

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS REOLÓGICOS NA INTERFACE ENTRE FLUIDOS NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO

Eduardo S. S. Dutra

essd@mec.puc-rio.br

Monica Feijo Naccache

naccache@mec.puc-rio.br

Paulo Roberto de Souza Mendes

pmendes@mec.puc-rio.br

Carlos A. Orofino Souto

orofino@mec.puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro - RJ - Brazil

Resumo: No presente trabalho, a interface entre dois fluidos imiscíveis escoando no interior de espaços anulares concêntricos e excêntricos é analisada numericamente utilizando o método de volumes finitos e o método “volume of fluid”, com o código comercial Fluent 6.1. O escoamento de dois fluidos adjacentes, no interior de espaços anulares, é encontrado no processo de cimentação de poços de petróleo. A lama de perfuração é deslocada pelo bombeamento da pasta de cimento, ambos fluidos não Newtonianos, através do espaço entre a coluna perfuradora e a parede do poço. Para evitar a contaminação entre a lama e o cimento, utiliza-se entre eles fluidos intermediários chamados de “colchões”, de comportamento Newtoniano. A análise da configuração da interface entre os fluidos possibilita a determinação da contaminação entre os fluidos, e consequentemente a otimização do processo. Esta análise é complexa, devido a natureza dos fluidos envolvidos e do escoamento. Neste trabalho analisa-se o efeito de parâmetros reológicos no escoamento através de espaços anulares, de um fluido Newtoniano seguido de um não Newtoniano, e vice-versa, para diferentes vazões. Os resultados obtidos mostram que fluidos com viscosidades mais elevadas são deslocadores mais eficientes e que a forma da interface não se altera muito com a excentricidade, mas sim com o regime de escoamento e com a razão de viscosidades.

Palavras-chave: reologia, escoamento multifásico, anular, excentricidade, poços

1. INTRODUÇÃO

Depois da perfuração de um poço de exploração de petróleo, a lama de perfuração que tem a função de lubrificar, resfriar a broca e remover o cascalho produzido, deve ser removida e substituída por uma pasta de cimento. Esta, após o tempo de cura, tem a função de garantir a integridade estrutural do poço. A cimentação é uma operação crucial na vida de um poço de petróleo. Para uma operação bem feita, é preciso assegurar que foi removida a maior quantidade possível de lama de perfuração existente na região anular entre a formação rochosa e a coluna

perfuradora (“casing”) ou de revestimento. Esse processo é feito de tal maneira que o cimento desloca a lama num escoamento que pode ser em regime laminar ou turbulento, numa geometria anular, em geral excêntrica. Uma vez deslocada a lama pelo cimento, este adere à parede do poço e durante um período de tempo vai adquirindo as propriedades mecânicas de interesse como aderência, resistência à compressão e impermeabilidade. Numa operação real, procura-se evitar que o cimento entre em contato com a lama impedindo uma indesejável contaminação e por consequência perda das propriedades de interesse. Entre eles escoam fluidos intermediários chamados colchões (espaçadores e lavadores). Ao contrário da lama e do cimento que são fluidos de comportamento mecânico não Newtoniano, os colchões são simples soluções de água e detergente, e tem comportamento Newtoniano.

A forma da interface entre os dois líquidos tem importante papel para um bom deslocamento. Interfaces chatas visualmente estão associadas com bons deslocamentos, em contrapartida, interfaces acentuadas e pontiagudas sugerem um fenômeno chamado de “channeling” ou canalização. Em outras palavras, o fluido deslocador tende a atravessar o deslocado, tornando o processo bastante ineficaz. Esse fenômeno indesejado pode ser provocado pelo fato do fluido deslocador ter menor viscosidade do que o deslocado, pela diferença de densidades entre os fluidos, pela assimetria do perfil de velocidade, ocasionado pela excentricidade do espaço anular, ou pelo regime de escoamento (laminar ou turbulento).

