

4

Modelo de Hidráulica

Um bom planejamento hidráulico é essencial para a perfuração de poços direcionais, assim como um bom entendimento das limitações e capacidades da sonda de perfuração e das necessidades e restrições hidráulicas dos equipamentos de fundo de poço (broca, BHA).

Dentre os equipamentos da sonda que possuem limitações com relação à pressão pode-se citar: bombas, linhas de alta pressão (*swivel*) e tubos de perfuração (tamanho e tipo da conexão). Já os que apresentam limitações relacionadas à vazão são: bombas (*liners*), peneiras, e linha de descarga (*flowline*).

Outro fator de extrema importância é a limpeza de poço, pois uma deficiência na remoção dos cascalhos pode gerar problemas ao poço, principalmente quando direcional, tais como: redução da taxa de penetração, desgaste da broca, aumento do ECD (que pode gerar perda de circulação e fratura da formação), aumento do torque e arraste, prisão da coluna de perfuração, entre outros.

Abaixo seguem detalhados os conceitos básicos relacionados à análise de hidráulica e limpeza de poço. A metodologia de cálculo considerada pelo aplicativo Wellplan, da empresa Landmark está detalhada no apêndice B.

4.1

Conceitos Básicos de Hidráulica

4.1.1

Hidráulica

Durante a operação de perfuração de um poço, o fluido percorre um extenso caminho desde seu bombeio pelas linhas de superfície, passando pela coluna de perfuração e espaço anular, até seu retorno nas peneiras. Durante sua passagem por diversos equipamentos parte da energia cinética do fluido é dissipada resultando em perdas de carga.

Portanto, a hidráulica de perfuração necessária para deslocar o fluido ao longo do sistema de circulação tem como principais aspectos a considerar em seu projeto a vazão de fluido a ser bombeada, a velocidade anular e as pressões necessárias para vencer as perdas de cargas existentes no sistema.

É importante lembrar que cada um dos parâmetros do programa hidráulico mencionados acima tem a sua importância, isto é, a vazão de fluido quando baixa pode acarretar em encrasto da broca, resultante da adesão de material argiloso e plástico aos cones. Da mesma maneira, a velocidade anular tem de ser alta para que possa remover eficientemente o material cortado, mas não tão alta a ponto de erodir as paredes do poço. Somente a experiência numa determinada área poderá dizer qual a velocidade anular necessária para o poço a ser perfurado. Por fim, não havendo suficiente energia cinética, potência hidráulica ou força de impacto na broca e velocidade de retorno compatível para remover os cascalhos do fundo do poço (limpeza ineficiente), a taxa de penetração sofre uma redução, mesmo com maiores valores de peso sobre a broca, pois o material cortado permanece entre a broca e a rocha, absorvendo grande parte da energia da ação dos dentes, que, ao invés de agirem totalmente sobre a rocha virgem, tendem a retrabalhar o material já cortado, até que, com a redução do tamanho das partículas, as mesmas possam ser removidas pelo fluido. Devido a isto, surge a necessidade de manter longos períodos de circulação antes da retirada da coluna.

Logo, em qualquer condição, é importante a elaboração de um programa hidráulico adequado, visando obter o máximo rendimento da perfuração, pois uma combinação errada dos fatores acima pode facilmente sobrecarregar as bombas de lama. Tem-se que as teorias mais aceitas para otimização dos parâmetros hidráulicos, a partir da pressão disponível na superfície, são:

- Máxima força de impacto do jato: a formação será melhor removida debaixo da broca, quando a força dos jatos golpeando o fundo do poço for a maior possível. Pode ser demonstrado matematicamente que essa condição é obtida quando vazões e combinação de jatos são usadas de forma que 48% da pressão disponível na superfície seja usada para forçar o fluido através dos jatos;
- Máxima potência hidráulica: a formação será melhor removida se desenvolvermos a maior potência hidráulica possível no fundo do

poço. Neste caso, 65% da pressão disponível na superfície deve ser usada para forçar o fluido através dos jatos da broca.

4.1.2

Limpeza de poço

A limpeza do poço é a operação de remoção dos cascalhos gerados pela broca através do fluido de perfuração. Durante a perfuração, deve-se circular um fluido com vazão suficiente para transportar os sólidos do fundo do poço, através do espaço anular, até a superfície.

Como principais fatores que afetam a eficiência da limpeza do poço, podemos citar:

- Rotação da coluna de perfuração;
- Taxa de penetração;
- Vazão;
- Reologia e peso do fluido;
- Diâmetro, inclinação e estabilidade do poço;
- Diâmetro do tubo de perfuração;
- *Washouts*;
- Fluxo laminar ou turbulento;
- Tamanho e dispersão dos cascalhos;
- Percentual perfurado no modo orientado;
- Reciprocagem da coluna de perfuração.

