

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

A SEPARAÇÃO DA BARITA DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO PARA PROMOVER UMA PERFURAÇÃO COM DUPLO GRADIENTE

Aline T. Carvalho e Ricardo A. Medronho

Depto. Eng. Química, Escola de Química, Centro de Tecnologia/UFRJ, Ilha do Fundão,
21949-900, Rio de Janeiro, Brasil, medronho@eq.ufrj.br

Resumo – A proximidade das curvas de pressão nos poros e de fratura em perfurações sob grandes lâminas d'água torna a operação cara e complicada. Uma forma de minimizar este problema é através da redução da pressão exercida pelo fluido de perfuração na base do *riser*, de modo a originar a condição denominada de duplo gradiente de perfuração. A injeção de um fluido de perfuração com menor densidade na base do *riser* é uma possível alternativa capaz de gerar esta redução de pressão. Na presente proposta, o fluido de perfuração seria dividido em duas correntes, uma mais concentrada em barita para re-injeção na coluna de perfuração e outra mais diluída para injeção na base do *riser*. Neste trabalho, CFD foi usado para simular um hidrociclone otimizado para separação de barita do fluido de perfuração. Com os resultados das simulações foi possível obter-se uma equação para a eficiência granulométrica reduzida e calcular-se a eficiência total de separação para granulometrias distintas de barita. A geometria ótima de hidrociclone é passível de ser utilizada em perfurações com duplo gradiente, desde que a barita contida no fluido de perfuração encontre-se no limite superior da faixa recomendada para a granulometria de baritas para esta aplicação.

Palavras-Chave: perfuração; fluidodinâmica computacional; barita; riser, CFD

Abstract – The proximity of the pore pressure and fracture pressure curves in deepwater drilling makes it an expensive and complicated operation. It would be possible to minimize this problem by reducing the pressure inside the riser at the seafloor level. Injection of low density drilling mud at that point is an alternative, producing a condition called dual gradient drilling. The basic idea of the present work is to divide the drilling mud in two streams, one more concentrated in barite for re-injection into the drilling column, and other more diluted for injecting into the riser at the seafloor. In this work, CFD was used to simulate a hydrocyclone optimized for barite separation from drilling mud. Based on the results, it was possible to obtain an equation for the size efficiency and to calculate the total efficiency for different size distributions of barite. The optimized hydrocyclone can be used in dual gradient drilling, since the barite size distribution is situated at the higher limit of the recommended range for drilling mud.

Keywords: drilling; computational fluid dynamics; barite; riser; CFD.

1. Introdução

A perfuração de poços de petróleo em alto-mar tem se expandido gradativamente para águas cada vez mais profundas. Inicialmente, a perfuração *offshore* consistia na adaptação de sondas terrestres montadas sobre uma estrutura para perfurar em águas rasas, porém, com a crescente necessidade de se perfurar em águas mais profundas, desenvolveram-se novas tecnologias de ponta e técnicas de perfuração especialmente orientadas para a perfuração marítima (Thomas, 2001).

Os sistemas de perfuração convencionais quando utilizados em águas profundas, em lugares onde correntes marinhas são excessivamente fortes, encaram grandes desafios que tornam difícil, e até inviável, a perfuração sob grandes lâminas d'água. Um destes desafios é a excessiva pressão hidrostática exercida pela coluna do fluido de perfuração no fundo do poço, o que pode vir a danificar a formação. Uma forma de resolver este problema é através da utilização de um duplo gradiente de perfuração, em contraste ao gradiente de perfuração único utilizado na perfuração convencional (Smith et al., 1999).

