



ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE CASCALHOS DURANTE A PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DE CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS

Galileu Genesis Pereira de Sousa¹, Álvaro Plínio Gouveia Cabral¹, Felipe Bento de
Albuquerque², Everton Notreve Rebouças Queiroz Fernandes³, Fabio Pereira Fagundes³,

¹Universidade Potiguar, Graduado em Engenharia de Petróleo, galileugenesis@gmail.com

¹Universidade Potiguar, Graduado em Engenharia de Petróleo, plinio_gc@hotmail.com

²Universidade Potiguar, Mestrando em Engenharia de Petróleo, felipebento20@yahoo.com.br

³Universidade Potiguar, Professor de pós-graduação em Engenharia de Petróleo, ewerton1100@gmail.com

³Universidade Potiguar, Professor de pós-graduação em Engenharia de Petróleo,
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 quesito diminui os custos e otimiza o tempo de operação. Por outro lado, a deficiência no carregamento dos sólidos pode trazer sérios problemas como a redução da taxa de penetração e vida útil das brocas, obstrução do anular, prisão de coluna e, em casos extremos, à necessidade de abandono do poço. 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 dos sólidos, densidade dos sólidos e regime de fluxo. Tendo em vista esse cenário, o presente trabalho visa correlacionar a aplicação dos modelos matemáticos de *Stokes*, *Chien* e *Moore* com a eficiência de limpeza de poços de petróleo, associando os parâmetros mencionados anteriormente à velocidade de sedimentação e eficiência de remoção dos sólidos gerados durante a perfuração. Resultados mostraram uma conformidade entre as correlações avaliadas, assim como, fica evidenciada a forte dependência com os regimes de fluxos utilizados e as correlações propostas.

Palavras-chave: limpeza de poço, velocidade de sedimentação, eficiência de remoção dos cascalhos.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência do carregamento de cascalhos no poço é afetada por vários fatores, como velocidade média do fluido no anular, velocidade de sedimentação dos sólidos, 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 (GHADE *et al.*, 2008). Caso não se tenha um bom carregamento, ocorrerá o acúmulo de sólidos no anular o que pode gerar

problemas à perfuração, como: Redução da taxa de penetração da broca ((ROP), perda de circulação, obstrução do anular e prisão da coluna de perfuração (PARBOTSAVA *et al.*; 2011; ALMEIDA *et al.*, 2007; MACHADO, 2002). O transporte dos cascalhos gerados pela broca durante a perfuração é um dos principais objetivos do fluido de perfuração. A eficiência e a capacidade desse transporte dependem das características reológicas do fluido e da capacidade das bombas utilizadas no processo. Para que se obtenha uma boa eficiência de limpeza, é preciso conhecer a velocidade com que os cascalhos se



sedimentam e quais os parâmetros que influenciam essa velocidade de queda, como pode ser visualizado na Figura 1 (SHAH et al., 2007; MARTINS et al., 2003; MIMS, 2003).

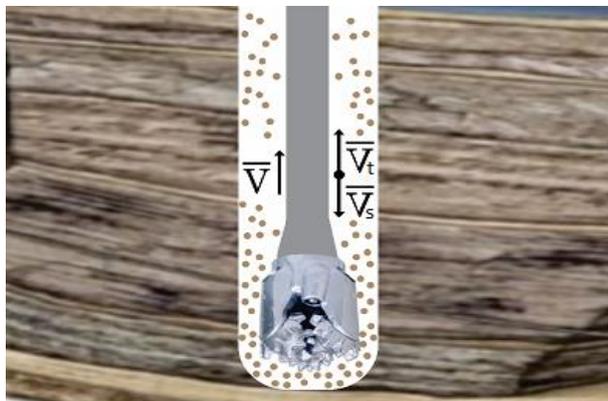


Figura 1 - Velocidades atuantes durante o carregamento dos cascalhos (Fonte: Machado, 2002)

Existem várias correlações matemáticas para estimar o cálculo da velocidade de queda de partículas, sendo as mais usuais devido a sua simplicidade matemática, as correlações de Moore, de Chien (BOURGOYNE, 1986) e a Equação de Stokes. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho consiste em correlacionar a aplicação desses modelos matemáticos à eficiência de limpeza de poços de petróleo, associando os parâmetros mencionados anteriormente à velocidade de sedimentação e eficiência de remoção dos sólidos gerados durante a perfuração.

