

ESTUDO PARAMÉTRICO DO MECANISMO DE REMOÇÃO DE CASCALHOS DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Felipe Bento de Albuquerque¹, Thiago Assis de Oliveira Silveira², Fábio Pereira Fagundes³, Keila R. Santana Fagundes⁴

¹ Universidade Potiguar, Mestrado Profissional em Petróleo e Gás – felipebento20@yahoo.com.br

² Universidade Potiguar, Mestrado Profissional em Petróleo e Gás – thiag.assis@yahoo.com.br

³ Universidade Federal Rural do Semiárido, Engenharia de Petróleo – keilaregina@ufersa.edu.br

⁴ Universidade Potiguar, Mestrado Profissional em Petróleo e Gás – fabiofagundes_unp@yahoo.com.br

RESUMO

Durante o processo de perfuração de um poço de petróleo, a remoção dos cascalhos representa um dos principais procedimentos, de modo que uma boa eficiência nesse parâmetro é responsável pela redução dos custos e otimização do tempo de operação. Por outro lado, a formação de leitos fixos e estacionários (deficiência no carregamento dos sólidos) pode trazer sérios problemas como a redução da taxa de penetração, desgaste prematuro das brocas, obstrução do anular (prisão de coluna), perda de circulação e, em casos extremos, à necessidade de abandono do poço. Dessa forma, a limpeza do poço está relacionada diretamente com a velocidade com que os sólidos se sedimentam através do fluido de perfuração, sendo essa grandeza afetada por parâmetros como densidade e viscosidade do fluido, diâmetro e densidade dos sólidos, regime de fluxo, excentricidade da coluna, desvio de verticalidade e taxa de penetração. Diante desse cenário, torna-se de extrema importância avaliar os principais mecanismos responsáveis pelo carreamento dos cascalhos durante a perfuração de poços de petróleo. Baseado nesse exposto, o objetivo principal desse trabalho consiste em avaliar a interação dos principais mecanismos de transporte cascalho/fluido de perfuração na hidráulica de poços, utilizando correlações matemáticas que estimem a velocidade de sedimentação dos cascalhos utilizando modelagem fatorial. Um planejamento fatorial (STATISCA 7.0) foi adotado a fim de otimizar e avaliar qual parâmetro terá maior influência na eficiência de limpeza do poço. Superfícies de respostas foram geradas de forma a mapear as melhores condições para a remoção dos cascalhos. Resultados apontam que a viscosidade do fluido e sua interação com o diâmetro da partícula foram responsáveis por governar a dinâmica de queda de partícula, ou seja, a velocidade de sedimentação dos cascalhos no poço, apresentando uma região ótima de eficiência com valores de 0,0015 - 0,0020 m (Diâmetro de partícula) e 30 - 50 cP (viscosidade do fluido).

Palavras-chave: Limpeza de poço, Velocidade de Sedimentação, Perfuração, Superfície de resposta

1. INTRODUÇÃO

A hidráulica é um dos mais importantes fatores que influenciam o desempenho da perfuração. Durante a perfuração é muito importante conhecer os limites operacionais

que vão garantir a segurança da operação. Esses limites estão diretamente ligados à janela operacional e conseqüentemente aos valores do gradiente de pressão de poros e de fraturas. Existem outros parâmetros que também são relevantes para um projeto

hidráulico bem sucedido como, por exemplo, maximizar a taxa de penetração, dimensionar os jatos da broca, a vazão de injeção e a pressão de bombeio, os quais têm influência direta na limpeza do poço (Pilehvari *et al.*,1999). Uma limpeza inadequada pode fazer com que esses cascalhos gerados acumulem no fundo do poço formando um leito que afeta o andamento da perfuração, como pode ser visualizado no modelo ilustrativo proposto por Clark & Bickmam (1994) (Ver Figura 1).

