ESD na profundidade da sapata do último revestimento e no fundo do poço, além da eficácia de sua limpeza e a temperatura de fundo do poço. Diversos poços foram estudados e os resultados obtidos dos valores de ECD se apresentaram dentro de uma margem de 0,1 ppg em relação aos medidos pelo PWD, o que demonstra a possibilidade de na ausência da ferramenta de PWD obter resultados próximos e confiáveis dos medidos, a partir do uso deste sistema em um CSD.

Posteriormente, este sistema foi melhorado, tendo sido criado um sistema de acompanhamento em tempo real (RTHS) cujos estudos de casos e resultados

foram descritos por Oort *et al.* (2005). O RTHS utiliza como dados de entrada as informações da sonda medidas na superfície, provenientes dos sensores de *mudlogging* e do PWD, fornecendo como resultados os valores calculados de ECD e ESD durante as operações de perfuração, manobra e descida do revestimento. Sua modificação está no fato de considerar um modelo transiente para o cálculo de hidráulica e operar em um ambiente em tempo real permitindo uma comunicação remota e a transmissão automática dos dados.

Sabe-se que os principais dados de entrada para a modelagem do ECD são a vazão e a geometria do poço, incluindo a especificação dos componentes da coluna de perfuração, reologia do fluido (dados *fann*) juntamente com a escolha do modelo reológico. Estes modelos, no entanto, assumem que a coluna está centralizada no poço não levando em consideração os movimentos verticais (reciprocagem) e os rotacionais. Já medidas de pressão e temperatura no fundo do poço durante a perfuração permitem adaptar, em tempo real, as propriedades do fluido de perfuração na superfície a fim de obter melhores condições de fundo de poço. Logo, o acompanhamento em tempo real da pressão e da temperatura no fundo do poço fornecem informações importantes relacionadas aos problemas operacionais, tais como (Charlez Total Oil Marine *et al.*, 1998):

- Limpeza do poço e otimização de procedimentos de manobra;
- Detecção de rebocos espessos anormais (pontos de redução do poço);
- Detecção e controle de perda de circulação;
- Otimização da hidráulica na broca;
- Melhor estimativa de *leak-off test* e FIT;
- Melhor controle das propriedades do fluido de perfuração.

Charlez Total Oil Marine *et al.* (1998) discutiu em seu trabalho técnico os efeitos da rotação e da reciprocagem da coluna na obtenção dos valores de ECD e ESD medidos a partir da ferramenta de PWD e os calculados pelo modelo de previsão. Para o entendimento do efeito da rotação na coluna de perfuração Charlez estudou o número adimensional de Taylor que considera tanto a geometria do anular quanto a rotação da coluna. Como resultados obteve que para valores do número de Taylor abaixo do crítico, o cisalhamento induzido pela rotação provoca redução na viscosidade aparente e, conseqüentemente, no ECD.

Em contrapartida, quando o número de Taylor excede este valor crítico a rotação induz uma dissipação adicional e o ECD aumenta.

Esta tendência também é afetada pela vazão, ou seja, para número de Reynolds pequeno (fluxo laminar) o ECD aumenta consideravelmente com a rotação na coluna de perfuração, enquanto para vazões maiores as instabilidades adicionais geradas pela rotação têm efeito menor. Para valores muito elevados do número de Reynolds (fluxo turbulento) o ECD se torna insensível à rotação.

Dentre os dados gerados pela ferramenta de PWD não somente o ECD e o ESD são importantes na análise, como também, os valores da pressão de fundo de poço, uma vez que, podem ajudar a identificar problemas operacionais como perda de fluido para a formação, *pack-off* ou prisão da coluna de perfuração. Além disso, a medida da pressão de bombeio (*standpipe pressure*) pode ser usada para uma melhor estimativa da perda de carga na broca e otimização hidráulica (Charlez *et al.*, 1998).

2.6

Previsão de problemas operacionais baseados nos dados de campo

Os dados da perfuração de um poço, com acompanhamento em tempo real de seus parâmetros, são provenientes de ferramentas de MWD, PWD e sensores de *mudlogging*, através das quais é possível se identificar as razões para os desvios em algumas variáveis importantes durante a perfuração (por exemplo, pressão de fundo e de bombeio, torque, entre outros) e remediar potenciais problemas de poços.

Por muitos anos o MWD foi utilizado para medir pressões de fundo de poço que eram usadas como dados para validar os modelos de hidráulica. No entanto, a tendência de se reduzir os custos da perfuração de poços fez com que uma nova ferramenta fosse utilizada para otimizar a construção do poço, o PWD (WARD *et al.*, 1997).

Dentre os diversos sensores disponíveis, o PWD foi o que teve maior destaque devido sua capacidade de diagnosticar problemas (ARAGÃO *et al.*, 2009).

Em função da necessidade do mercado, um grande esforço tem sido gasto com o intuito de melhorar estes sistemas de acompanhamento, porém poucos são

os recursos disponíveis para a interpretação de seus dados em tempo real. Além disso, este processo de análise de interpretação dos dados provenientes dos sensores de *mudlogging* e PWD é realizado de maneira subjetiva, pois a interpretação depende da experiência do profissional envolvido (GANDELMAN *et al.*, 2010).

Kock observou que o grande desafio neste processo de acompanhamento da operação de perfuração é o processamento dos dados deixando-os úteis para análises.

Alguns esforços preliminares de implantação destes sistemas tanto nas sondas quanto nos centros de suporte a decisão tem mostrado o enorme potencial destes em reduzir os riscos, tempo e custos operacionais (ROMMETVEIT *et al.*, 2010).

