



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

ASPECTOS IMPORTANTES DE LIMPEZA DE POÇOS DE PETRÓLEO

Suzana Santos Costa¹, Sergio A. B. da Fontoura¹

¹ GTEP / Puc-Rio, Marquês de São Vicente, 225 – Edifício Padre Leonel Franca, 6º andar, Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, scosta@civ.puc-rio.br, fontoura@civ.puc-rio.br

Resumo – O presente trabalho se refere à operação de remoção dos cascalhos da perfuração, conhecida como limpeza de poços. Esta operação é, ainda hoje, um tema crítico na perfuração de poços de alta inclinação, especialmente no mar. Problemas de aprisionamento de ferramentas, eventuais desvios de poço, perda de circulação, e como consequência, altos custos da lama e baixas taxas de perfuração, podem ser ocasionados pela ineficácia desta operação. O transporte de cascalhos é afetado por inúmeros parâmetros como a vazão do fluido, a rotação da coluna de perfuração, o diâmetro médio e a densidade das partículas, as propriedades do fluido e a taxa de penetração da broca. Este trabalho apresenta cada um destes parâmetros. Serão ainda discutidas as limitações de campo relativas a cada um destes parâmetros.

Palavras-Chave: limpeza de poço; transporte de cascalhos; transporte hidráulico.

Abstract – The current work presents a drilling cuttings removal, an operation known as hole cleaning. This operation is yet a critical issue on drilling of high-inclination wells, especially on the sea. Problems as stuck pipe, eventual well deviation, lost of circulation, consequently increases the drilling fluid cost and reduces the rate of penetration. These problems may result from the inefficacy of this operation. The cuttings' transport is affected by several parameters such as fluid flow rate, drillstring rotation, cuttings diameter, cuttings density, fluid properties and rate of penetration. Each one of these parameters will be analyzed in this work. Furthermore the field limitations for each of these parameters will be discussed.

Keywords: hole cleaning, cuttings transport, hydraulic transportation

1. Introdução

Dentre os custos considerados na exploração de um campo de petróleo, os de perfuração constituem uma parcela significativa do total. Deste modo, as grandes empresas de petróleo empenham-se na busca de novas tecnologias que permitam minimizar os custos. Assim, o número de poços de elevada inclinação, que permitem a otimização do aproveitamento de um reservatório, cresceu consideravelmente na última década. Este novo cenário trouxe consigo, novos problemas operacionais que necessitam ser resolvidos. Um destes problemas mais críticos está relacionado ao mecanismo de transporte de sólidos pelo fluido de perfuração. Esta dificuldade decorre da natural tendência, em função da ação da gravidade, que os fragmentos sólidos têm de sedimentar na parte inferior do espaço anular, abandonando o estado de suspensão e formando um leito. Esse processo é influenciado, diretamente, por uma série de parâmetros operacionais – como, por exemplo, a vazão do fluido, a rotação da coluna de perfuração, o diâmetro médio e a densidade das partículas, as propriedades do fluido e a taxa de penetração da broca. Neste trabalho será avaliada a influência destes diversos parâmetros na limpeza de poços, utilizando o simulador de carregamento de cascalhos SIMCARR (Costa, S.S. et al, 2003), desenvolvido pelo GTEP / PUC-RIO em parceria com o CENPES / PETROBRAS, que considera um modelo mecanicista desenvolvido por Martins (1990) para avaliar o transporte de sólidos gerados pela broca durante a perfuração. Este simulador avalia a limpeza do poço basicamente pelo cálculo das seguintes grandezas associadas ao escoamento do fluido no anular (Martins, et al, 1996):

- Padrão de escoamento: indica se há ou não formação de leito;
- Altura do leito: porcentagem do anular que está coberta pelo leito de sólidos;
- Concentração total de sólidos: reflete a fração volumétrica total de sólidos no anular.

2. Limpeza de Poço

A operação de limpeza de poço consiste na remoção dos cascalhos gerados pela broca através do fluido de perfuração. Nesta operação faz-se circular, através do espaço anular formado pela coluna de perfuração e o revestimento, um fluido de perfuração com vazão suficiente para transportar os sólidos gerados pela broca para a superfície. As Figuras 1(a) apresentam o esquema do processo de limpeza de poço, onde o fluido de perfuração entra pela coluna e retorna, carreando os cascalhos, através do espaço anular.