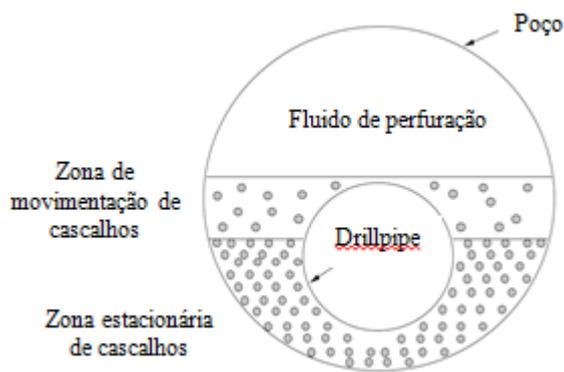


Figura 1: Seção do poço com formação de leitos (cascalho).

Diversos problemas podem ocorrer devido à formação de leito, como por exemplo, redução da taxa de penetração, perda de circulação, prisão da coluna e torque excessivo. Existem inúmeras variáveis responsáveis por ditar os mecanismos inerentes à limpeza do poço: a velocidade média 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 (Bassal, 1995).

Trabalhos vêm sendo realizados ao longo dos anos por diversos pesquisadores com o intuito de determinar os parâmetros mais relevantes em função das principais variáveis que influenciam a remoção eficiente dos cascalhos durante a perfuração de poços de petróleo (Jefferson & Zamorra, 1995; Azar & Sanchez, 1997; Li & Walker, (1999); Kelessidis & Mpandelis, 2003).

Em poços inclinados e de grande afastamento (com relação à vertical) uma atenção maior deve ser dada ao mecanismo de transporte de sólidos pelo fluido de perfuração. Neste caso, no trecho de alta inclinação existe uma tendência dos cascalhos separarem-se da suspensão formando um leito na parte inferior. Neste caso, as forças devido à gravidade e ao arraste não atuam na mesma direção. Enquanto a primeira age na direção vertical, a segunda atua na direção do poço, conforme mostrado na Figura 2. Deste modo, a força gravitacional decomposta em duas componentes ortogonais gera uma força na direção do escoamento e outra na direção perpendicular ao eixo do poço. A primeira componente tende a atrasar a ascensão das partículas em suspensão, enquanto que a segunda empurra os sólidos na direção da parede inferior do poço, tendendo a formar um leito.

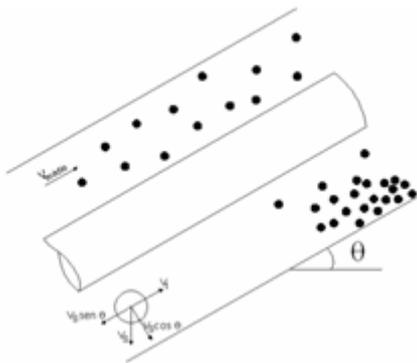


Figura 2: Transporte de sólidos em trechos inclinados e horizontais.

Para que se obtenha uma eficiente limpeza do poço, é preciso conhecer a velocidade com que os cascalhos se sedimentam e quais os parâmetros que influenciam essa velocidade de queda. Em linhas gerais, a velocidade de sedimentação (velocidade de queda) (V_s) de uma partícula em um fluido não newtoniano depende de sua viscosidade aparente, que por sua vez está relacionada à taxa de cisalhamento entre a partícula e o fluido de perfuração. Outro ponto importante refere-se à esfericidade dos sólidos gerados pela broca (não são totalmente esféricos) e o meio onde ocorre a sedimentação (não tende ao infinito). De acordo a literatura, a equação de Stokes não leva em consideração a concentração de sólidos e efeitos de parede, requerendo, portanto, ajustes na equação (Ver Equação 1).

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\eta} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde V_s representa a velocidade de sedimentação (m/s), g gravidade (m/s^2), d_p o diâmetro de partícula (m), η viscosidade aparente (pa.s ou kg/ms). Consideração: Baixo número de Reynolds.

Nesse contexto o objetivo desse trabalho consiste em mapear o efeito da densidade do fluido e da partícula, viscosidade do fluido, tamanho de partícula, esfericidade e concentração de sólidos. Correlações matemáticas serão utilizadas a fim de gerar superfícies de resposta e gráficos de Pareto (Software Statistic 7.0) para avaliar a eficiência de limpeza do poço.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Diferentes correlações matemáticas foram utilizadas em um mesmo cenário, com as mesmas características, possibilitando, assim, a análise comparativa de cada um dos modelos.