O transporte de cascalhos não é usualmente um problema para poços verticais, o que não é necessariamente a regra para poços direcionais. A figura 10 caracteriza o efeito da inclinação do poço associada à dificuldade de limpeza do mesmo. De um modo geral, entende-se que o intervalo de 30 a 60 graus é aquele que apresenta as maiores restrições de transporte de cascalhos, com maior potencial de formação de leito de cascalhos, seja ele móvel ou fixo (pior caso).

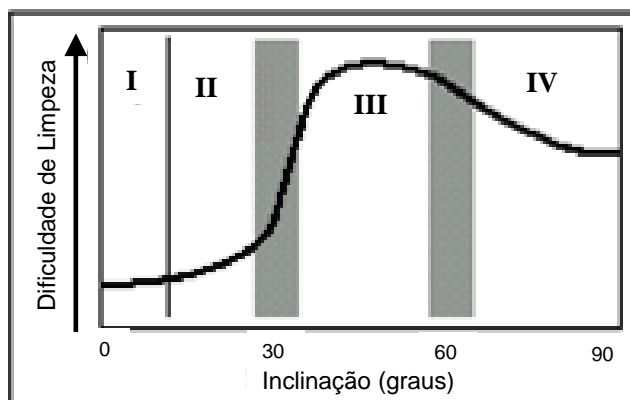


Figura 10: Dificuldade de limpeza x inclinação

Fonte: Machado (2002)

A literatura técnica estabelece três principais padrões de transporte de cascalhos ao longo do anular, tendo cada faixa de inclinação do poço um regime ou mecanismo de transporte preponderante. Para poços verticais e de baixa inclinação (0 a 45°), trechos I, II e III da figura 10, os cascalhos se apresentam uniformemente distribuídos ao longo da seção transversal do anular, sendo o transporte dos mesmos dado pela resultante da diferença entre densidade do fluido e do cascalho atuando gravitacionalmente contra o fluxo ascendente (*settling*). Para inclinações intermediárias (45 a 65°), trechos III e IV da figura 10, como o ângulo de deposição/decantação dos cascalhos é em geral menor do que a inclinação do poço, um leito fluidizado agitado se forma e os cascalhos são preferencialmente transportados por levantamento (*lifting*). Para altas inclinações (maiores que 65°), trecho IV da figura 10, os mecanismos preponderantes são o de rolamento (*rolling*) e de ressalto (*bounce*) dos cascalhos ao longo da parede do poço, sendo facilitado pelo uso de ferramentas do tipo *Rotary Steerable*, já que evitam a interrupção da rotação da coluna para o ajuste direcional.

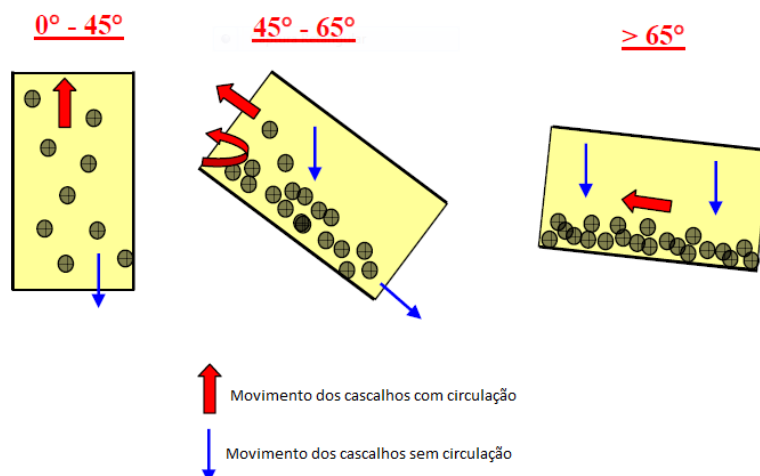


Figura 11: Movimento dos cascalhos de acordo com a inclinação do poço

Fonte: K&M Technology Group (2003)

Para poços de alta inclinação a rotação da coluna de perfuração é um fator de extrema importância para a eficiência da limpeza de poço. A rotação por si não é a responsável pela limpeza, mas juntamente com o efeito da viscosidade do fluido de perfuração se torna uma poderosa ferramenta para recolocar os cascalhos em suspensão, favorecendo seu carreamento até a superfície. Em poços de grande diâmetro (9-7/8" a 17-1/2") a limpeza do poço se torna bastante eficiente para os intervalos de rotações da coluna de perfuração de 100 a 120 e 150 a 180 rpm (K&M Technology Group).