2. METODOLOGIA

Foram analisadas as correlações propostas por Moore (BOURGOYNE, 1986), Chien (BOURGOYNE, 1986) e a Equação de Stokes (RYAN, 1959). Cada expressão foi analisada em um mesmo cenário, com as mesmas características, possibilitando assim a análise comparativa de cada um dos modelos. A tabela 1 resume o planejamento utilizado e suas respectivas faixas de variação:

Tabela 1 – Planejamento dos parâmetros a serem avaliados frente as correlações matemáticas.

Parâmetro	Valor Constante	Faixa de Variação
Massa Específica do Fluido (lb/gal)	9,0	8,5 - 12,5
Massa Específica do Sólido (lb/gal)	21	20 - 22
Diâmetro dos Sólidos (in)	0,3	0,2 - 0,39
Viscosidade Aparente (cP)	130	60 - 260

Dessa forma, foi analisada a confiabilidade de cada correlação com relação a cada parâmetro individualmente, os quais foram variados nas faixas descritas na tabela 1, enquanto as demais variáveis foram mantidas constantes. Posteriormente, foram gerados gráficos das velocidades de sedimentação em função dos parâmetros variados, o que permitiu fazer uma análise comparativa das correlações. Em seguida, foram feitas correlações entre a eficiência de limpeza do poço e a velocidade de remoção dos cascalhos (Equação 1 e 2), para cada parâmetro de cada correlação, com relação a diferentes faixas de vazão de bombeio (200 - 1200 galões/minuto - gpm).

$$V_r = V - V_s \quad [1]$$

$$\varepsilon = \left(\frac{V_r}{V}\right) \cdot 100 \quad [2]$$

Onde: V_r – representa a velocidade de remoção dos cascalhos, V – velocidade do fluido e V_s – Velocidade de remoção e ε = eficiência (%).

Correlações utilizadas para cálculo da velocidade de sedimentação

A equação de Stokes (Equação 3) foi usada para aplicações simplificadas de cálculo da velocidade terminal de sedimentação (MACHADO, 2002).



$$V_s = \left[2 \cdot \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho} \cdot \left(\frac{D_p \cdot g}{C_r} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3]$$

A correlação de Moore foi empregada de acordo com o número de Reynolds considerado. Para números de Reynolds (NRs) intermediários, é acrescentada a influência da viscosidade aparente do fluido na correlação, como pode ser visualizado nas Equações 4 e 5 (MACHADO, 2002)..

Para NRs < 300:

$$V_s = \frac{2,90 d_s (\rho_s - \rho_f)^{0,667}}{\rho_f^{0,333} \cdot \mu_a^{0,333}} \quad [4]$$

Para NRs > 300:

$$V_s = 1,54 \sqrt{d_s \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}} \quad [5]$$

A correlação proposta por Chien é estruturalmente diferente da proposta por Moore, porém é baseada nos mesmos parâmetros, ver equação 6.

$$V_s = 0,0075 \left(\frac{\mu_a}{\rho_f \cdot d_s} \right) \left[\sqrt{\frac{36800 \cdot d_s \cdot (\rho_s - \rho_f)}{(\frac{\mu_a}{\rho_f \cdot d_s})^2 \cdot (\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f})} + 1} - 1 \right]$$

Onde:

μ_a = Viscosidade aparente [mpa.s];

V_s = Velocidade de Sedimentação [ft/min]

ρ_s = Massa Específica da Partícula [lb/gal]

ρ_f = Massa Específica do Fluido [lb/gal]

d_s = Diâmetro Equivalente de Partícula [in]

C_r = Coeficiente de Atrito do Fluido

g = Aceleração da Gravidade

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentadas as correlações entre a eficiência de remoção dos cascalhos e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. As Figuras 2, 3, 4 e 5 representam a correlação proposta por Moore em função da massa específica do fluido, massa

específica dos sólidos, diâmetro das partículas e viscosidade aparente, respectivamente.