2.1 Correlações matemáticas - Equação de Stokes/Stokes corrigida

A Tabela 1 mostra os parâmetros utilizados para cálculo de velocidade de sedimentação utilizando a Equação de Stokes e sua correção para cálculo da velocidade de sedimentação de partícula – Esfericidade, concentração de sólidos e efeito de parede: Nível mínimo (-1), central (0), máximo (+1).

Tabela 1: Variáveis estudadas para mapeamento da velocidade de sedimentação.

Equação de Stokes	
$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\eta}$	
PARÂMETROS	Níveis estudados
Viscosidade (cP)	1 (-1)
	25 (0)
	50 (+1)
Densidade do fluido (lb/gal)	8,5 (-1)
	10 (0)
	13 (+1)
Diâmetro da partícula (m)	0,001 (-1)
	0,0025 (0)
	0,005 (+1)

Correção da Equação de Stokes

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\eta} (k_e)(k_\beta)(k_{cv})$$

PARÂMETROS	NÍVEIS ESTUDADOS
Densidade do fluido (lb/gal)	8,5 (-1)
	10 (0)
	13 (+1)
Esfericidade	0,4 (-1)
	0,6 (0)
	0,8 (+1)
Concentração dos sólidos (%)	25 (-1)
	50 (0)
	75 (+1)
Viscosidade aparente – 10 cp	
Diâmetro de partícula – 0,0025 m	

Os sólidos gerados pela broca não são esféricos e o meio onde ocorre a sedimentação não tende ao infinito. Além disso, a equação de Stokes não leva em consideração a concentração de sólidos e efeitos de parede, requerendo, portanto, ajustes na equação (Pinto *et al*, 2010). Dessa forma, a Equação de Stokes corrigida é um conjunto sequencial de equações que refletem a esfericidade (Equação 2), efeito da correção de parede (Equação 3) e a concentração dos sólidos (Equação 4).

$$k_e = 0.843 \log\left(\frac{\varepsilon}{0.065}\right) \quad \text{Eq.2}$$

Onde: k_e representa o efeito de correção da esfericidade e ε representa a esfericidade.

$$k_\beta = \left(\frac{1 - \beta}{1 - 0.475\beta}\right)^4$$

$$\beta = \frac{d_p}{(D_T - D_c)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: k_β representa o efeito de correção de parede, d_p representa o tamanho de partícula (m) e $D_T - D_c$ a diferença da parede do poço e o diâmetro externo da tubulação (m).

Consideração: Poço de 9^{1/2}" e drillpipe de 5" polegadas.

$$k_{cv} = \frac{1}{1 + 2.5C_s} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: k_{cv} representa o efeito da concentração dos sólidos e C_s representa a concentração de sólidos. A Equação 5 é o resultado das equações sequenciais 2, 3 e 4.

$$v_s = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\eta} (k_\varepsilon)(k_\beta)(k_{cv}) \quad \text{Eq. 5}$$

2.2 Mapeamento da velocidade de sedimentação por modelagem fatorial

STATISCA 7.0 - MSR

Para mapeamento das altas taxas de limpeza do poço, uma série de variáveis foram otimizadas através da análise estatística experimental (DOE – Design of experiments), por metodologia de superfície de resposta (MSR). As variáveis a serem analisadas foram: velocidade do fluido, tamanho de partícula e fator de fricção. MSR é uma técnica estatística de grande utilidade na investigação e otimização de trabalhos complexos, que permite a avaliação dos múltiplos parâmetros independentes, ou combinados entre si, na resposta final do processo. O sistema utilizado foi o STATISCA 7.0, onde foi utilizada uma combinação estratégica das variáveis através dos mínimos quadrados, conhecido na literatura como MLR (*Multiple Linear Regression*).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de avaliar o efeito estatístico que cada variável exerce sobre a velocidade de sedimentação (resposta), diagramas de Pareto foram gerados em função de cada correlação matemática estudada.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, o Diagrama de Pareto obtido em função da Equação de Stokes e da equação de Stokes corrigida com os respectivos efeitos lineares e quadráticos de cada interação.