Cada padrão de transporte tem sua velocidade crítica associada, e a grande parte dos modelos mecânicos estabelecidos na literatura técnica tem por base esta premissa. Vazões de bombeio que resultem em uma velocidade de fluxo anular inferior à velocidade crítica resultam em formação de leito de cascalhos na parede do poço, sendo o mesmo móvel num primeiro momento e se tornando fixo para vazões ainda inferiores.

4.1.3

Fluido de Perfuração e Reologia

Os fluidos de perfuração são classificados como fluidos não-newtonianos, ou seja, a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento não é constante, considerando a pressão e a temperatura constantes e o escoamento

laminar. Sua viscosidade não é única e varia com a magnitude da taxa de cisalhamento (MACHADO, 2002).

Tem como principais objetivos:

- Fornecer pressão hidrostática;
- Manter a estabilidade do poço;
- Suspender os sólidos em condições estáticas;
- Transportar os cascalhos até a superfície;
- Esfriar a broca;
- Lubrificar a coluna de perfuração;
- Controlar a pressão da formação;
- Minimizar a perda de fluido para a formação;
- Minimizar os danos ao reservatório.

A reologia é a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoar, quando está submetida a esforços originados por forças externas.

Para o estudo de hidráulica de perfuração é preciso caracterizar a relação tensão e deformação dos fluidos. Na indústria de petróleo existem três modelos mais conhecidos que caracterizam esta relação (MACHADO, 2002). São eles:

- *Bingham* ou Plástico Ideal

Neste modelo os fluidos só entram em fluxo a partir do ponto em que a tensão de cisalhamento for superior a um valor mínimo, conhecido como limite de escoamento (τ_L). Abaixo destas tensões o fluido comporta-se como sólido ideal.

A equação abaixo define o modelo:

$$\tau = \mu_p \cdot \gamma + \tau_L \quad \text{para } \tau > \tau_L \quad (1)$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau < \tau_L \quad (2)$$

Estes são os parâmetros reológicos que descrevem o modelo.

- Potência

Este modelo não se aplica a todo e qualquer fluido, tampouco a todo intervalo de taxa de cisalhamento, entretanto, um número razoável de fluidos não newtonianos apresentam comportamento de potência para grandes intervalos de taxa de cisalhamento.

Existem dois parâmetros que descrevem o modelo de potência:

- K é o índice de consistência, que representa o grau de resistência do fluido diante do escoamento;
- n é índice de comportamento, que representa o grau de afastamento do fluido em relação ao comportamento newtoniano ($n = 1$).

Logo, a equação que representa este modelo é:

$$\log(\tau) = \log(K) + n \cdot \log(\dot{\gamma}) \quad (3)$$

- *Herschel Bulkley*

Também conhecido como fluido de potência com limite de escoamento ou fluido de potência modificado, possui três parâmetros reológicos que o caracterizam. A equação que define este modelo é:

$$\tau = K \cdot (\dot{\gamma})^n + \tau_0 \text{ para } \tau \geq \tau_L \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \text{ para } \tau \leq \tau_L \quad (5)$$

Onde,

τ_L = limite de escoamento, lb/100 pé²

τ_0 = limite de escoamento real, lb/100 pé²

K = índice de consistência, cp

μ_p = viscosidade plástica, cp

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento, sec⁻¹

Os dados de viscosidade *fann* são obtidos a partir de ensaios com seis rotações diferentes (600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm) e os seus correspondentes registros da deflexão da mola. Os mesmos são realizados no viscosímetro com o

objetivo de medir a viscosidade aparente e plástica e o limite de escoamento dos fluidos de perfuração no campo.

Logo, o fluido de perfuração deve apresentar características reológicas de um fluido não newtoniano, resultando em valores distintos nas seis rotações testadas. Ao transportar os cascalhos desde o fundo do poço até a superfície, as dimensões do anular, delimitadas pelo BHA/tubo de perfuração e pelo poço aberto/ poço revestido/ riser, variam juntamente com o número de Reynolds (Re) associado ao fluxo (normalmente se mantém a faixa do regime laminar).

Da mesma forma variam a temperatura e a pressão hidráulica ao longo do anular. Neste sentido, ao percorrer toda a extensão do anular do poço, o fluido deve apresentar (um intervalo de) viscosidade suficiente para sustentar e transportar os sólidos perfurados.