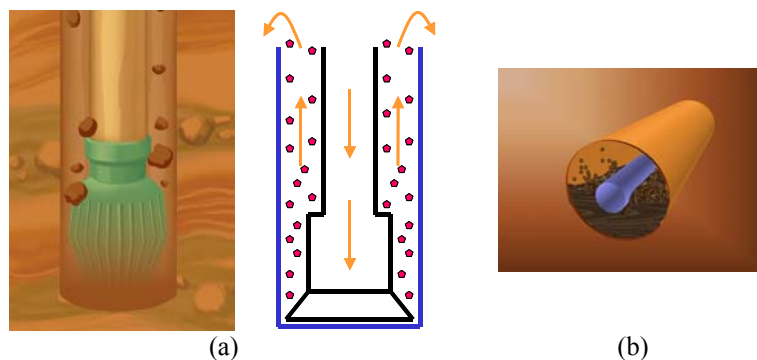


Figura 1. (a) Esquema do processo de carregamento de cascalhos. (b) Anular com leito de cascalhos

Em poços desviados e de grande afastamento uma atenção maior deve ser dada a este mecanismo de transporte de sólidos pelo fluido de perfuração. Neste caso, devido ao longo trecho de alta inclinação, existe uma tendência dos cascalhos separarem-se da suspensão formando um leito na parte inferior do espaço anular. A Figura 1(b) mostra o esquema de um anular com a formação de leito.

Em poços delgados, onde o espaço anular é menor que o usual, este efeito torna-se ainda mais crítico. Este leito, quando ocupa grande parte do espaço anular, é responsável pelos diversos problemas causados na perfuração, como por exemplo, o desgaste prematuro da broca, baixas taxas de penetração, fraturamento da formação, torque excessivo na coluna de perfuração e arrastes, prisão da coluna de perfuração, interrupção da circulação de fluido, etc. Se esta situação não for tratada adequadamente, o problema pode provocar a perda do poço.

3. Parâmetros que Controlam a Limpeza de Poço

Existem vários fatores que impactam na limpeza do poço durante a perfuração direcional. Os mais relevantes, segundo Azar e Sanchez (1997), são: a velocidade do fluido no anular, a rotação da coluna de perfuração, o ângulo de inclinação do poço, as propriedades do fluido, o tamanho e forma das partículas, a excentricidade da coluna de perfuração e a taxa de penetração. Estes efeitos são apresentados e discutidos a seguir,

3.1. Velocidade do Fluido no Anular

Sem levar em consideração os demais fatores que afetam a limpeza do poço, a velocidade do fluido no anular, domina o processo de transporte de cascalhos. É esperado que um aumento na vazão provocará sempre uma remoção de sólidos mais eficiente no espaço anular. No entanto, existe um limite operacional superior para a vazão que é determinado pelos seguintes fatores: potência do equipamento hidráulico, densidade equivalente de circulação (ECD)¹ permitida e susceptibilidade à erosão da seção aberta do poço.

3.2. Rotação da Coluna de Perfuração

A rotação da coluna de perfuração possui um efeito entre moderado e significativo na limpeza de poços direcionais. A taxa de aumento de remoção de cascalhos devido à rotação da coluna de perfuração é função da combinação de reologia do fluido, tamanho dos cascalhos, vazão e comportamento dinâmico da coluna. Acredita-se que o movimento de rotação da coluna de perfuração é o que mais contribui no processo de limpeza. A agitação mecânica do leito de cascalhos, e sua exposição a altas velocidades de fluido, beneficiam este movimento.

Embora haja um ganho na limpeza do poço devido à rotação da coluna, deve-se reconhecer que existem também, limitações que precisam ser impostas ao poço. Como exemplo, a rotação da coluna induz tensões cíclicas que podem acelerar a ruptura do tubo devido à fadiga, causando excessivos desgastes no revestimento e em alguns casos, destruição mecânica da parede do poço aberto. Adicionalmente, em poços estreitos, altas rotações da coluna podem causar um aumento da perda de carga devido ao atrito no anular e, assim, um aumento no ECD.

3.4. Propriedades do Fluido de Perfuração

As principais funções do fluido de perfuração são: limpeza do fundo do poço e anular, estabilidade mecânica e química do poço, resfriamento, lubrificação e prevenção da invasão da formação para dentro do poço durante a perfuração convencional.

Dentre as muitas propriedades de um fluido de perfuração, as que possuem um maior impacto na limpeza do anular são a viscosidade e a densidade.