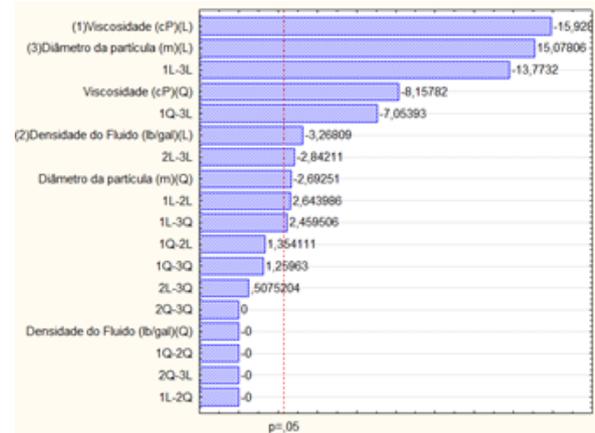


Figura 3: Diagrama de Pareto obtido em função da Equação de Stokes

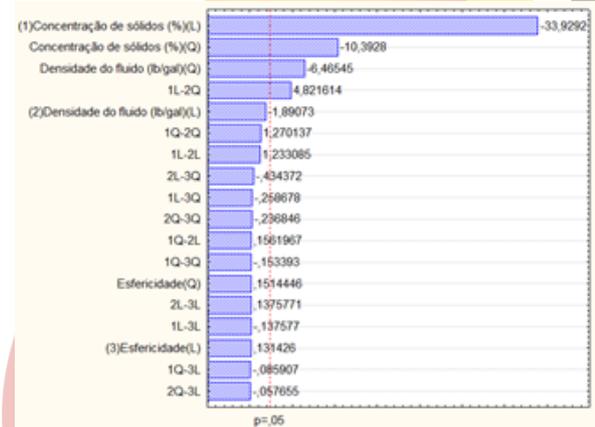


Figura 4: Diagrama de Pareto obtido em função da Equação de Stokes corrigida.

De acordo os dados apresentados pelos diagramas de Pareto foi possível correlacionar o mapeamento da superfície de resposta para os sistemas utilizados. As Figuras 5 e 6 mostram o mapeamento da velocidade de sedimentação em função de cada parâmetro estudado.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

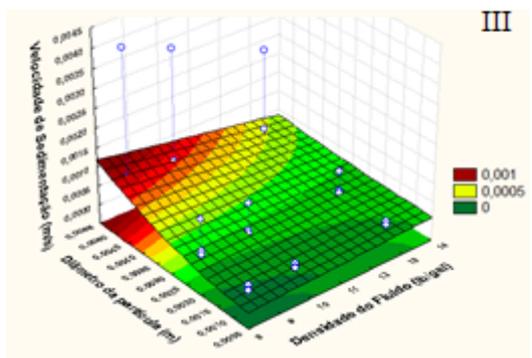
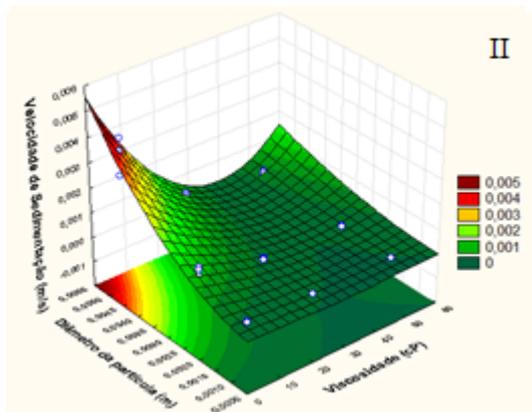
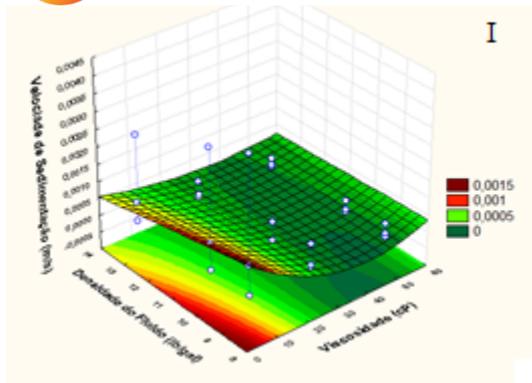


Figura 5: Superfície de resposta gerada em função das variáveis estudadas da Equação de Stokes: (I) Diâmetro de partícula versus viscosidade, (II) Diâmetro de partícula versus densidade do fluido, (III) Densidade do fluido versus viscosidade do fluido.