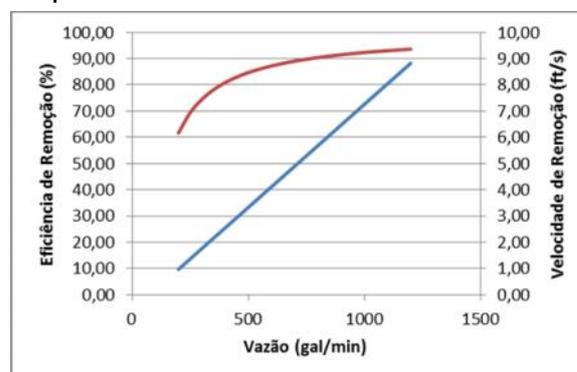


Figura 2 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Moore, NR < 3 – Efeito da massa específica do fluido.

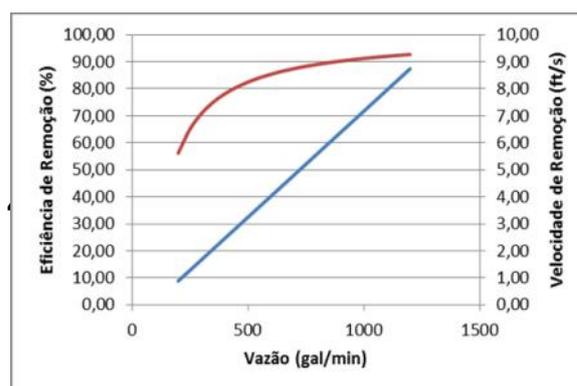


Figura 3 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Moore, NR < 3 – Efeito da massa específica dos sólidos.

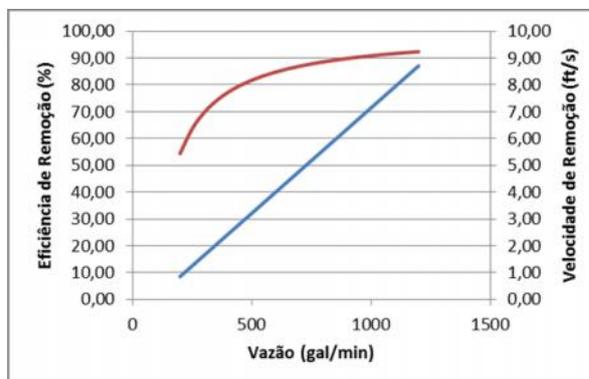


Figura 4 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Moore, NR < 3 – Efeito do diâmetro das partículas.

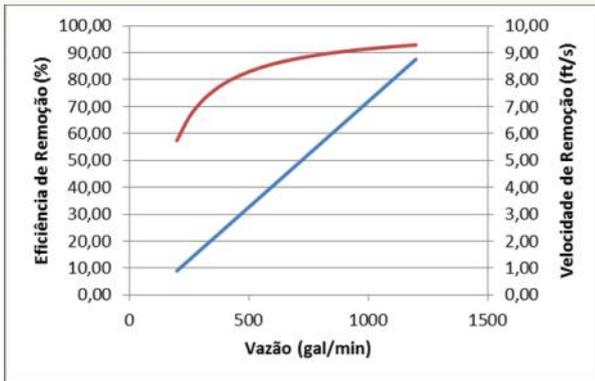


Figura 5 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Moore, $NR < 3$ – Efeito da viscosidade aparente do fluido.

De acordo com os resultados apresentados, é possível ter uma eficiência de limpeza do poço satisfatória mesmo para vazões de bombeio baixas. O comportamento observado no fluxo laminar mostra que os parâmetros tem um efeito próximo em relação à velocidade de queda da partícula. A mesma estratégia foi utilizada para a avaliação da eficiência de remoção dos cascalhos no poço em função do $3 < NRs < 300$ e $NRs > 300$. Os resultados mostraram um menor incremento se comparados com os dados anteriores, porém apresentando a mesma tendência para um valor limite de eficiência de limpeza. A velocidade de remoção se comportou de modo semelhante com o regime laminar mostrado anteriormente. As Figuras 6, 7, 8 e 9 representam a correlação proposta por *Chien* em função da massa específica do fluido, massa específica dos sólidos, diâmetro das partículas e viscosidade aparente, respectivamente.