Alguns trabalhos (Haut e Crook, 1979; Haut e Crook, 1981; Sauer, 1987; Lockyear e Hibbert, 1989) citam como principais parâmetros que governam o processo de deslocamento de fluidos em poços verticais, a reologia dos fluidos ou a razão de viscosidades entre eles, a excentricidade coluna-formação, a vazão, a diferença de densidades entre os fluidos e a inclinação do poço. A influência da razão de viscosidades, da força de empuxo e do grau de turbulência no deslocamento da lama num anular excêntrico, foi analisada experimentalmente em Jakobsen et al. (1991). Os resultados obtidos mostram que o deslocamento na região mais larga é mais eficiente do que na região anular mais estreita, e que a turbulência reduz a tendência da canalização na lama na região mais estreita. Tehrani et al. (1992) estudaram teórica e experimentalmente o escoamento laminar adjacente de fluidos de perfuração através de espaços anulares, para diferentes excentricidades. Observou-se que quanto maior a excentricidade pior é o deslocamento. Para o caso do anular na vertical, quanto maior a diferença entre a densidade do fluido deslocador, que deve ser mais denso, e a do fluido deslocado, mais eficiente é o processo. Vefring et al. (1997) analisaram numérica e experimentalmente o deslocamento da lama de perfuração pelo cimento, variando parâmetros reológicos e de escoamento. Os resultados obtidos indicam que a simulação numérica pode ser utilizada de forma satisfatória neste tipo de problema. Frigaard et al. (2002 e 2003) apresenta, para uma modelagem 2-D, resultados teóricos do deslocamento de cimento através de anulares excêntricos, e mostra que para certas combinações de propriedades físicas, a frente de deslocamento pode atingir o regime permanente. Nestes casos, é obtida uma expressão analítica para a forma da interface.

Guillot et al. (1990) fez uma análise teórica aproximada do escoamento de um colchão empurrando a lama de perfuração, em espaços anulares excêntricos. Foram obtidos resultados para casos em que o colchão tinha densidade maior do que a lama, e os autores concluíram que os escoamentos turbulentos apresentam menores distorções na forma da interface do que nos casos laminares.

O presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente o escoamento tri-dimensional através de anulares excêntricos, de um colchão empurrando a lama de perfuração e do cimento empurrando o colchão. A solução numérica das equações de conservação é obtida com o método de volumes finitos. Os efeitos da vazão e da excentricidade na forma da interface são analisados.

2. MODELAGEM NUMÉRICA

A solução numérica do escoamento foi obtida com o método de volumes finitos e o método VOF (*Volume of Fluid*), utilizando o programa comercial FLUENT (Fluent, Inc., 2003). O

VOF resolve um conjunto de equações de conservação de massa e obtém a fração de volume de cada fase α_j ao longo do domínio, que devem somar um em cada volume de controle. Assim, pode-se ter:

1. $\alpha_i=0$ (a célula não contém a fase j);
2. $\alpha_i=1$ (a célula só contém a fase j);
3. $0 < \alpha_i < 1$ (a célula contém a interface entre os fluidos).

Neste estudo, têm-se duas fases. Os campos das variáveis e propriedades são comuns às fases, e para um campo φ valem:

$$\varphi = \alpha_2 \varphi_2 + (1 - \alpha_2) \varphi_1 \quad (1)$$

A interface entre as fases é obtida a partir da solução da equação da continuidade para α_j :

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

A fração de volume da outra fase é obtida pela seguinte equação de restrição:

$$(\alpha_1 + \alpha_2) = 1 \quad (3)$$

A equação de momentum é dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial u_i} \left[\eta \left(\frac{\partial(u_i)}{\partial x_k} + \frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_k \quad (4)$$

Nas equações acima, x_i são as coordenadas, u_i são as componentes do vetor velocidade, P é a pressão, ρ é a densidade e η é a função viscosidade.

3. METODOLOGIA

Para a simulação numérica dos possíveis casos reais de escoamentos foram utilizadas diversas excentricidades e velocidades, para duas diferentes configurações. A primeira configuração retrata o deslocamento da lama pelo colchão, enquanto a outra considera o cimento deslocando o colchão. É importante observar que a lama e o cimento são fluidos não-Newtonianos e que a determinação correta de suas viscosidades, que são funções da taxa de deformação, é fundamental para um estudo realista desse fenômeno. A diferença de densidades entre os fluidos também tem grande influência na eficiência do deslocamento. Nos casos em que o fluido menos denso é o deslocador, aparecem contribuições indesejáveis de empuxo que podem gerar o atravessamento de um fluido no interior do outro.

