

2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS NA LIMPEZA DE POÇOS DE PETRÓLEO

Suzana Santos Costa¹, Helena Freire¹, Jorge Pastor¹, Sérgio A. B. Da Fontoura¹, André L. Martins²

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, hfreire@rdc.puc-rio.br, pastor@civ.puc-rio.br, fontoura@civ.puc-rio.br

² Cenpes / Petrobras, aleibsohn@cenpes.petrobras.com.br

Resumo – Os recentes avanços tecnológicos na indústria de petróleo têm permitido a exploração de petróleo em lâminas d'água superiores a dois mil metros. Neste cenário, a perfuração de poços de alta inclinação e trajetória complexa, constitui um desafio tecnológico de elevada complexidade. Uma das principais dificuldades neste tipo de perfuração está diretamente ligada aos problemas relacionados à limpeza do poço. A natureza e complexidade dessa operação podem gerar o aumento nos acidentes de aprisionamento da coluna de perfuração, o que, por sua vez, pode acarretar eventuais desvios de eixo do poço. Um aspecto relevante nesta discussão é a quantificação da importância de alguns parâmetros na limpeza de poços, como por exemplo a densidade do fluido de perfuração, o diâmetro da partícula e a rotação da coluna de perfuração.

Este trabalho apresenta o estudo de forma quantitativa, da influência de diversos parâmetros no carregamento de sólidos em anulares. A avaliação é feita através da sensibilidade de um modelo de duas camadas, aos diversos parâmetros de entrada.

O presente trabalho, é o primeiro passo para a discussão do fato de que os parâmetros que controlam a limpeza do poço possuem um alto grau de incertezas associado. Nesta situação, parâmetros pouco influentes podem ser considerados deterministicamente, enquanto parâmetros mais relevantes devem ter seu grau de incerteza e distribuição probabilística detalhados.

Palavras-Chave: análise de sensibilidade, limpeza de poço, carregamento de cascalhos

Abstract – Recent technological developments have enabled some oil companies to explore offshore oil reserves that are beyond thousand meters of water depth. In this context, the drilling of oil wells that are of high inclination and complex course presents a technological ultra complex challenge. One of the main difficulties involved in this type of drilling is directly connected to the problems in keeping the well clean. The nature and complexity in this operation can result in an increase of accidents locking the drilling column, which, in turn, could lead to eventual deviations of the well axis. A very relevant aspect in this discussion is the quantification of the relevance of some parameters, as for example, the fluid density, the particle diameter and the rotation of the drilling column.

This work presents the study in a quantitative form, of the influence of several parameters on the transporting of solids in annulares. This evaluation will be conducted through the sensibility of the two layers model, to the several input parameters.

This paper represents the first step for discussing the fact that the control parameters of well cleaning have a high degree of uncertainties associated with same. In this situation, parameters of slight influence might be considered deterministically, while more relevant parameters must have their degree of uncertainty and probabilistic distribution detailed.

Keywords: sensitivity analysis , hole cleaning, cuttings transport

1. Introdução

A perfuração de poços de alta inclinação e trajetória complexa tem como um de seus pontos mais críticos o mecanismo de transporte de sólidos pelo do 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 rotação da coluna, o diâmetro médio e a densidade das partículas, a reologia do fluido, a vazão, a taxa de penetração da broca e a área do anular.

Alguns modelos vêm sendo utilizados para simular o transporte de cascalhos em anulares. Dentre estes modelos, pode-se citar os seguintes modelos de duas camadas: Iyoho (1980), Gavignet e Sobey (1986), Martins (1990) e Martins et al (1996). No entanto, nenhum desses modelos é capaz de tratar devidamente a interação de todos os parâmetros relevantes no caso da limpeza desses poços. Especialmente por que deixam de considerar alguns aspectos importantes desta operação, tais como a rotação da coluna de perfuração e o comportamento dos fluidos viscoelásticos.

Convém ressaltar que, dada a elevada complexidade do problema, alguns dos parâmetros normalmente utilizados no controle da limpeza de poços não são totalmente conhecidos, possuindo, desta maneira, incertezas de várias ordens associadas a eles. Em conjunto, esse grau de incerteza aliado ao desconhecimento de sua influência direta sobre o processo podem alterar significativamente uma análise de limpeza de poços realizada segundo uma determinada linha de modelagem. Operações consideradas seguras a partir da análise de dados determinísticos, podem, mesmo assim, apresentar possibilidade de sérios problemas em relação a operações de limpeza.