O duplo gradiente de perfuração tem por objetivo reduzir a pressão na base do riser para, idealmente, uma pressão igual àquela que seria obtida se o riser estivesse cheio apenas com água do mar. A técnica, em si, consiste em controlar a pressão do fundo do poço pela manipulação de dois gradientes de pressão: um gerado pelo escoamento do fluido que passa pela broca de perfuração e que é mais pesado, que vai do fundo do poço ao leito marinho; e outro equivalente ao exercido pela pressão hidrostática que se estende da superfície até o fundo do mar (Smith et al., 1999; Escobar, 1999 e Forrest et al. 2001). Uma das vantagens dessa configuração é a redução do número de fases na perfuração, o que, conseqüentemente, reduzirá o número de camadas de revestimento necessárias na perfuração de um poço. Esse arranjo pode ser alcançado por inúmeras técnicas que se agrupam em duas categorias principais: *lifting* mecânico e diluição do fluido que retorna pelo anular do poço. A idéia básica do presente trabalho é dividir o fluido de perfuração em duas correntes, uma mais concentrada em sólidos particulados e outra mais diluída. Hidrociclones podem ser utilizados para separar a barita do fluido de perfuração, de modo a gerar duas correntes com densidades médias diferentes: a primeira com maior teor de barita e, portanto, mais densa, para injeção na coluna de perfuração e a segunda, menos densa, para injeção na base do riser.

2. Materiais e Métodos

As proporções geométricas do hidrociclone simulado neste trabalho foram obtidas através de otimização da sua performance visando a maximização da eficiência de separação da barita. Para tal, utilizou-se de um planejamento experimental onde foram variados 4 (quatro) parâmetros geométricos do hidrociclone: os diâmetros de entrada da alimentação, de saída da suspensão concentrada (*underflow*) e de saída da suspensão diluída (*overflow*) e o comprimento da projeção do tubo de saída do diluído no interior do corpo cilíndrico (*vortex finder*). Detalhes do planejamento podem ser encontrados em outro trabalho (Carvalho e Medronho, 2005). O hidrociclone otimizado obtido tem as proporções geométricas listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Proporções geométricas do hidrociclone otimizado para separação de barita de fluidos de perfuração, onde D_c , D_i , D_o , e D_u são os diâmetros do hidrociclone, da alimentação, do *overflow*, e do *underflow*, respectivamente; e l é o comprimento do *vortex finder*.

Parâmetro	Valor (cm)
D_c	5,00
D_i	0,79
D_o	1,70
D_u	0,73
l	0,90

Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta utilizada para simular escoamento de fluidos, que resolve as equações de conservação e fenomenológicas para um determinado domínio e condições iniciais (Versteeg e Malalasekera, 1995). Neste trabalho foi utilizado o pacote comercial CFX 5.7, da Ansys Technology. As simulações foram realizadas em microcomputador com a seguinte configuração: Pentium IV 3,0 GHz e 1024 MB de memória RAM. As malhas utilizadas neste trabalho foram tetraédricas, com elementos hexaédricos somente próximo às paredes, onde o gradiente de velocidade é maior. O tamanho médio das malhas é de 100.000 nós e 320.000 elementos. Uma ilustração da malha utilizada pode ser encontrada na Figura 1.

Quanto à modelagem utilizada, optou-se pelo modelo de turbulência SST (Menter, 1994), que é uma variação do modelo κ - ϵ utilizando o modelo κ - ω (Wilcox, 1986) para o cálculo da turbulência próximo às paredes, e pelo modelo multifásico algébrico, que utiliza a média das propriedades de transporte para a resolução das equações de balanço.

O fluido de perfuração utilizado nas simulações tem densidade de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, viscosidade 24 cp e concentração volumétrica de barita igual a 1,5%. A barita tem densidade de $4,23 \text{ g cm}^{-3}$ e os diâmetros de partícula escolhidos nas simulações para o cálculo das eficiências granulométricas foram os de 20, 40, 60, 80, 100 e 120 μm . A vazão de entrada foi mantida constante e igual a $3.000 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

As eficiências granulométrica total (G) e total reduzida (G') são dadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente, e a razão de fluido (R_f), pela Equação 3.

$$G = \frac{W_{su}|_d}{W_s|_d} \quad (1)$$

$$G' = \frac{G - R_f}{1 - R_f} \quad (2)$$

$$R_f = \frac{Q_u(1-C_{vu})}{Q(1-C_v)} \quad (3)$$

Onde $W_{su}|_d$ e $W_s|_d$ são as vazões mássicas no *underflow* e na alimentação, respectivamente. Q_u , Q , C_{vu} , e C_v são as vazões volumétricas no *underflow* e na alimentação e as concentrações volumétricas no *underflow* e na alimentação, respectivamente.

