

1 Introdução

O transporte de cascalhos tem sido uma das grandes preocupações na perfuração de poços de petróleo. Uma investigação realizada por Massie *et al.* (1995) mostrou que 70% do tempo perdido com eventos imprevistos estavam associados com prisão da coluna de perfuração. Um estudo de caso feito por Hopkins e Leicksenring (1995) mostrou que um terço dos problemas de prisão da coluna eram devidos à limpeza inadequada do poço.

O problema do transporte hidráulico de partículas sólidas por fluidos é tema de interesse de diversas áreas industriais, tais como: petróleo, mineração, dragagem, etc. Basicamente, os sólidos, por serem mais densos que o fluido, tendem a ser transportados com uma velocidade inferior à velocidade média do escoamento. No passado, este tipo de análise era realizada sem levar em consideração os efeitos transientes que ocorrem durante a perfuração, como nos trabalhos de Iyoho (1980), Gavignet e Sobey (1986), Martins (1990), Larsen (1993), Clark e Bickham (1994), Campos *et al.* (1994), Pilevari *et al.* (1996), Kamp e Rivero (1999).

Uma representação mais precisa do fenômeno requer uma simulação detalhada do processo, incluindo efeitos transientes. Essas simulações permitem introduzir perturbações nas variáveis em qualquer instante de tempo, possibilitando a reprodução das condições de campo como, por exemplo, mudança na vazão, troca do fluido de perfuração, aumento do volume de sólidos a ser carreado, circulação de tampões, retomada da circulação, progressão do processo de limpeza do poço. Variações de pressão que ocorrem no anular, devido à parada e à retomada de circulação e à manobras na coluna de perfuração, podem também ser avaliados considerando uma metodologia transiente.

Embora a literatura não apresente ainda muitas referências sobre essa abordagem, considerando a presença de cascalhos, já no final da década de 80 Iyoho *et al.* (1987) desenvolveram um modelo transiente para poços verticais, enquanto Martins *et al.* (1998, 1999) consideraram a presença de sólidos no anular provenientes da broca e da formação e Doan *et al.* (2000) desenvolveram um modelo para perfuração para condição sub-balanceada.

Algumas situações no processo de perfuração de poços só fazem sentido através de modelos transientes, como aqueles onde as variáveis operacionais variam com o tempo, como a vazão do fluido de perfuração ou a taxa de penetração. A interrupção do avanço da broca é uma operação que ocorre com bastante frequência durante a perfuração. Esta situação pode ocorrer quando algum problema é identificado, quando, por exemplo, uma grande quantidade de sólidos é acumulado no anular. Neste caso, pára-se o avanço da broca e faz-se circular o fluido de perfuração com o objetivo de carrear os sólidos depositados no fundo do anular.

Os aspectos apresentados acima, podem ser simulados através da metodologia proposta neste trabalho. O procedimento é capaz de simular o transporte de cascalhos gerados pela perfuração em um anular com excentricidade arbitrária com inclinação variando entre -20 e + 20 graus em relação a horizontal, incluindo fenômenos de transporte, como deposição de cascalhos, formação e movimentação do leito de cascalhos. O modelo considera as velocidades de sólidos e de fluido nas duas regiões do anular, ou seja, no leito e na suspensão.

O modelo mostrou ser eficaz na avaliação das pressões no anular devido aos fenômenos transientes apresentados acima, podendo ser considerado como uma primeira etapa no desenvolvimento de uma ferramenta capaz de prever problemas relacionados às oscilações de pressão em função de diversas condições como: movimentações da coluna de perfuração, retomada da circulação, instabilidade de poço, perda de circulação e entupimento de jatos da broca.

1.1. Objetivos

O trabalho propõe uma modelagem transiente para o escoamento multifásico na perfuração de poços de petróleo capaz de avaliar a formação do leito de cascalhos e prever oscilações de pressões. O modelo de duas camadas foi adotado, com o espaço anular subdividido em duas regiões: leito e suspensão. O leito, identificado como Região 1, é formado pelos cascalhos que sedimentam devido ao efeito gravitacional. A suspensão, identificada como Região 2, é a porção do anular acima do leito, formada pelo fluido de perfuração e algum cascalho. São utilizadas as equações de conservação de massa para a fase de sólidos e de líquido, assim como as equações de conservação de

quantidade de movimento para a região do leito e da suspensão. O método dos volumes finitos foi utilizado para a discretização das equações diferenciais, e o método de Newton-Raphson foi utilizado na linearização das equações. A solução é obtida para as seguintes incógnitas: altura do leito, velocidade dos sólidos no leito e na suspensão, velocidade do fluido no leito e na suspensão, pressão e concentração de sólidos.

1.2. Escopo da tese

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do problema de carreamento de cascalhos, os principais parâmetros que interferem nesta operação, dando uma breve descrição de cada um deles, em seguida apresenta uma compilação de diversos trabalhos relacionados a carreamento e hidráulica de poços em geral, descreve os quatro padrões de fluxo comumente encontrados na literatura para caracterizar este tipo de problema. Apresenta ainda, os modelos desenvolvidos para o carreamento de cascalhos em regime permanente, apresentando os modelos conhecidos como de duas e de três camadas, bem como as equações de cada um desses modelos.

O Capítulo 3 apresenta o modelo transiente desenvolvido neste trabalho, descreve as equações de conservação propostas, as principais hipóteses e as equações constitutivas que definem tensões e taxas de deformação.

Apresentado o modelo, são abordados no Capítulo 4 as discretizações e linearizações das equações e o modelo algébrico. As equações foram discretizadas considerando a técnica de volumes finitos, onde o duto é dividido em células discretas, formando um sistema especial de duas malhas deslocadas.

No Capítulo 5 são apresentados vários exemplos que ilustram a metodologia proposta. São ainda avaliadas a influência de diversos parâmetros no modelo proposto, como geometria, excentricidade, inclinação, reologia, fator de atrito nas interfaces sólido-líquido e fluido-parede, e deslizamento (diferença de velocidades) entre as fases.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para desenvolvimento de futuros trabalhos. As referências bibliográficas são mostradas no Capítulo 8.

Nos apêndices são mostrados os coeficientes das equações de conservação (Apêndice A), as equações de deslizamento sólido líquido no leito

(Apêndice B), as relações geométricas para o anular excêntrico (Apêndice C) e a adimensionalização das equações de conservação (Apêndice D).