A velocidade média na qual o fluido deslocador é bombeado no anular foi retirada a partir do número de Reynolds obtido de casos reais de campo, e dado por:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\eta_c} \quad (5)$$

onde v é a velocidade média, ρ é a densidade, D_h é o diâmetro hidráulico (= diferença entre o diâmetro do tubo externo e o tubo interno) e η_c é uma viscosidade característica, avaliada numa taxa de cisalhamento característica dada pela eq. (6).

$$\dot{\gamma}_c = \frac{2v}{D_h} \quad (6)$$

Com o valor mínimo do número de Reynolds, que corresponde a uma vazão real de cerca de um barril por minuto (bpm), obteve-se a velocidade média de entrada de 0,1524 m/s. Com o valor máximo do número de Reynolds (vazão real de 10 bpm), obteve-se a velocidade média de entrada de 1,524 m/s.

A excentricidade foi definida pelo padrão STO (Standoff, figura 1), onde C representa a menor folga entre os dois círculos, A é o diâmetro do círculo externo e B o diâmetro interno. Neste trabalho serão utilizados os seguintes valores de STO: 0 (excentricidade máxima); 0.25; 0.5; 0.75 e STO 1 (cilindros concêntricos, excentricidade mínima).

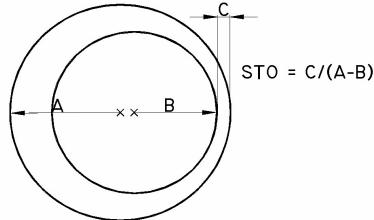


Figura 1: Vista superior do espaço anular

Um importante parâmetro a ser considerado é a razão de viscosidades: $RV=\mu_2/\mu_1$, onde μ_1 e μ_2 são as viscosidades características dos fluidos deslocados e deslocadores, respectivamente.

Diversos testes foram realizados para a caracterização reológica de fluidos reais de campo (lama e cimento), a fim de utilizar parâmetros característicos nas simulações numéricas. As medidas das propriedades reológicas foram obtidas com o reômetro rotacional “Advanced Rheometric Expansion System” (ARES, Rheometric Scientific), com a geometria cone-placa, diâmetro de 50mm, para uma folga de 0.2mm. Os resultados obtidos podem ser observados nas figuras 2 e 3.

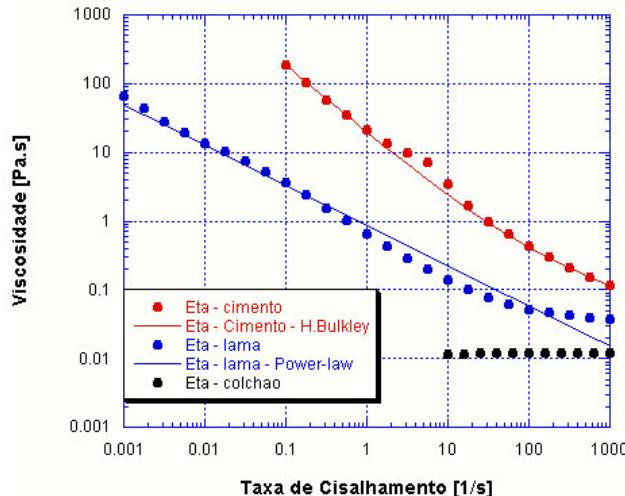


Figura 2: Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para Lama, cimento e colchão.

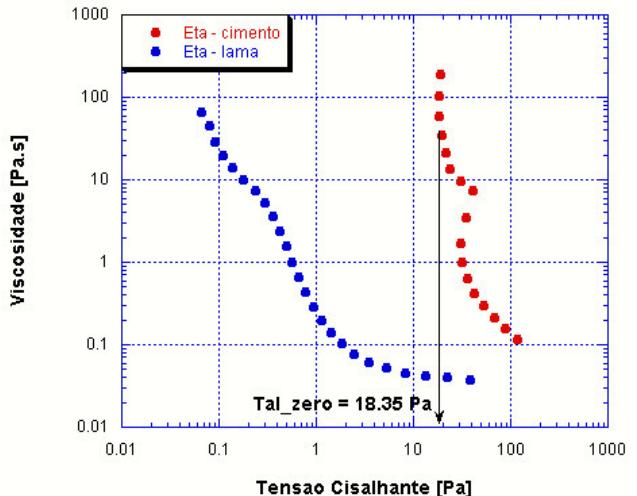


Figura 3: Viscosidade em função da tensão cisalhante para lama e cimento.