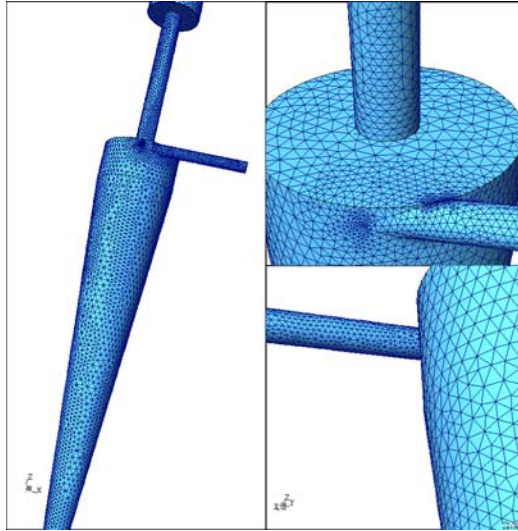


Figura 1. Detalhes da malha utilizada.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra o perfil de velocidades em um plano horizontal transversal à alimentação (a), as linhas de corrente no interior do hidrociclone (b) e o perfil de pressão no plano transversal à alimentação (c). Na Figura 2b pode-se verificar que a velocidade do fluido, alta no duto de alimentação, é rapidamente amortecida ao entrar no hidrociclone, gerando um grande gradiente de velocidades nesta região. A Figura 2b mostra o líquido movendo-se em espiras descendentes próximo às paredes e fazendo o caminho inverso na região central do hidrociclone. Na Figura 2c é possível visualizar-se a rápida variação na pressão do fluido em escoamento, ao entrar no equipamento.

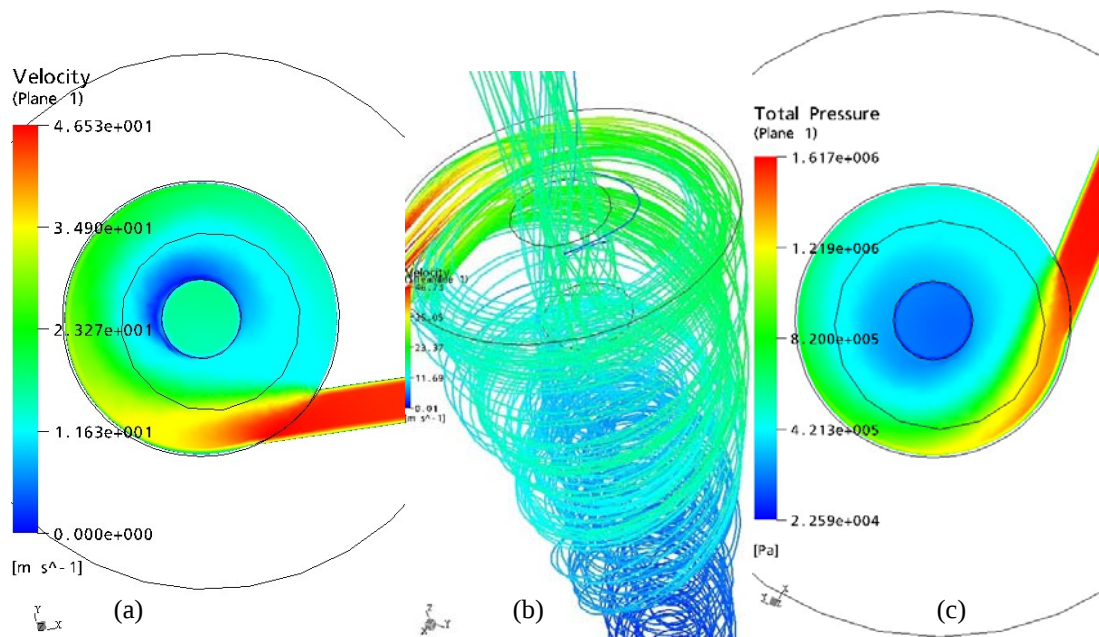


Figura 2. Perfil de velocidades em um plano horizontal transversal à alimentação (a), linhas de corrente no interior do hidrociclone (b) e perfil de pressão no plano transversal à alimentação (c).