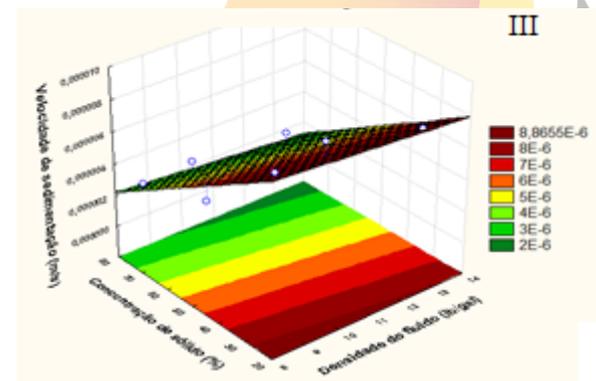
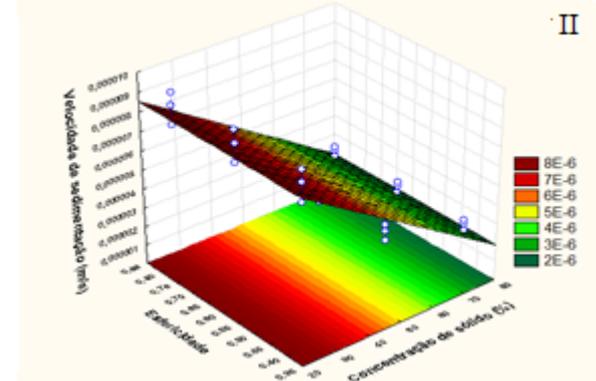
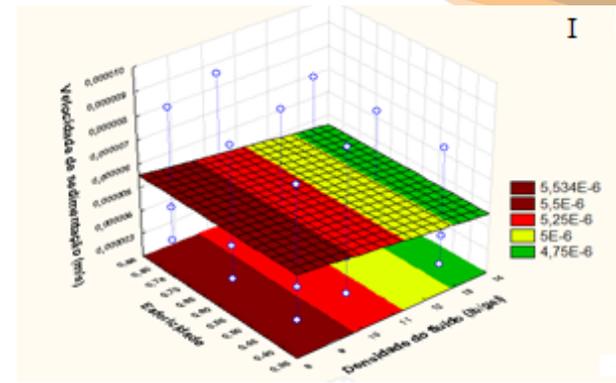


Figura 6: Superfície de resposta em função das variáveis estudadas da equação corrigida de Stokes: (I) Esfericidade versus densidade do fluido, (II) Esfericidade versus concentração do sólido, (III) concentração do sólido versus densidade do fluido.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

De acordo com apresentados na Figura 5.I (equação de Stokes), a metodologia de superfície de resposta (MSR) indicou que a viscosidade do fluido (1L - efeito linear) e sua interação com o diâmetro da partícula (1L-3L) (Figura 5.II) foram responsáveis por ditar a velocidade de sedimentação dos cascalhos no poço, apresentando uma região ótima de eficiência com valores de 0,0015 - 0,0020 m (Diâmetro de partícula) e 30 – 50 cP (viscosidade do fluido). Em linhas gerais, observa-se que quanto maior for a viscosidade do fluido juntamente com a redução do tamanho de partícula menor será a velocidade de sedimentação. Por outro lado, vale salientar que um aumento na viscosidade do fluido poderá, provavelmente, aumentar as perdas de cargas e consequentemente dificultar a circulação do fluido no poço. Além disso, também é possível observar que a densidade do fluido apresentou um efeito não considerável quanto à limpeza do poço utilizando a situação proposta, fato esse, comprovado através do Diagrama de Pareto, o qual mostrou estatisticamente efeitos lineares ou quadráticos inferiores comparados às demais variáveis estudadas.