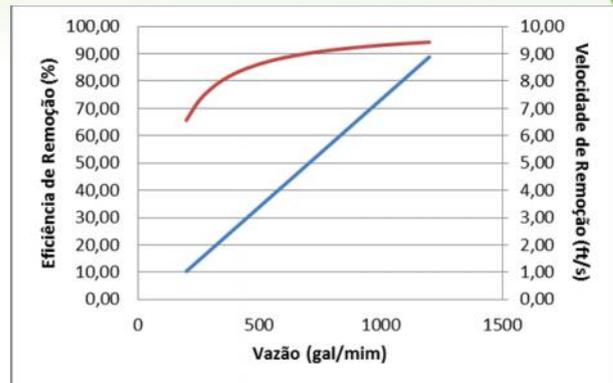


Figura 6 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Chien – Efeito da massa específica do fluido.

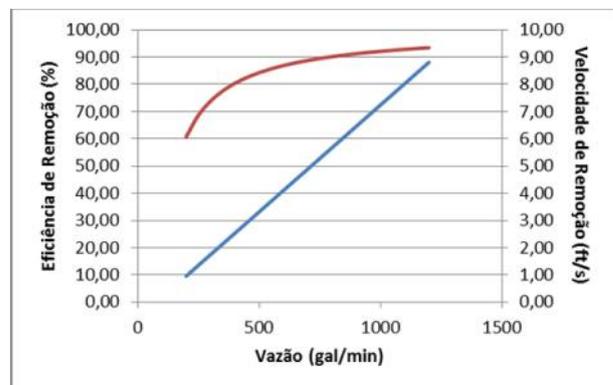


Figura 7 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Chien – Efeito da massa específica do sólido.

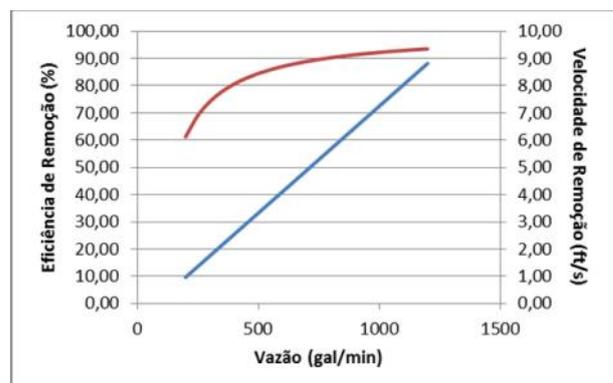


Figura 8 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Chien – Efeito do diâmetro de partícula.

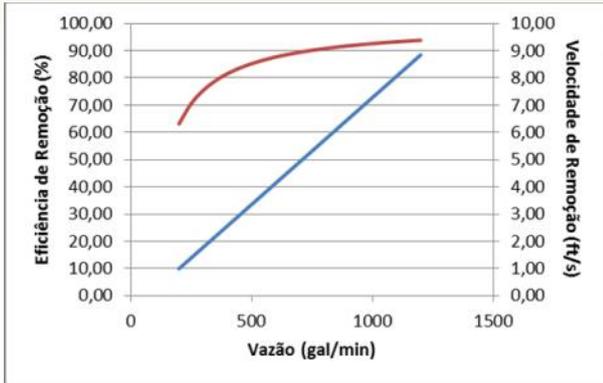


Figura 9 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Chien – Efeito da viscosidade aparente.