A principal função da densidade do fluido é estabilizar o poço mecanicamente e prevenir a entrada de fluidos da formação para dentro do poço. Aumentando a densidade aumenta a suspensão de cascalhos e, conseqüentemente, o seu transporte. Porém, um aumento na densidade causa uma diminuição na taxa de penetração, o que gera altos custos de perfuração. Adicionalmente, a estabilidade mecânica do poço é dependente da combinação das tensões *in-situ* na rocha e a densidade do fluido e, portanto, sua magnitude é ditada pelas funções principais do fluido de perfuração, que não é a limpeza do poço.

A principal função da viscosidade é permitir a suspensão de materiais no sistema fluido e controlar a quantidade de perda para dentro da zona permeável. Geralmente, um aumento na viscosidade diminui a limpeza do poço em perfurações direcionais. De fato, água pura seria mais eficiente em limpeza de poços direcionais devido à baixa vazão requerida para induzir uma condição de fluxo turbulento no anular, que é mais eficiente na limpeza de poços.

Devido aos fatores citados, torna-se de extrema importância a escolha adequada do fluido de perfuração. Assim, um fluido deve possuir alta viscosidade para baixas taxas de cisalhamento, para promover um melhor carregamento dos sólidos, e baixa viscosidade, para altas taxas de cisalhamento, para uma melhor ressuspensão dos sólidos.

3.5. Tamanho e Forma das Partículas

O tamanho, forma e a densidade relativa das partículas afetam o comportamento dinâmico em um meio fluido. A densidade relativa da maioria das rochas perfuradas está na média de 2,6 e, portanto, pode ser admitida como sendo conhecida. O tamanho e a forma das partículas são função do tipo de broca utilizada. No entanto, é impossível controlar o tamanho e a forma, mesmo se a broca correta for selecionada para gerar uma geometria específica.

3.7. Taxa de Penetração

Sob iguais condições, um aumento na taxa de penetração causa um aumento na concentração de sólidos no anular. No entanto, para manter uma limpeza de poço aceitável e efetiva, outras variáveis controláveis como a hidráulica e a velocidade de rotação precisam ser ajustadas. Se o limite destas variáveis tiver sido alcançado, então a alternativa é diminuir a taxa de penetração. Entretanto, uma diminuição da taxa de penetração terá um impacto negativo no custo do poço, mas os benefícios em evitar problemas de perfuração como a prisão da coluna e torque e arraste excessivo devem contrabalançar estas perdas.

¹ ECD – *equivalent circulating density* – é a densidade exercida pelo fluido na formação que leva em conta a queda de pressão acima do ponto considerado.

4. Influência dos Parâmetros na Limpeza de Poços

Para quantificar os efeitos de cada um dos parâmetros citados acima na remoção dos cascalhos, utilizou-se um simulador de carreamento de cascalhos (SIMCARR), desenvolvido pelo Cenpes/Petrobrás, em parceria com o GTEP/Puc-Rio. Este simulador tem como principal objetivo avaliar a remoção de sólidos no trecho anular. Para tal avaliação são consideradas as seguintes variáveis: altura do leito formado pelas partículas que se sedimentaram devido à ação da gravidade e a concentração de sólidos em suspensão no fluido de perfuração.

O modelo utilizado neste simulador é o proposto por Martins (1990), que considera um meio estratificado de duas camadas: onde a camada inferior representa o leito de sólidos depositado na seção do anular por efeito gravitacional e a camada superior, o fluido de perfuração com as partículas sólidas em suspensão (Figura 2). Este modelo permite também caracterizar o sistema dentro dos seguintes padrões propostos por Iyoho (1980):

- **Fluxo com leito estacionário:** padrão onde existe uma deposição estacionária de partículas sólidas na parte inferior do anular.
- **Fluxo com leito móvel:** padrão onde existe uma deposição móvel de partículas sólidas na parte inferior do anular.
- **Fluxo heterogêneo:** caracteriza-se pelo fato do sistema se encontrar totalmente em suspensão, e a fase sólida apresenta um perfil de concentrações ao longo da seção transversal (heterogênea).
- **Fluxo pseudo-homogêneo:** caracteriza-se, também, pelo fato do sistema se encontrar totalmente em suspensão, mas, neste caso, com a fase sólida uniformemente dispersa ao longo da seção.