Os resultados para as eficiências granulométrica e granulométrica reduzida obtidos através das simulações numéricas para os 6 diâmetros de partícula testados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Eficiências granulométrica (G) e granulométrica reduzida (G') para diferentes diâmetros de partícula (d).

d (μm)	R_f (%)	G (%)	G' (%)
20	26.4	29.8	4.5
40	26.2	40.1	18.9
60	25.5	56.1	41.1
80	27.5	73.2	63.0
100	25.6	86.0	81.2
120	25.8	93.5	91.2

Com os dados da Tabela 2 foi possível determinar-se a Equação 4 (Plitt, 1976). O valor do expoente encontrado encontra-se exatamente na faixa normalmente reportada na literatura (Castilho e Medronho, 2000; Coelho e Medronho, 2001).

$$G' = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{d}{68,7} \right)^{2,5} \right] \quad (4)$$

Com base na Equação (4) é possível calcular-se as eficiências total (E_T) e total reduzida (E'_T), segundo as equações abaixo:

$$E'_T = \int_0^1 G' dy \quad (5)$$

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (6)$$

Onde y é a distribuição granulométrica da alimentação, expressa como fração cumulativa menor que dado diâmetro d .

A granulometria recomendada para baritas utilizadas em fluidos de perfuração é tal que no mínimo 5 % das partículas devem ser maiores que 44 μm e no máximo 3% delas podem ter maiores que 74 μm . A Figura 3 apresenta três distribuições de tamanhos para barita que atendem a essas especificações: uma fina, uma média e uma grossa. Nesta figura, os limites estão representados pelos pontos em vermelho no gráfico.

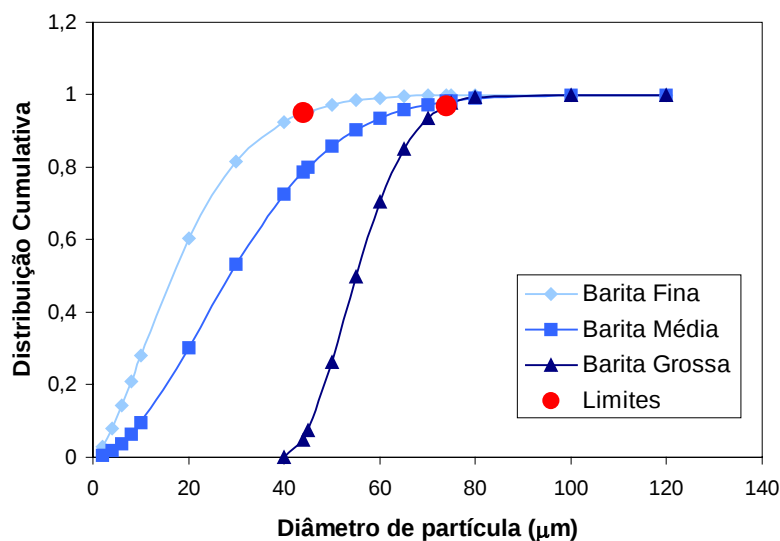


Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica para a barita

As curvas de barita fina e média obedecem a uma distribuição do tipo RRB (Rosin-Rammler-Bennet) e a de barita grossa segue o modelo de Weibull, como mostrado abaixo:

Barita fina

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{21,1} \right)^{1,5} \right] \quad (7)$$

Barita Média

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{34,8} \right)^{1,8} \right] \quad (8)$$

Barita Grossa

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d - 40}{318,1} \right)^{2,0} \right] \quad (9)$$

Com base nas Equações de 4 a 6 é possível obter-se a eficiência total reduzida E'_T e a eficiência total E_T para cada uma das distribuições de tamanhos dadas pelas Equações de 7 a 9. A Tabela 3 apresenta os valores de E'_T e E_T obtidos segundo essas equações, para uma razão de fluido R_f de 26%.

Tabela 3. Eficiências obtidas para as 3 distribuições granulométricas de barita.

Tipo de Barita	Eficiência Total Reduzida	Eficiência Total
Barita fina	6,1 %	30,5 %
Barita média	14,3 %	36,6 %
Barita grossa	35,9 %	52,5 %

Face aos resultados de eficiências total e total reduzida encontrados para as três análises granulométricas de barita testadas, pode-se concluir que o equipamento projetado só poderá vir a ser utilizado com baritas cuja distribuição de tamanhos se situe no extremo mais grosso da faixa recomendada para a composição de fluidos de perfuração.