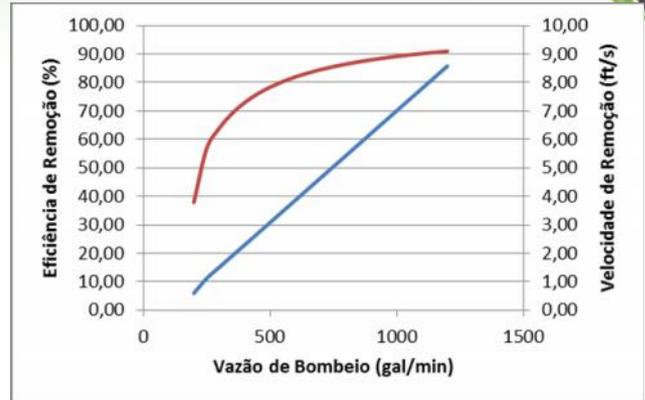


Figura 11 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Stokes – Efeito da massa específica do sólido.

Os valores obtidos apresentam similaridade quanto ao incremento dos parâmetros quando comparados com a correlação de Moore para regimes de fluxo laminar, de modo que, em baixas vazões de bombeio, são obtidas eficiência de remoção acima de 60%. Comparativamente, com a correlação de Stokes, para esse cenário, foram obtidos resultados baixos de eficiência de remoção dos cascalhos quando se considerou baixos valores de vazões e em regime turbulento. Por outro lado, vazões superiores a 400 gal/min apresentou uma melhor eficiência na remoção dos cascalhos, como pôde ser visualizado nas Figuras 10, 11, 12 e 13, respectivamente.

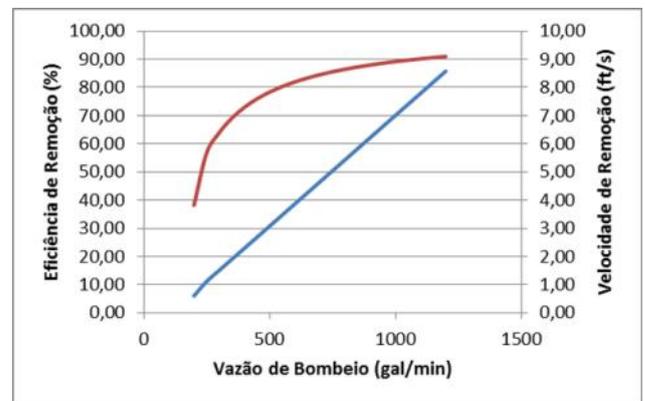


Figura 12 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Stokes – Efeito do diâmetro de partícula

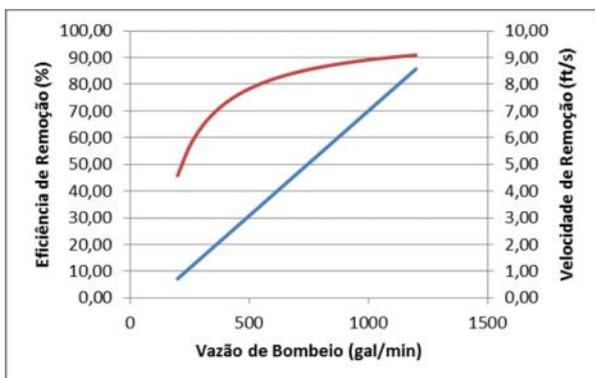


Figura 10 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Stokes – Efeito da massa específica do fluido.

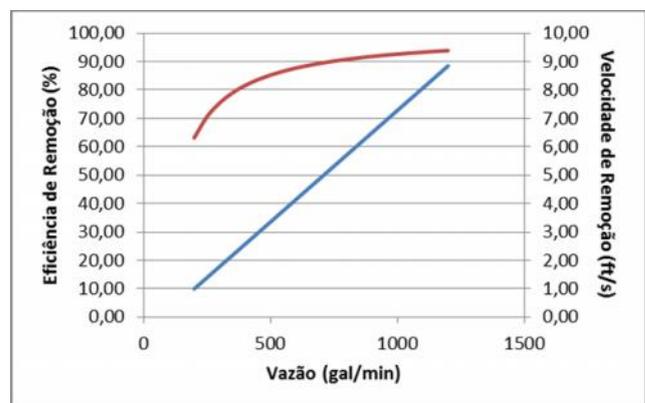


Figura 13 - Correlação entre a eficiência de remoção e a velocidade de remoção em função da vazão de bombeio. Correlação de Stokes – Efeito da viscosidade aparente.