Por essas razões, considera-se oportuno realizar um estudo com a aplicação de metodologias probabilísticas que podem reduzir o grau das incertezas associadas a determinados parâmetros. Um primeiro passo para este estudo, é a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros relevantes à limpeza do poço. Esta análise será discutida neste trabalho.

2. Modelo adotado

O modelo proposto por Martins (1990) considera um meio estratificado de duas camadas, leito e suspensão, para representar o mecanismo de deslizamento do leito, permitindo também caracterizar o sistema dentro dos seguintes padrões propostos por Iyoho (1980):

1. Fluxo com leito estacionário: consiste no padrão onde existe uma deposição estacionária de partículas sólidas na parte inferior do anular.
2. Fluxo com leito móvel: consiste no padrão onde existe uma deposição móvel de partículas sólidas na parte inferior do anular.
3. 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).
4. 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.

A Figura 1 mostra a idéia básica deste modelo, 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.

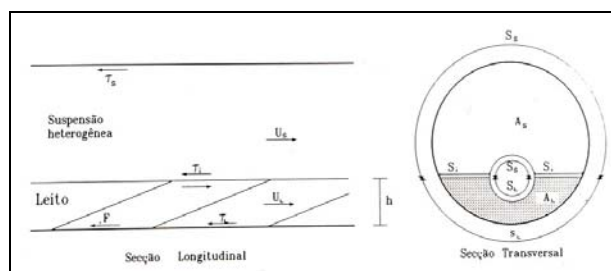


Figura 1. Modelo de duas camadas proposto por Martins (1990).

As seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas:

- Altura do leito constante com o tempo;
- Distribuição hidrostática de pressões ao longo de uma seção transversal;
- O sistema sólido-líquido é considerado incompressível e de parâmetros reológicos constantes e iguais aos do fluido;
- Os sólidos são caracterizados por um diâmetro médio e uma esfericidade;
- São desconsiderados efeitos de tensão superficial e de transferência de massa entre as fases sólida e líquida;

- Não é considerado o escorregamento entre as fases líquida e sólida em cada uma das camadas.

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 (uma equação para cada camada)

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

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

U_S , U_L , U_M , são, respectivamente, as velocidades da suspensão, do leito e da mistura; C_S , C_L , C_M , as concentrações da suspensão, do leito e da mistura e A_S , A_L , A_M , as áreas da suspensão, do leito e da mistura.

- Conservação da quantidade de movimento (uma equação para cada camada)

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

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

S_S , S_L , S_M , são, respectivamente, 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.

- Equação da difusão turbulenta.

$$C_S = \frac{C_S D_e^2 \pi^{1/2}}{2 A_S} \int_{\theta_b} M \exp\left(-\frac{\omega D_e}{2 \varepsilon} (\sin \gamma - \sin \theta_b) \sin \theta\right) \cos^2 \gamma \cdot d\gamma \quad (5)$$

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 é igual a 1 para as regiões I e III do anular e $(1 - K^2)$ para a região II do anular como pode ser visto na Figura 2. K é a relação entre os diâmetros interno e externo do anular

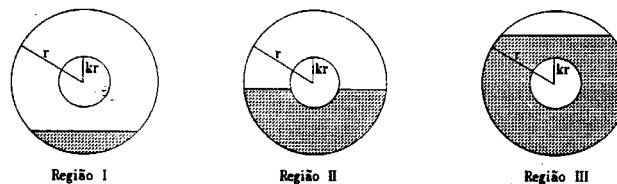


Figura 2 – Regiões do anular

A forma da resolução do sistema de equações depende do padrão de escoamento. 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. O procedimento adotado é descrito a seguir:

- Leito Estacionário: Neste caso, $U_L = 0$ e a solução direta das Equações 1 e 2 fornece os valores de U_S e C_S . A solução iterativa da Equação 5 fornece os valores da altura do leito. A perda de carga é então calculada diretamente pela Equação 3.
- Transição Estacionário-Móvel: A força estática F é calculada pela Equação 4, não utilizada no item anterior. Se este valor for inferior à força estática máxima, dada pela equação 6, a resolução do sistema é considerada coerente, caso contrário, o padrão estacionário não atende ao conjunto de variáveis de entrada.

$$F_{MÁX} = \eta \left[(\rho_p - \rho_f) g C_L \sin \theta A_L + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right] \quad (6)$$

η é o coeficiente de escorregamento, ϕ o ângulo de atrito, ρ_p a densidade da partícula e ρ_f a densidade do fluido.