A Figura 4 mostra as vazões e concentrações obtidas com base na simulação do hidrociclone otimizado e da barita grossa.

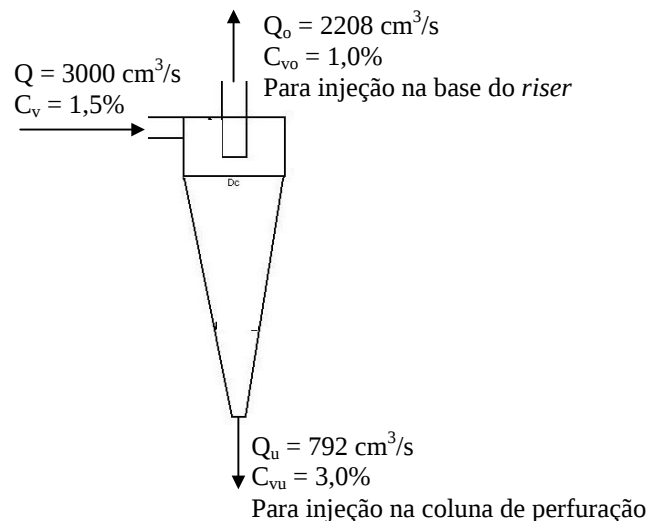


Figura 4. Vazões e concentrações no hidrociclone para a barita Grossa

Uma vazão típica de alimentação à coluna de perfuração é de $44170 \text{ cm}^3/\text{s}$ ou 700 gpm (Oliveira, 2004). Para esta vazão, e considerando que a vazão de *underflow* do hidrociclone otimizado é igual a $792 \text{ cm}^3/\text{s}$, seriam necessários 56 hidrociclones otimizados operando em paralelo.

4. Conclusões

Face aos resultados de eficiência total encontrados para as três análises granulométricas de barita testadas, pode-se concluir que o equipamento projetado só poderá vir a ser utilizado com baritas cuja distribuição de tamanhos se situe no extremo mais grosso da faixa recomendada para a composição de fluidos de perfuração.

Para produzir uma vazão típica de alimentação à coluna de perfuração de 44170 cm³/s seria necessária uma bateria com 56 hidrociclones otimizados operando em paralelo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FINEP e à Agência Nacional do Petróleo, devido ao seu Programa de Formação de Recursos Humanos para o Setor de Petróleo e Gás (PRH-ANP) e, em particular, à Escola de Química, através de seu Programa EQ-ANP (PRH 13) pelo apoio recebido.

8. Referências

- CASTILHO, L. R., MEDRONHO, R. A. A Simple Procedure for Design and Performance Prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclones, *Minerals Engineering*, 13, 183-191, 2000.
- COELHO, M. A. Z., MEDRONHO, R. A. A Model for Performance Prediction of Hydrocyclones. *Chemical Engineering Journal*, 84, 7-14, 2001.
- CARVALHO, A. T., MEDRONHO, R. A. Optimizing hydrocyclone geometry for barite separation from drilling mud. In *2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, 2005.
- ESCOBAR, A. A Simulation Study of a Mudlift Drilling System During Tripping Operations, *M.S. Thesis*, Texas A&M University, College Station, Texas, 1999.
- FORREST, N., BAILEY, T., HANNEGAN, D. Subsea Equipment for Deep Water Drilling using Dual Gradient Mud System, *paper SPE/IADC 67707* apresentado em *SPE/IADC Drilling Conference 2001*, Amsterdam, 2001.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA-Journal*, 32, 8, 1994.
- OLIVEIRA, D. S. T. Simulação Numérica de um Hidrociclone Para Separação de Esferas Ocas de Lama de Perfuração, *Projeto Final de Curso*, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 115p., 2004.
- PLITT, L. R. A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier. *CIM Bulletin*, 69, 114-123, 1976.
- SMITH, K. L., GAULT, A. D., WITT, D. E., BOTROS, F. P., PETERMAN, C. et al. Subsea Mudlift Drilling JIP: *Achieving Dual-Gradient Technology*, Deepwater Technology 1999, p. 21, 1999.
- THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, Longman, Londres, 1995.
- WILCOX, D. C. Multiscale model for turbulent flows. In *AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, NY, 1986.