



Instituto Politécnico, Nova Friburgo
August 30th - September 3rd, 2004

Paper CRE04 – TE16

Estudo da Interface entre Fluidos Newtoniano e Viscoplastico

Carlos Alberto Orofino¹, Eduardo S. S. Dutra² e Mônica F. Naccache³

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica,
Rua Marquês de São Vicente 225, RJ 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
¹orofino@mec.puc-rio.br, ²essd@mec.puc-rio.br, ³naccache@mec.puc-rio.br

No presente trabalho, foi feito um estudo numérico e experimental para a determinação da forma da interface no escoamento de dois fluidos imiscíveis no interior de espaços anulares concêntricos e excêntricos. Este escoamento é encontrado no processo de cimentação de poços de petróleo, quando a lama de perfuração é deslocada pelo bombeamento da pasta de cimento, ambos fluidos viscoplasticos, através do espaço anular entre a coluna por onde desce a broca, e a parede do poço. Para evitar a contaminação entre a lama e o cimento, utiliza-se entre eles um “colchão lavador” e um “colchão espaçador”, que em geral são fluidos Newtonianos. Quanto menor for o comprimento da interface entre os fluidos, menor será a contaminação e portanto, melhor o processo. A análise do comportamento da interface é complexa, devido à natureza dos fluidos envolvidos e do escoamento, que pode ser laminar ou turbulento. Neste trabalho analisou-se o escoamento do cimento empurrando o colchão lavador em anulares concêntricos e excêntricos, visando a otimização do processo de deslocamento.

A solução numérica do escoamento foi obtida com o método VOF (*Volume of Fluid*) e o método de volumes finitos, utilizando o programa FLUENT (Fluent, Inc., 2003). O VOF resolve um conjunto de equações de conservação de quantidade de movimento 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 $\alpha_j=0$ (a célula não contém a fase j); $\alpha_j=1$ (a célula só contém a fase j); $0 < \alpha_j < 1$ (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 $\phi = \alpha_2 \phi_2 + (1 - \alpha_2) \phi_1$. A interface entre as fases é obtida a partir da solução da equação da continuidade para α_j : $\partial \alpha_j / \partial t + \text{div}(\alpha_j \underline{v}) = 0$. A fração de volume da outra fase é obtida por $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$. A equação de momentum para um fluido não Newtoniano, modelado por $\underline{\tau} = \eta(\dot{\gamma})\dot{\underline{\gamma}}$, é dada por $\rho D\underline{v} / Dt = -\nabla p + \text{div} \underline{\tau} + \rho \underline{g}$, onde \underline{v} é o vetor velocidade, p é a pressão, ρ é a densidade e η é a viscosidade. Para fluidos viscoplasticos como o cimento, a viscosidade é uma função da taxa de deformação e deve modelar a presença de uma tensão limite de escoamento, abaixo da qual o fluido se comportaria como um sólido (i.e., viscosidade infinita). Neste trabalho utilizou-se o modelo de Herschel-Bulkley [2], onde $\eta = \tau_o / \dot{\gamma} + k(\dot{\gamma})^{n-1}$ para $\tau > \tau_o$, e $\eta = \infty$ para $\tau \leq \tau_o$, sendo τ_o , K e n propriedades reológicas do fluido, obtidas experimentalmente, e $\dot{\gamma} = \sqrt{1/2 \text{tr} \dot{\underline{\gamma}}^2}$, onde $\dot{\underline{\gamma}} = (\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T)$ é o tensor taxa de deformação.