- Leito Móvel: Neste caso, $F = F_{MAX}$ e as cinco equações do sistema devem ser resolvidas simultaneamente por métodos iterativos.
- Transição Leito Móvel – Padrões Suspensos: Caso não seja encontrada a solução para o padrão leito móvel, ou se o valo de h encontrado for próximo de zero ou ainda se as velocidades das camadas forem muito próximas, deve-se partir para a resolução dos padrões totalmente suspensos.
- Padrões Totalmente Suspensos: Neste caso, $h=0$, $U_L=0$, $U_S=0$, $C_S=C_M$ e a perda de carga pode ser calculada como para escoamento monofásico, uma vez considerada a massa específica da mistura.
- Transição Heterogêneo – Pseudo Homogêneo: neste caso é adotado o critério de que se a concentração local de 80% do diâmetro externo for maior ou igual a 95% da concentração a 20% do diâmetro externo, diz-se que o padrão é pseudo-homogêneo, caso contrário, é heterogêneo.

3. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada do modelo tem o intuito de quantificar e identificar qual a sua relevância na limpeza do poço. Para esta análise foi utilizado o simulador de limpeza denominado SIMCARR 6.0, desenvolvido pelo Gtep Puc-Rio em parceria com o Cenpes / Petrobras. Este simulador avalia a limpeza do poço basicamente pelo cálculo das seguintes grandezas associadas ao escoamento do fluido no anular:

- 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.
- Razão de transporte: indica o percentual de transporte de sólidos, refletindo a capacidade de limpeza do poço.

A importância na sensibilidade da análise dos parâmetros de entrada do programa reside justamente na verificação destas variáveis. Observações realizadas no campo demonstraram que algumas destas grandezas têm se mostrado altamente sensíveis a pequenas variações dos parâmetros de entrada.

O procedimento de análise é constituído pela execução do simulador para um poço direcional, composto por cinco trechos com inclinações diferentes: 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, como ilustra a Figura 3. O quadro 1 mostra as condições iniciais estabelecidas para o poço, a partir das quais o programa foi executado para diversas situações onde os parâmetros foram variados um a um dentro de limites operacionais razoáveis. A variação dos parâmetros foi realizada no sentido de obter uma melhor limpeza do poço.

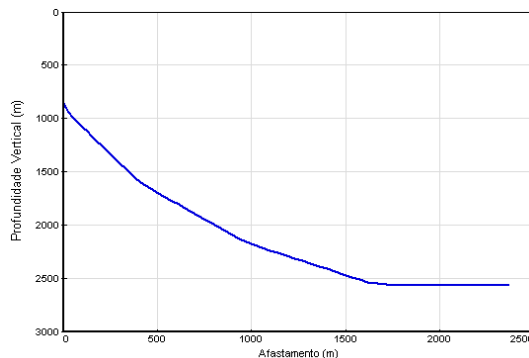


Figura 3. Esquema da trajetória do poço direcional

Foram obtidos diversos resultados que ilustram a influência da variação de cada parâmetro no resultado final. As Figuras 4a e 4b ilustram a influência na altura do leito e na concentração de sólidos no anular para um acréscimo da vazão. Nota-se que existe uma inconsistência nestes resultados, ou seja, quando o padrão de fluxo passa de leito estacionário, para leito móvel, ocorre um aumento da altura do leito e da concentração de sólidos para um aumento da vazão. Tal comportamento acontece, por exemplo, para a inclinação de 90 graus, entre os valores de vazão compreendidos entre 420 e 525 gpm. Este problema pode ser devido a uma solução ineficiente do sistema de equações, que para o caso do leito móvel, se dá de forma iterativa. Uma maneira mais eficaz de resolução deste sistema de equações vem sendo estudada.

A variação dos demais parâmetros (vazão do fluido, taxa de penetração, densidade do fluido, diâmetro e densidade das partículas e a rotação da coluna) estão apresentadas na Figura 5. Nota-se que para os demais parâmetros tal inconsistência também é verificada.