Desde o início das operações na indústria de petróleo o sondador possui diversas funções em uma sonda de perfuração. No entanto, suas funções que devem englobar desde a operação mecânica de perfuração até uma supervisão em tempo real só foram enfatizadas quando Havrevold e Hytten (1991) desenvolveram uma das primeiras aplicações relacionadas à análise em tempo real dos dados de perfuração, um sistema chamado AWD (*Analysis While Drilling*). Com este era possível manusear dados de perfuração, realizando análises de pressão no tubo de perfuração e otimização da manobra da coluna de perfuração.

Na mesma época, houve um grande aumento na quantidade dos dados disponibilizados pela ferramenta de MWD e, com isso, ficou reforçada a necessidade de sistemas mais eficazes de manuseio de dados em tempo real. Em 2002, Mallary, Varco e Quinn desenvolveram um sistema aplicado a poços de longo alcance que calculava os valores de ECD comparando-os com os valores obtidos em tempo real através da ferramenta de PWD.

Em paralelo, o sistema EKD (*Early Kick Detection*), elaborado por Swanson *et al.* (1997), era capaz de analisar em tempo real os dados provenientes dos sensores de *mudlogging* e com ajuda de um modelo dinâmico do poço comparar os dados previstos de vazão na saída e pressão de bombeio com os valores reais (medidos). Este foi posteriormente melhorado sendo capaz de identificar em tempo real os parâmetros relacionados à limpeza de poço, previsão do ECD e estimativa da temperatura de fundo do poço.

De 1990 a 1994 Bo, Froitland e Kyllingstad desenvolveram um sistema integrado de perfuração conhecido como IDS (*Drilling Integrated System*) cujo foco era aumentar a segurança, o controle remoto e a automação das máquinas, assim como, otimizar a perfuração. Posteriormente, um módulo que melhorava e corrigia os dados provenientes dos sensores da sonda foi desenvolvido por Kyllingstad *et al.* (1997). Este sistema conhecido como *Drilltronics* era composto por diversos módulos de cálculo de previsão (limpeza de poço, pressão de fundo, manobra, torque e arraste, prevenção de vibração *stick-slip* e otimização das cargas na broca). O primeiro módulo testado foi o de prevenção de vibração *stick-slip* em um poço perfurado na Noruega, para a fase de 8-1/2" com 100m de profundidade e inclinação de 20°. Os resultados foram satisfatórios e mostraram que com o sistema de prevenção da vibração ativado foi observada uma redução no torque de 50% sem aumento significativo na velocidade de rotação e aumento de 15 para 30% na taxa de perfuração.

Milser e Corser (2001) apresentaram um novo sistema capaz de dar assistência aos funcionários da sonda de perfuração durante os eventos de controle de poço através de boas estimativas de parâmetros de *kick*, pressão e volume sendo capaz de identificar perdas de circulação ou influxos. Além disso, este sistema possibilita também otimizar a taxa de penetração recomendando valores de peso sobre a broca e rotação na coluna que gerem um custo mínimo.

O *Drilltronics* foi melhorado e um novo sistema foi apresentado por Iversen *et al.* (2006), capaz de detectar previamente eventos indesejados, melhorar os dados de perfuração e automatizar processos críticos. Um módulo de cálculos em tempo real foi adicionado ao sistema, sendo capaz de monitorar continuamente os dados em tempo real e a cada segundo retornar os dados gerados dos cálculos de estimativa do modelo de torque e arraste e de diagnósticos (análise das tendências e diagnóstico dos desvios inesperados nos dados). Estudos de caso foram realizados baseados em dados históricos de poços do Mar do Norte e os resultados obtidos estão descritos no trabalho técnico apresentado por Iversen e Cayeux *et al.* (2006).

Segundo Gandelman *et al.* (2009), um projeto foi realizado pela Petrobras para o desenvolvimento de um sistema conhecido como PWDa, capaz de interpretar os dados dos sensores de *mudlogging* e PWD e identificar problemas durante a perfuração. Seu objetivo é investigar as razões para os desvios ocorridos

em variáveis medidas importantes (como por exemplo, pressão de bombeio e de fundo de poço, temperaturas, torque e arraste, entre outros) durante a perfuração de poços e, desta maneira, identificar eventos indesejáveis como: influxos, limpeza deficiente, encerramento da broca, desgaste da broca, *washouts* nos tubos de perfuração, instabilidades do poço, entre outros.

Dentre outros aspectos, de acordo ainda com Gandelman *et al.* (2009), a presença de sólidos no anular tem grande influência no valor da pressão no fundo do poço devido à ação dos seguintes mecanismos:

- Transporte de sólidos no anular na seção vertical do poço que transmite pressão hidrostática impactando diretamente a pressão no fundo do poço. Este impacto aumenta com a lâmina d'água devido à baixa velocidade de transporte dos sólidos perfurados pelo anular do riser;
- Formação de leito de cascalho em seções de elevada inclinação ou horizontais pode não transmitir pressão hidrostática, mas vai restringir a área de fluxo aumentando a fricção. A pressão de fundo do poço é expressa, geralmente, em densidade equivalente de circulação (ECD).

A combinação de um aplicativo de monitoramento em tempo real dos parâmetros de perfuração e um modelo de previsão permite calcular o ponto ótimo de variáveis como: peso na broca, pressão na bomba e velocidade de rotação (MANNON, 2001).

Mesmo com a disponibilidade de diversos sistemas capazes de obter e tratar os dados de perfuração de poços em tempo real, a interpretação dos mesmos acaba sendo um processo subjetivo, pois depende da interpretação da equipe envolvida e, por isso, o presente trabalho tem como objetivo mapear e diagnosticar alterações ocorridas nos parâmetros de perfuração devido à ocorrência de problemas operacionais.