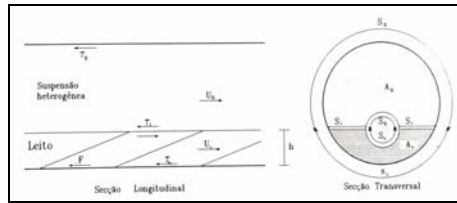


Figura 2. Modelo de duas camadas proposto por Martins (1990)

Os mecanismos considerados na modelagem da limpeza de poços, através do modelo proposto por Martins (1990), podem ser descritos pelas equações que governam os seguintes fenômenos: conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e equação da difusão turbulenta. Estas equações estão apresentadas a seguir:

$$U_S A_S C_S + A_L U_L C_L = U_M A_M C_M \quad (1)$$

$$U_S A_S (1 - C_S) + A_L U_L (1 - C_L) = U_M A_M (1 - C_M) \quad (2)$$

$$-A_S \frac{dP}{dz} = -\tau_s S_s - \tau_i S_i \quad (3)$$

$$-A_L \frac{dP}{dz} = -F - \tau_L S_L - \tau_i S_i \quad (4)$$

$$C_S = \frac{C_S D_e^2}{2A_S} \int_{\theta_b}^{\pi/2} M \exp\left(-\frac{\omega D_e}{2\varepsilon} (\sin\gamma - \sin\theta_b) \sin\theta\right) \cos^2 \gamma \cdot d\gamma \quad (5)$$

U_S , U_L e U_M são, respectivamente, as velocidades da suspensão, do leito e da mistura; C_S , C_L e C_M , as concentrações da suspensão, do leito e da mistura; A_S , A_L e A_M , as áreas da suspensão, do leito e da mistura; S_S , S_L e S_M , os perímetros da suspensão, do leito e da mistura; dP/dz é a perda de carga, F é a força estática, τ_s a tensão cisalhante na camada superior, τ_L na camada inferior e τ_i na interface; D_e é o diâmetro externo, θ a inclinação do intervalo, ε o coeficiente de difusão, ω a velocidade de queda, θ_b é o ângulo entre o centro do anular e o leito formado. M pode ser 1 ou $1 - K^2$ dependendo da região do anular que está sendo analisada. K é a relação entre os diâmetros interno e externo do anular

A forma da resolução do sistema de equações depende do padrão de escoamento proposto por Iyoho (1980). Como não são disponíveis mapas indicando as faixas de ocorrência de cada padrão, são necessárias as soluções sucessivas para os diversos padrões e a definição de mecanismos ou critérios para as linhas de transição entre os mesmos.

Os gráficos apresentados a seguir ilustram os efeitos de cada um dos parâmetros citados acima na remoção dos cascalhos. As simulações foram realizadas utilizando o simulador de carreamento de cascalhos, SIMCAR, desenvolvido pelo GTEP / PUC-RIO em parceria com o CENPES/PETROBRAS. A altura do leito apresentada nos gráficos a seguir

representa a porcentagem do espaço anular que está preenchida pelos cascalhos. A Figura 3 apresenta a trajetória e o esquema do poço simulado.

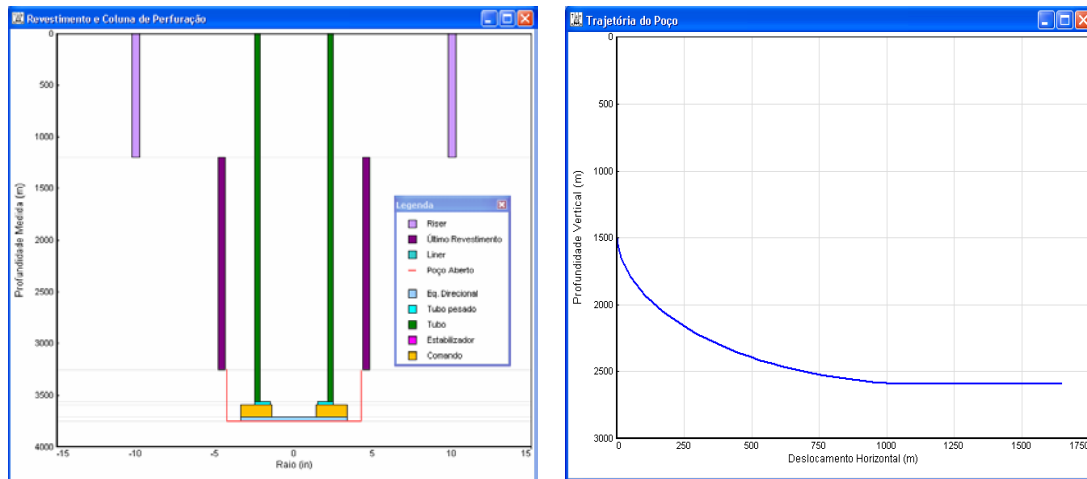


Figura 3. Esquema e trajetória do poço.