Curve-fitting

Pelos dados obtidos no reômetro, a viscosidade da lama foi modelada pela equação Power-Law, pois foi a que melhor ajustou os dados experimentais. A função viscosidade descrita pelo modelo Power-Law é dada por:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

onde K é o índice de consistência, que pode variar de acordo com a temperatura, n é o expoente Power-law e $\dot{\gamma} = \sqrt{1/2 \text{tr} \underline{\dot{\gamma}}^2}$ é o módulo da taxa de deformação e $\underline{\dot{\gamma}} = (\nabla \underline{v} + \nabla \underline{v}^T)$ é o tensor taxa de deformação. A temperatura utilizada no teste foi de 25°C.

A fim de evitar problemas de ordem numérica, o programa utiliza o modelo Power-Law truncado, definido por:

$$\begin{cases} \eta = \eta_0 & \text{se } \eta \geq \eta_0 \\ \eta = K \dot{\gamma}^{n-1} & \text{se } \eta_\infty < \eta < \eta_0 \\ \eta = \eta_\infty & \text{se } \eta \leq \eta_\infty \end{cases} \quad (9)$$

onde η_∞ e η_0 , são os patamares limitadores inferior e superior de viscosidade, respectivamente.

O cimento foi melhor modelado pela equação de Herschel-Bulkley, pois ele apresentou um comportamento viscoplástico, i.e., uma tensão limite de escoamento não nula. A equação é descrita a seguir.

$$\begin{cases} \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + k \dot{\gamma}^{n-1} & \text{se } \tau \geq \tau_0 \\ \eta = \infty & \text{se } \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (10)$$

De acordo com a figura 3, para tensões menores que 18.35 Pa, o fluido apresenta uma viscosidade muito elevada, i.e., o fluido não escoa. Essa tensão crítica (τ_0) é chamada de tensão limite de escoamento.

Do ajuste de curva podemos então obter os seguintes parâmetros reológicos para os fluidos analisados:

- Lama (modelo Power-law truncado): $\eta_0 = 1000 \text{ Pa.s}$, $\eta_\infty = 0.01 \text{ Pa.s}$, $K = 0.86 \text{ Pa.s}^n$, $n = 0.414$.
- Cimento (modelo Herschel-Bulkley): $\tau_0 = 18.35 \text{ Pa}$, $K = 1.5 \text{ Pa.s}^n$, $n = 0.6$.
- Colchão (Newtoniano): $\mu = 0.01 \text{ Pa.s}$

As densidades dos fluidos foram tiradas de dados de campo: $\rho_{cimento} = 1980 \text{ Kg/m}^3$, $\rho_{lama} = 1200 \text{ Kg/m}^3$ e $\rho_{colchao} = 1000 \text{ Kg/m}^3$.

A tensão superficial utilizada foi de 0.02 N/m, valor habitualmente empregado para líquidos imiscíveis, e o ângulo de contato na parede no início do escoamento foi de 90°. Ambos foram utilizados como dados de entrada para o modelo de força de superfície contínua (Fluent Inc., 2003). Foram realizados testes variando-se o ângulo de contato entre os fluidos em contato com a parede, porém não houve mudança nem no perfil da interface entre os fluidos, nem nos níveis de velocidade e pressão.

4. RESULTADOS

Foram obtidos resultados da pasta de cimento (não Newtoniano, viscoplástico) deslocando o colchão (Newtoniano) e do colchão lavador deslocando a lama de perfuração (não Newtoniano), numa geometria anular de dois metros de comprimento na vertical ($\vec{g} = -g_x \hat{e}_x$), diâmetro interno de 42mm e diâmetro externo de 92mm.