Com base em dados obtidos a partir das equações propostas por Stokes, fica clara a dependência da limpeza do poço em relação ao regime de fluido adotado (Dados de regime laminar e transiente não foram apresentados, em virtude da similaridade de comportamento com as demais correlações). Os valores da eficiência de limpeza (%) do poço mostram valores extremamente altos, superiores a 99% em regime laminar, ao passo que, para regimes turbulentos, a eficiência de remoção atingiu patamares próximos de 40%.

4. CONCLUSÕES

Resultados mostraram uma conformidade entre as correlações avaliadas. Os valores de velocidade de sedimentação, segundo a Correlação de Moore, foram menores para o regime transitório, o que mostra que nesse cenário as partículas seriam carregadas com mais facilidade. Já o regime turbulento apresentou os valores mais elevados. A correlação de Stokes apresentou anomalia nos resultados para o regime transitório, o que mostra que essa equação não seria a mais adequada para a aplicação neste regime de escoamento. Com relação à eficiência de limpeza, os valores obtidos foram bastante semelhantes para todas as correlações analisadas. O regime transitório também apresentou as melhores eficiências na limpeza do poço, contrariamente aos valores obtidos para o regime turbulento. A vazão de bombeio tem influência direta na eficiência de remoção dos cascalhos, tendo em vista dependência da velocidade de remoção do fluido. No entanto, em todos os casos estudados existe um ponto ótimo de vazão que deverá ser correlacionado com as propriedades reológicas do fluido, diâmetro médio e densidade de partículas. Dessa forma, os modelos propostos por *Moore* e *Chien* apresentam uma maior confiabilidade dos resultados

referentes à eficiência de limpeza de poços. Além disso, foi verificado que o regime transitório apresentou uma maior eficiência na remoção de cascalhos do poço.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. W. F.; COSTA, S. S.; FONTOURA, S. A. B. **Estudo de Correlações de Velocidade de Sedimentação de Partículas Para Fluidos Não newtonianos Aplicados a Problemas de Limpeza de Poços de Petróleo**. 4º PDPETRO. Campinas-SP, 2007.

BOURGOYNE, A. T. MILHEIM, M. E.; CHENEVERT, F. S. **Applied Drilling Engineering. SPE textbook Series**. Vol. 2, 1986.

GHADGE, R; MONTANTE, G; PAGLIANTI, A; MAGELLI, FAJNER, D. **Solids distribution and rising velocity of buoyant solid particles in a vessel stirred with multiple impellers**. Chemical Engineering Science, 2008, v.63, p.5876-5882.

HUILGOL, R.R. **Systematic procedure to determine the minimum pressure gradient required for the flow of viscoplastic fluids in pipes of symmetric cross-section**. J. Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 136, p. 140–146, 2006.

MACHADO, J. C. **Reologia e Escoamento de Fluidos**. Interciência, 2002, p. 255.

MARTINS, A. L.; VILLAS-BOAS, M. B.; Taira, H. S. **Real time monitoring of hole cleaning on a deepwater Extend Well**. SPE Drilling conference, 2003.



MIMS, M. **Drilling Design and implementation for extended Reach and Complex Wells.** 3rd ed., United States, 2003.

PABORTSAVA, K.; PURSER, A.; WAGNER, H. , THOMSEN, L. **The influence of drill cuttings on physical characteristics of *phytodetritus*.** Marine Pollution Bulletin, 2011, Vol. 62, p.2170-2180.

RYAN, N. W.; JOHNSON, M. M. **Transition from laminar to turbulent flow in pipes.** AIChE Journal, v.5 (4), p.433–435, 1959.

SHAH, S. N.; FADILI, Y. E.; CHHABRA, Y. **New model for single spherical particle settling velocity in power law (visco-elastic) fluids.** International Journal of Multiphase Flow, 2007, Vol.33, p.51-66.150198.html#adsense1>. Acesso em: 20 jan. 2015.