Quadro 1 – Condição inicial da análise de sensibilidade

Vazão do Fluido de Perfuração	300,00 gal/min
Rotação da Coluna (perfuração)	60,00 rpm
Taxa de Penetração	15,00 m ³ /h
Peso do Fluido de Perfuração	9,20 lb/gal
Diâmetro da Partícula	0,35 pol
Densidade da Partícula	21,80 lb/gal

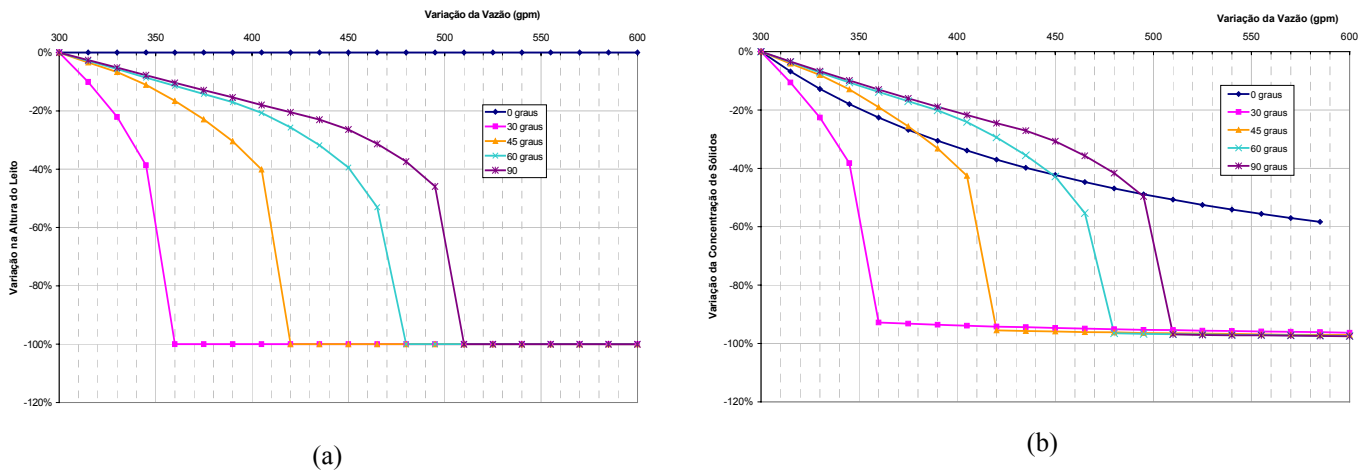


Figura 4 - Variação dos parâmetros com a vazão: (a) altura do leito e (b) concentração de sólidos

Cabe ainda ressaltar que o modelo proposto por Martins (1990), como mencionado anteriormente, não leva em consideração o efeito da rotação da coluna de perfuração. Esse efeito foi representado no programa SIMCARR, através de equações empíricas desenvolvidas por Martins et al (1996), para quantificar o fator de redução do leito formado durante a perfuração em função da rotação da coluna. Estas equações são apresentadas no Quadro 2. Onde ω representa a rotação da coluna em RPM. Para o caso de uma rotação superior a 90 RPM, o valor de $\omega = 90$ é utilizado.

Quadro 2. Efeito da rotação da coluna de perfuração

Inclinação (°)	Fator de redução de leito
90	$1 - 0,00264 \times \omega^{0,5739}$
65	$1 - 0,024738 \times \omega^{0,5981}$
40	$1 - 0,0027 \times \omega^{0,9791}$
0	1,0

Na figura 5 verifica-se uma mudança nos padrões de escoamento para um aumento da vazão em torno de 40%. A partir deste valor, o padrão de escoamento deixa de ser leito estacionário e passa a ser móvel, ocorrendo um aumento na altura do leito. Tal comportamento, no entanto não é um comportamento considerado coerente com o modelo físico. Este mesmo comportamento pode ser observado, ainda para a densidade do fluido e densidade da partícula. Por outro lado, verifica-se uma grande influência do diâmetro da partícula. Outros parâmetros relevantes para a limpeza são a densidade do fluido de perfuração e a densidade das partículas.