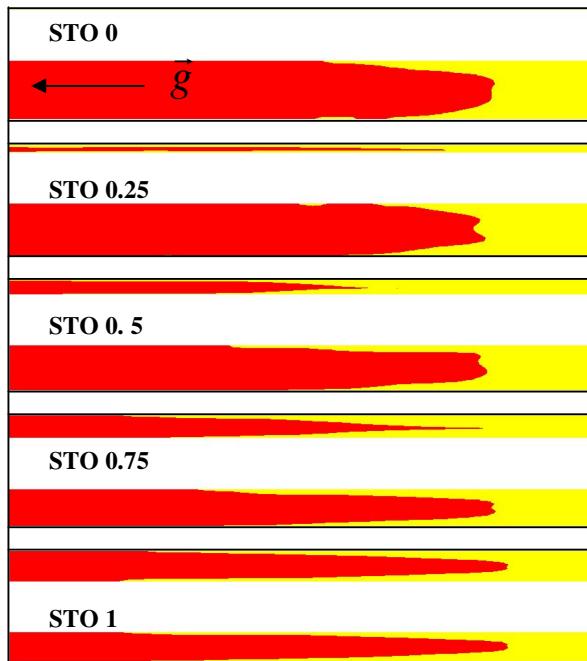


Figura 4 – Cimento (vermelho) deslocando colchão (amarelo). Vazão máxima, $Re = 255$
Todas as Excentricidades

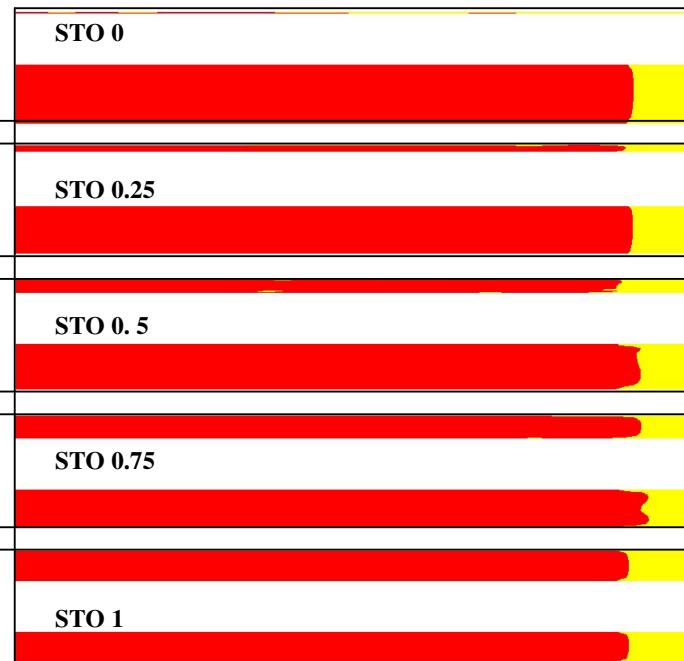


Figura 5 - Cimento (vermelho) deslocando colchão (amarelo). Vazão mínima, $Re = 4.04$
Todas as Excentricidades

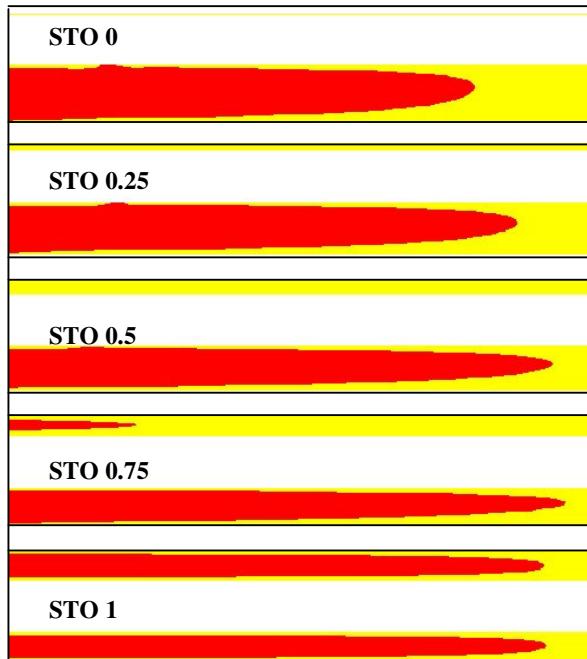


Figura 6 - Colchão (vermelho) deslocando lama (amarelo). Vazão máxima, $Re= 1183$.
Todas as Excentricidades