As Figuras 4 apresentam o perfil de altura do leito ao longo da profundidade. A Figura 6(a) mostra como a variação da vazão do fluido de perfuração interfere na altura do leito formado no espaço anular. Como pode ser observado, quanto maior a vazão, menor será a altura do leito depositado no interior do espaço anular. Se continuarmos com um aumento da vazão, chegaremos a uma situação onde o leito de cascalhos será totalmente removido. Da mesma forma, um aumento na rotação da coluna gera uma diminuição da altura do leito. como pode ser observado na Figura 4(b), quando a perfuração ocorre sem rotação da coluna, o acúmulo de sólidos no interior do anular é maior do que quando tem-se um rotação, e como pode ser observado, quanto maior a velocidade da rotação, menor a altura de leito formado.

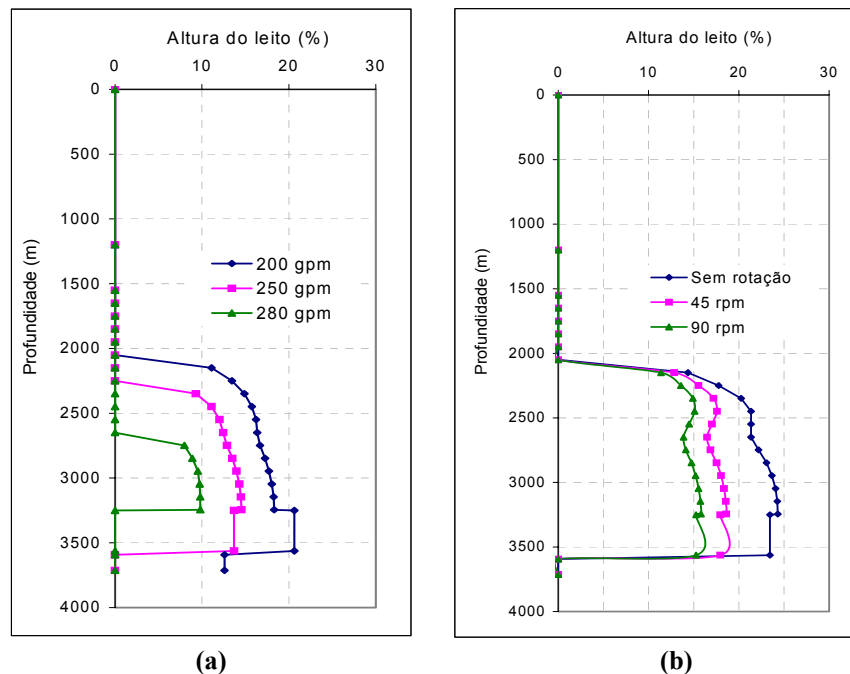


Figura 4. a) Influência da variação da vazão de fluido na altura do leito. b) Influência da rotação da coluna de perfuração na altura do leito.

A Figura 5(a) mostra a variação da altura do leito com a densidade do fluido de perfuração e pode-se notar uma melhora a remoção de cascalhos a medida em que o fluido torna-se mais denso. Já para o caso do diâmetro da partícula, um aumento nesta propriedade leva a uma diminuição na remoção dos cascalhos, ou seja, quanto maior for o tamanho das partículas, maior será o esforço necessário para removê-las. Para a taxa de penetração, como mencionado

anteriormente, um aumento na mesma leva a um aumento na altura do leito depositado no espaço anular, como pode ser observado através da Figura 5 (c).