O caso experimental é formado por dois tubos de diâmetros 92mm, o externo feito de Plexiglas transparente, e o interno de 42mm de diâmetro e feito de aço inoxidável. O comprimento total do teste é de 2m. Antes da entrada dos tubos, uma câmara plena garante a uniformidade do escoamento e uma válvula globo separa a câmara dos tubos. O tudo interno é conectado ao externo por meio de duas barras de ferro, uma no começo outra no fim, de modo a variar a excentricidade

do tubo interno. Para a simulação do cimento utilizou-se uma solução polimérica aquosa (Carbopol) à uma concentração de 0,15% e para o colchão, um óleo mineral. Estes fluidos foram escolhidos por terem propriedades reológicas semelhantes às do cimento e do colchão. O teste começa com o óleo ocupando todo o espaço anular e o Carbopol ocupando a câmara plena, com a válvula fechada. Abre-se a válvula e o Carbopol é bombeado para dentro do tubo deslocando o óleo. Na altura de 1,6 metros, uma câmara CCD captura as imagens da interface entre os dois fluidos.

Foram obtidos resultados do cimento (Não-Newtoniano) empurrando o colchão lavador (Newtoniano) com o tubo na vertical ($\vec{g} = -g_x \hat{e}_x$) para três excentricidades ($STO=c/(D-d)=0; 0.5; 1$, onde c é a menor folga entre os tubos, D e d são os diâmetros dos tubos maior e menor) e duas vazões, 1 e 2 bpm (barril por minuto) que correspondem as velocidades de 0,1524 m/s e 0,3048 m/s respectivamente. Os dados utilizados basearam-se em dados reais de campo. As propriedades do cimento foram obtidas experimentalmente: $\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$, $\tau_o=18.35\text{Pa}$, $K=1.5\text{Pa(s)}^n$, $n=0.6$. Para o colchão lavador, $\rho= 889.0\text{kg/m}^3$ e $\mu=0.005 \text{ Pa.s}$.

As figuras 1, 2 e 3 mostram a configuração da interface do caso experimental para STO 1, STO 0.5 e STO 0, respectivamente. As figuras 4, 5 e 6 foram obtidas numericamente e representam, na ordem, as excentricidades STO 1, STO 0.5 e STO 0. Todas as figuras estão na vazão 1 bpm. Pode-se observar que os resultados experimentais estão com uma boa concordância qualitativa com os resultados numéricos. Nestes casos, em que a viscosidade do fluido deslocante (em vermelho) é maior do que a do fluido deslocado, a forma da interface é achatada. Nota-se também que nos casos excêntricos o escoamento é mais rápido pela região mais larga.

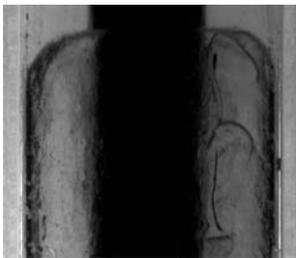


Figura 1



Figura 2



Figura 3

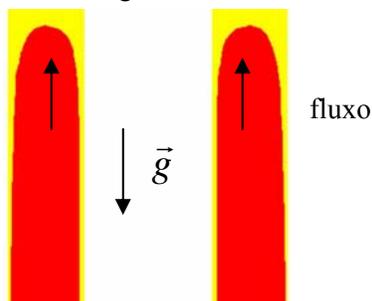


Figura 4



Figura 5

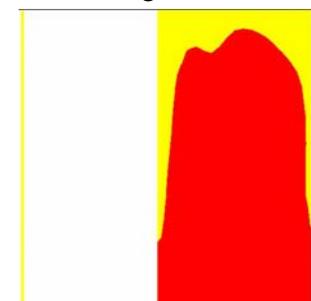


Figura 6

REFERÊNCIAS

- [1] Bird R. B., R. C. Armstrong, O. Hassager, Dynamics of Polymeric Liquids, v.1, Wiley, 1987.
- [2] Jakobsen J., Sterri N., Saasen A., Aas B., Kjosnes I., Vigen A. “Displacement in Eccentric Annuli During Primary Cementing in Deviated Wells” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #21686, 1991.
- [3] Tehrani A., Ferguson J., Bittleston S.H. “Laminar Displacement in Annuli: A Combined Experimental and Theoretical Study” – Society of Petroleum Engineers – (SPE) #24569, 1992.