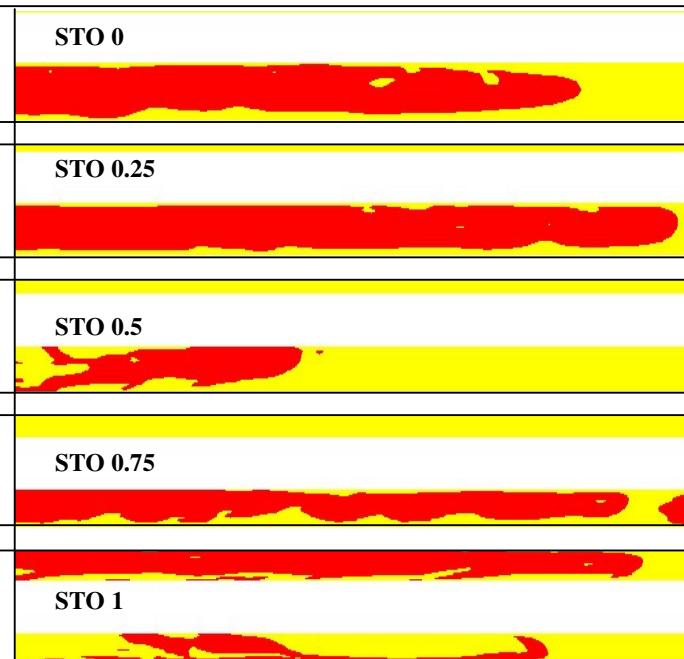


Figura 7 - Colchão (vermelho) deslocando lama (amarelo). Vazão mínima, $Re= 307$.
Todas as Excentricidades

Foram simulados dois níveis de vazão e cinco valores de excentricidade, para cada configuração. Os números de Reynolds utilizados foram calculados pela eq. (5), utilizando-se as propriedades do fluido não Newtoniano em cada configuração.

Observa-se que nos casos em que o cimento desloca o colchão, i.e., razão de viscosidades maior do que um, a eficiência do deslocamento é maior. Nestes casos, a condição de vazão mínima apresenta a forma da interface mais achatada, indicando um melhor deslocamento. Para a outra situação, i.e. colchão empurrando a lama de perfuração (razão de viscosidades menor do que um), na condição de vazão máxima observou-se que o deslocamento também não foi satisfatório, pois a interface mostrou-se muito pontiaguda, mais ainda do que na outra configuração (cimento empurrando colchão). Com a diminuição da vazão para 1 bpm tem-se um aumento na viscosidade da lama, dificultando ainda mais a sua remoção. Um outro agravante neste caso é a diferença de densidades. Forças de Buoyancy fazem com que a lama faça o movimento contrário do escoamento, contribuindo com um indesejável fenômeno de empuxo. Além disso, pode-se perceber também que os resultados obtidos nestes casos apresentaram algumas instabilidades.

O efeito da excentricidade foi similar para todas as situações, com o deslocamento mais eficiente nas regiões mais largas do anular. Porém, pode-se observar que no caso de vazões mínimas e colchão empurrando a lama, a diferença de escoamento entre as regiões é muito pequena.

Uma outra forma de se avaliar a eficiência do processo de deslocamento pode ser observada nas figuras abaixo. Ao plotarmos o percentual de líquido deslocador no interior do domínio computacional em função do volume do mesmo fluido bombeado normalizado, i.e., o tempo de bombeamento, tem-se uma indicação direta da eficiência. Quanto mais inclinada for a reta mais eficiente será o processo.