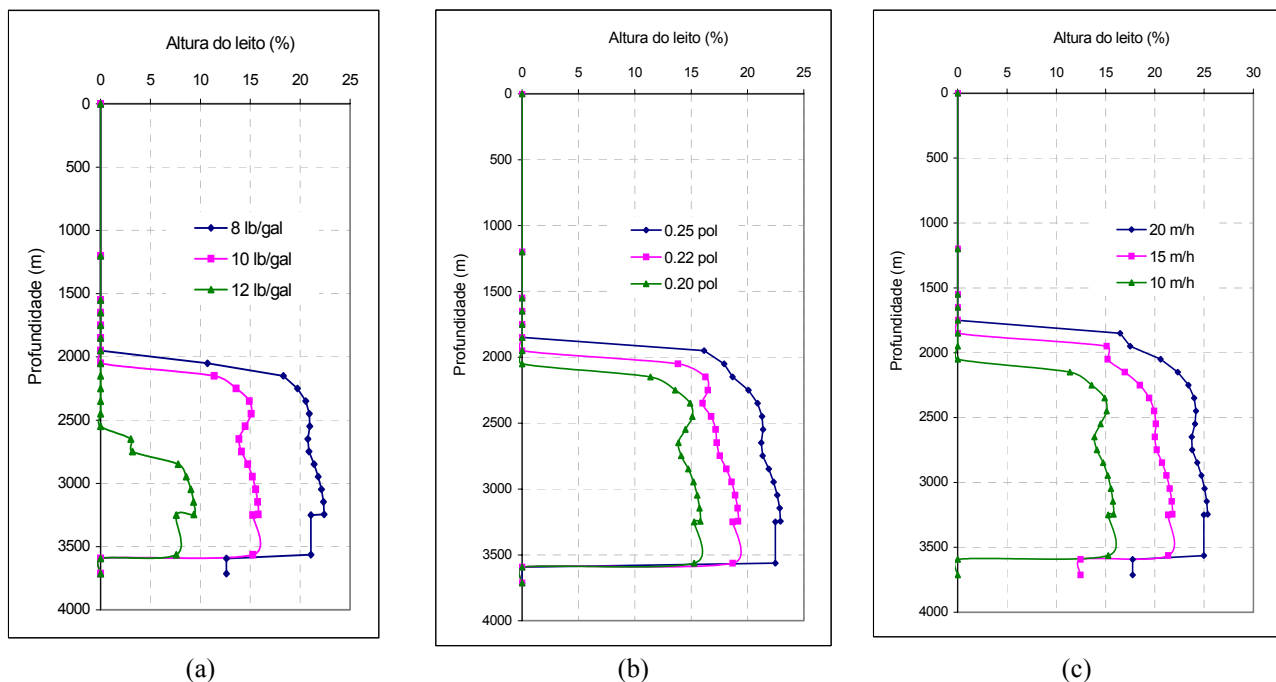


Figura 5. a) Influência da variação da densidade do fluido na altura do leito. b) Influência do diâmetro da partícula na altura do leito. c) Influência da variação taxa de penetração na altura do leito.

6. Conclusões

Dentre os inúmeros parâmetros que controlam a limpeza do poço, os mais relevantes foram apresentados e discutidos neste trabalho. Como pode ser observado, a vazão do fluido é um parâmetro muito importante na remoção dos sólidos no interior do poço. Pode-se observar também, através dos gráficos apresentados, a influência da inclinação do poço na altura do leito (um aumento da altura do leito a medida em que a inclinação aumenta). Infelizmente, estes parâmetros possuem determinadas limitações, bem como todos os outros citados neste trabalho. Desta forma pode-se concluir que uma análise conjunta e detalhada destes parâmetros deve ser realizada para um perfeito projeto de perfuração de poços, sem que a limpeza de poços comprometa toda a operação.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Petróleo, programa de Recursos Humanos (ANP / PRH) pela concessão de bolsa de estudo à primeira autora, ao GTEP / Puc-Rio e ao Cenpes / Petrobras.

8. Referências

- AZAR, J.J. e SANCHEZ, R.A. Important Issues in Cutting Transport for Drilling Directional Wells. In: *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition*, Rio de Janeiro, Brazil, 1997. SPE 39020.
- COSTA, S.S.; HOLZBERG, B.B.; PASTOR, J.A.S.C. e FONTOURA S.A.B. Sistema Integrado para Monitoramento de Problemas de Perfuração de Poços. *Relatório de Progressos GTEP/CENPES*, Janeiro 2003.
- MARTINS, A.L., Modelagem e Simulação do Escoamento Axial Anular de Mistura Sólido-Fluido Não-Newtoniano em Dutos Horizontais e Inclinados, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 1990.
- MARTINS, A.L.; DE SÁ, C.H.M. E FRYDMAN, M. O Simulador Computacional SIMCARR e Suas Aplicações na Perfuração e Circulação de Poços de Alta Inclinação. *I Seminário de Engenharia de Poço*, Rio de Janeiro, Brasil, Novembro 1996.
- IYOH, A.W., Drilled Cuttings Transport by Non Newtonian Drilling Fluids Through Inclined, Eccentric Anulli, Tese de Doutorado, University of Tulsa, Ok, 1980.