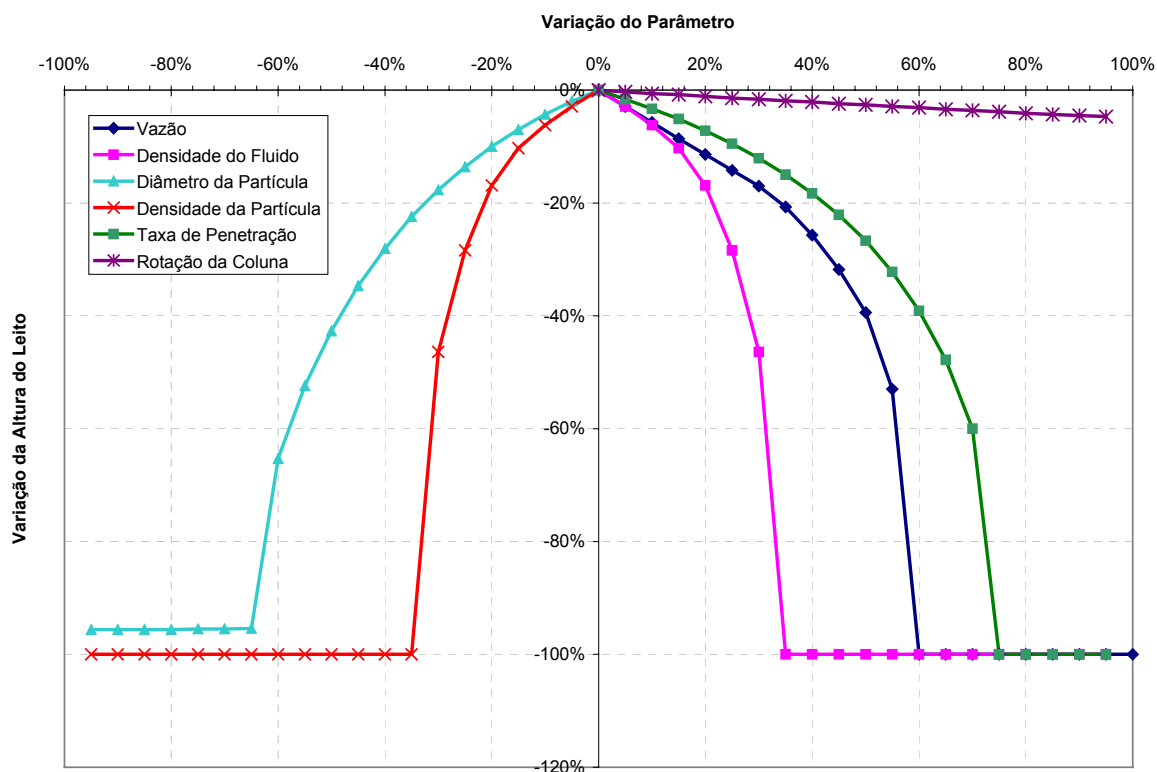


Figura 5. Resultados relativos a altura do leito para um trecho de inclinação de 60°

4. Conclusões

A análise de sensibilidade apresentada neste trabalho permitiu a avaliação da influência dos parâmetros envolvidos na limpeza do poço. Os parâmetros que apresentaram grande influência foram: densidade da partícula, densidade do fluido, vazão do fluido e o diâmetro da partícula. Em uma análise probabilística, a quantificação das incertezas associadas a estes parâmetros deve ser priorizada.

Por outro lado, a análise de sensibilidade mostrou que o modelo não é tão sensível à rotação da coluna quanto os demais parâmetros citados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP/CTPETRO pelo apoio financeiro a este estudo e à Agência Nacional de Petróleo, programa de Recursos Humanos (ANP / PRH) pela concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor.

6. Referências

- GAVIGNET, A.A. E SOBEY, I.J., A Model for the Transport of Cuttings in Highly Deviated Wells, SPE 15417, 61st Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, LA, 1986.
- IYOHO, A.W., Drilled Cuttings Transport by Non Newtonian Drilling Fluids Through Inclined, Eccentric Anulli, Tese de Doutorado, University of Tulsa, Ok, 1980.
- MARTINS, A. L. Modelagem e Simulação do Escoamento Axial Anular de Mistura Sólido-Fluido Não-Newtoniano em Dutos Horizontais e Inclinação, 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.
- MARTINS, A.L.; SÁ, C.H.M. ; LOURENÇO, A.M.F. E FREIRE, L.G.M. Optimizing Cuttings Circulation In Horizontal Well Drilling, SPE 35341, International Petroleum Conference & Exhibition of Mexico, Vilahermosa, México, 1996.