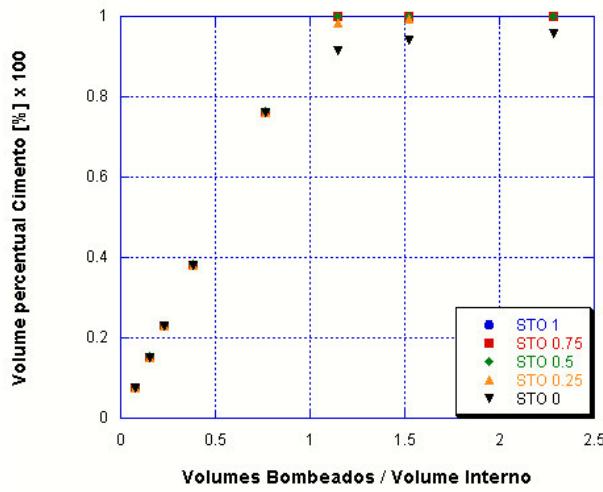


Figura 8: Eficiência do deslocamento do colchão pelo cimento. $Re = 255$

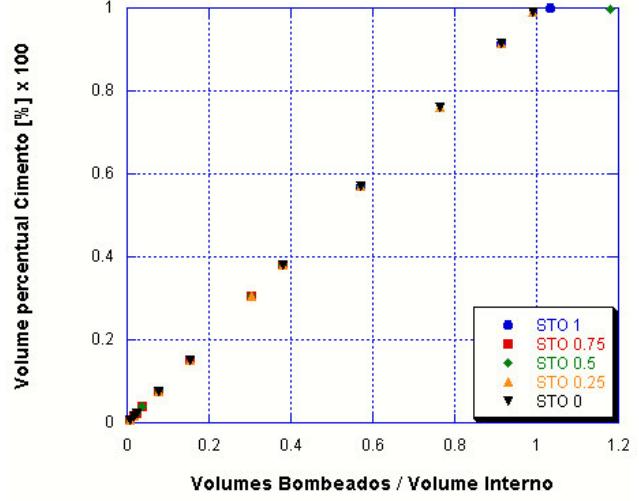


Figura 9: Eficiência do deslocamento do colchão pelo cimento. $Re = 4.04$

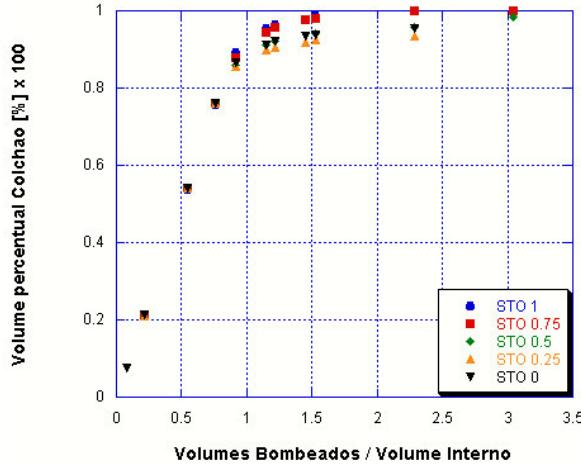


Figura 10: Eficiência do deslocamento da lama pelo colchão. $Re = 1183$

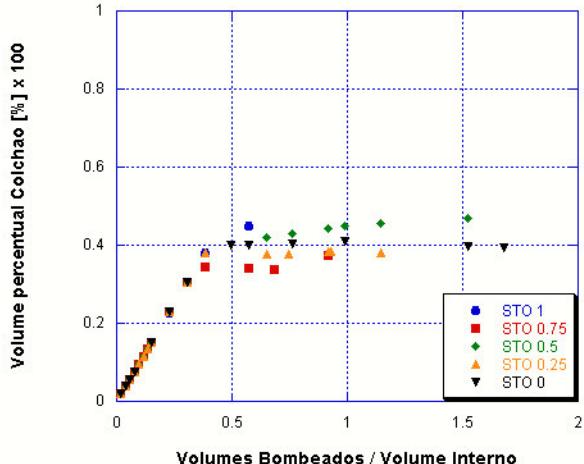


Figura 11: Eficiência do deslocamento da lama pelo colchão. $Re = 307$

A análise dos gráficos mostra quantitativamente o desempenho de cada processo analisado. Observa-se que os casos de cimento empurrando o colchão apresentam um melhor desempenho, pois o volume percentual do fluido deslocador no interior do domínio atinge a unidade em tempos menores. A comparação entre as figuras 8 e 9, e entre as figuras 10 e 11, confirma o fato de que o processo é mais eficiente para menores vazões. Pode-se também observar que a influência da excentricidade na eficiência de deslocamento é muito pequena, e se torna mais evidente somente nos casos em que o colchão desloca a lama.

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho analisou-se o escoamento de dois fluidos adjacentes através de um espaço anular excêntrico, com o objetivo de investigar o processo de cimentação em poços de petróleo. Foram analisadas duas diferentes situações: um fluido não Newtoniano, com propriedades reológicas similares às do cimento, empurrando um fluido Newtoniano; e um fluido Newtoniano empurrando um não Newtoniano, com propriedades reológicas similares às da lama de perfuração. As soluções foram obtidas numericamente, utilizando o método de volumes finitos e o método *volume of fluid*, e o programa Fluent. Dos resultados obtidos pode-se concluir que quando a razão de viscosidades é maior do que a unidade, que é o que ocorre no caso em que o cimento desloca o colchão, o deslocamento é mais eficiente sob baixas vazões. O aumento da vazão provoca uma queda na eficiência do processo, devido a diminuição da viscosidade do cimento (não Newtoniano) com a vazão, pois maiores taxas de cisalhamento são observadas nesta situação.