A Figura 6 mostra as superfícies de resposta utilizando uma correção da Equação de Stokes, a qual leva em consideração os efeitos de parede, da esfericidade do cascalho e da sua concentração durante a perfuração.

Claramente, observa-se que a concentração de sólidos representa um importante parâmetro a ser avaliado com efeitos lineares e quadráticos bem definidos. Quanto menor a concentração de sólidos menor será a velocidade de sedimentação. Por outro lado, a densidade do fluido apresentou um controle de campo reduzido. Certamente, o controle da velocidade de sedimentação dos cascalhos poderia ser realizado pelo aumento desse parâmetro, no entanto, poderia se conduzir a fraturas na formação, assim como, um aumento na vazão de fluido poderia gerar uma maior perda de carga no espaço anular, o que aumentaria a densidade de circulação equivalente (ECD), podendo causar kicks e perdas de circulação em poços que tenham uma janela operacional estreita entre o gradiente de pressão de poros e o gradiente de fratura. A esfericidade não apresentou efeito estatístico, assim como, nenhuma interação significativa com as demais variáveis estudadas. É um parâmetro que difícil controle pois dependerá muito do tipo de broca e a fase do poço em que se está perfurando. A Equação de Stokes corrigida apresentou valores de velocidade de sedimentação inferiores ao da Equação de Stokes padrão, por essa razão, é de extrema relevância que se utilize o cenário menos favorável, sendo assim, para os sistemas avaliados, a equação de Stokes sem correção

www.conepetro.com.br

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

apresenta uma maior confiabilidade, tendo em vista, os maiores valores de velocidade de sedimentação.

4. CONCLUSÕES

A metodologia de superfície de resposta (MSR) indicou que a viscosidade do fluido e sua interação com o diâmetro da partícula foram responsáveis por governar a dinâmica de queda de partícula, ou seja, a velocidade de sedimentação dos cascalhos no poço, apresentando uma região ótima de eficiência com valores de 0,0015 - 0,0020 m (Diâmetro de partícula) e 30 – 50 cP (viscosidade do fluido).

A equação de Stokes apresentou uma maior confiabilidade nos cenários estudados comparados à equação com incremento de esfericidade e efeito de parede.

A esfericidade não apresentou efeito estatístico e certamente de difícil controle no poço.

O mapeamento das principais interações entre as variáveis responsáveis por governar a dinâmica de queda de partículas no poço é uma ferramenta indispensável para o entendimento dos mecanismos que ditam a limpeza do poço. Testes vêm realizados com diferentes cenários e correlações matemáticas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

BASSAL, A.A. **A Study of the Effect of Drill Pipe Rotation on Cutting Transport in Inclined Wellbores.** Tese de Mestrado, U. of Tulsa, Tulsa, OK, 1995.

CLARK, R.K., BICKHAM, K.L., **A Mechanistic Model for Cuttings transport,** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 25-28 September, New Orleans, Louisiana, 1994.

JEFFERSON, D., ZAMORRA, M. **Hole Cleaning and Suspension in Horizontal Wells.** In: 3rd Annual North American Conference on emerging Technologies – Coiled and Horizontal Wells. Calgary. 1995.

KELESSIDIS, V.C. e MPANDELIS, G.E. **Flow Patterns and suspension velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled – Tubing Drilling.** In: SPE/ICOTA Coiled Tubing Conference. Houston, Texas, 2003.

LI, J. e WALKER, B.J. **Sensitivity Analysis of Hole Cleaning Parameters. In Directional Wells.** In: SPE/ICOTA Coiled Tubing Roundtable. Houston, Texas, 1999. SPE 54498.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

PILEHVARI, A.A., J.J. AZAR, J.J., AND SHIRAZI, S.A., 1999. **“State-of-the-Art Cuttings Transport in Horizontal Wellbores”**, SPE Drill & Completion, Vol. 14 , No. 3.

PINTO, G. H. V. P., GANDELMAN, R.A. and MARTINS, A.L. **Development of a Methodology to Predict Solids Concentration Profile Along the time During Pumps-off Periods.** In: SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition, Lima, Peru, 2010. SPE 122069.



[www.conepetro.com.](http://www.conepetro.com.br)

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br