A influência da excentricidade na forma da interface é pequena, sendo que as maiores eficiências são obtidas com menores excentricidades.

Pode-se assim concluir que o processo ideal é aquele em que existe uma hierarquia de densidades e viscosidades, considerando sempre o fluido deslocante como o mais denso e mais viscoso.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pelo CNPq, FNDCT e CENPES/Petrobras.

7. REFERÊNCIAS

- Barnes, H. A., 2000, “A Handbook of Elementary Rheology”, The University of Wales.
- Bird, R. B., Armstrong, R. C., Hassanger O., 1987, “Dynamics of Polymeric Liquids”, vol. 1, Wiley, 1987.
- Fluent User’s Guide, versão 6.1, Fluent Inc., 2003.
- Frigaard I. A., Bittleston S. H., Ferguson J., 2002 – “Mud Removal and Cement Placement During Primary Cementing of an Oil Well” – Society of Petroleum Engineers – Kluwer Academic Publishers.
- Frigaard I. A., Pelipenko S., 2003 – “Effective and Ineffective Strategies for Mud Removal and Cement Slurry Desing” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #80999.
- Guillot D., Couturier M., Hendriks H., Callet F., 1990 – “Design Rules and Associated Spacer Properties for Optimal Mud Removal in Eccentric Annuli” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #21594.
- Haut, R. C., Crook, R. J., 1979 – “Primary Cementing: The Mud Displacement Process” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #8253.
- Haut, R. C., Crook, R. J., 1981 – “Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #10305.
- Jakobsen J., Sterri N., Saasen A., Aas B., Kjosnes I., Vigen A., 1991 – “Displacement in Eccentric Annuli During Primary Cementing in Deviated Wells” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #21686.
- Lockyear, C. F., Hibbert, A. P., 1989 – “Integrated Primary Cementing Study Defines Key Factors for Field Success” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #18376.
- Macosko, C. W., 1994, “Rheology Principles, Measurements, and Applications”, Wiley-VCH.
- Sauer, C. W., 1987 – “Mud Displacement During Cementing: A State of the Art” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #14197.
- Tehrani A., Ferguson J., Bittleston S.H., 1992 – “Laminar Displacement in Annuli: A Combined Experimental and Theoretical Study” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #24569.
- Vefring E. H., Bjorkevoll K. S., Hansen S. A., Sterri N., Saevareid O., Aas B., Merlo A., 1997 – “Optimization of Displacement Efficiency During Primary Cementing” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #39009.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EFFECTS OF RHEOLOGICAL PARAMETERS IN THE INTERFACE BETWEEN A NEWTONIAN AND A NON-NEWTONIAN FLUID

Eduardo S. S. Dutra

essd@mec.puc-rio.br

Monica Feijo Naccache

naccache@mec.puc-rio.br

Paulo Roberto de Souza Mendes

pmendes@mec.puc-rio.br

Carlos A. Orofino Souto

orofino@mec.puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Department of Mechanical Engineering

Rua Marquês de São Vicente, 225 – Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro - RJ - Brazil

Abstract. In this work, the interface between two immiscible fluids in concentric and eccentric annuli geometries is analyzed numerically using finite volume and volume of fluid methods and Fluent 6.1 software. Two adjacent fluids flowing through annular spaces are found in cementation process in oil wells, when drilling mud must be replaced by a cement slurry, both non-Newtonian fluids. The flow occurs in the space between the well formation and the casing. To avoid contamination in the cement slurry, intermediary Newtonian liquids are used between the cement and the drill mud. An interface shape analysis helps to determine the contamination among the fluids, and consequently the process optimization is possible. This is a complex analysis due to the fluids rheological behavior and the flow characteristics. This work analyses the effect of rheological parameters on flow through annuli for a Newtonian fluid pushed by a non-Newtonian fluid and vice versa, for different flow rates. The results showed that more viscous fluids are more efficient displacers and that the interface shape is not a function of the eccentricity, but it is a function of the flow rate and the viscosities ratio.

Keywords. Rheology, multi-phase flow, annuli, eccentricity, oil wells