

# **DESLOCAMENTO DE FLUIDOS NO INTERIOR DE POÇOS DE PETRÓLEO**

**Alunos: Bruno S. Fonseca e Marisa Bazzi**

**Orientador: Paulo R. de Souza Mendes**

**Co-orientador: Flávio H. Marchesini**

## **Introdução**

Na indústria do petróleo, processos como os de perfuração, cimentação e completção de poços envolvem o escoamento, a substituição e o deslocamento de fluidos; especialmente de fluidos estruturados que apresentam comportamento newtoniano, como suspensões, emulsões e outros materiais de comportamento viscoplástico. Em todos esses processos, diferentes fluidos são sequencialmente bombeados para dentro do poço e a qualidade final da operação é forte função da eficiência de deslocamento dos fluidos envolvidos. Essa dependência é muito mais crítica em poços nos quais fluidos sintéticos ou à base de óleo são utilizados, devido à incompatibilidade química entre a pasta de cimento e a lama de perfuração. Por essa razão, antes de se executar uma operação em um poço de petróleo é fundamental um projeto detalhado, incluindo otimização dos parâmetros do escoamento e das propriedades reológicas de cada fluido, para atingir o sucesso e garantir a segurança da operação.

O projeto dessas operações é bastante complexo e envolve vários desafios. Dentre estes, destacam-se o preparo e a correta caracterização reológica dos fluidos não newtonianos presentes, o que envolve vários desafios. Dentre estes, destacam-se o preparo e a correta caracterização reológica dos fluidos não newtonianos presentes, o que envolve medições de tensão limite de escoamento, tixotropia e deslizamento aparente; fenômenos bastante complexos, que ainda precisam ser melhor compreendidos pela comunidade científica internacional, demandando portanto esforços em pesquisa. Outro desafio é saber como maximizar a eficiência de deslocamento de um fluido por outro dada uma geometria de poço e conhecidas as propriedades reológicas de ambos os fluidos.

De uma forma geral pode-se dizer que o sucesso dessas operações de perfuração e cimentação de poços depende da contaminação entre os fluidos, da posição de cada fluido no interior do poço e das pressões dinâmicas para assegurar que os limites da janela operacional sejam respeitados. Como visto anteriormente, um dos grandes desafios no projeto dessas operações é minimizar a contaminação entre os fluidos. Um modo de avaliar a contaminação é através da forma da interface entre os fluidos. Uma interface plana promove um deslocamento eficiente, enquanto grandes curvaturas indicam canalização.

Essa análise da forma da interface entre os fluidos para a avaliação da eficiência de deslocamento pode ser feita tanto por simulações numéricas como por investigações experimentais. A simulação numérica de escoamentos tem se mostrado uma ferramenta poderosa na avaliação de diferentes processos industriais, em particular para o caso de um poço de petróleo, onde uma investigação experimental é uma tarefa dispendiosa e muitas vezes impossível. Portanto, muitas vezes são realizados estudos experimentais em menores escalas, com o intuito de validar os resultados numéricos.

A maioria das pesquisas anteriores sobre o tema focaram na representação de operações de cimentação. Alguns trabalhos (Haut e Crook, [8,9]; Sauer, [15]; Lockyear e Hibbert, [12]) mostraram que os principais parâmetros que governam o processo de deslocamento de fluidos

em poços verticais são: as razões de viscosidades e de densidades entre os fluidos, a excentricidade do espaço anular e a vazão.

A influência da razão de viscosidades, da força de empuxo e do grau de turbulência no deslocamento de um fluido de perfuração em um anular excêntrico foi analisada experimentalmente por Jakobsen e co-autores [11]. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento na região mais larga é mais eficiente do que na região mais estreita e que a turbulência reduz a tendência de canalização através da lama na região mais estreita do escoamento.

Tehrani e co-autores [16] estudaram teórica e experimentalmente o escoamento laminar de fluidos de perfuração através de espaços anulares excêntricos. Eles observaram que quanto maior a excentricidade pior é o deslocamento. Para o caso do anular 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 e co-autores [17] analisaram numérica e experimentalmente a influência dos parâmetros reológicos e do escoamento no deslocamento de um fluido de perfuração por uma pasta de cimento. Os resultados obtidos indicam que a simulação numérica pode ser utilizada de forma satisfatória nesse tipo de problema.

Frigaard e co-autores [2] e Frigaard e Pelipenko [7] apresentaram, com uma modelagem 2-D, resultados teóricos do deslocamento de pastas de cimento através de anulares excêntricos. Eles mostraram que para certas combinações de propriedades físicas, a frente de deslocamento pode atingir o regime permanente. Nestes casos, foi obtida uma expressão analítica para a forma da interface.

Guillot e co-autores [3] fizeram uma análise teórica aproximada do escoamento de um colchão empurrando um fluido de perfuração em espaços anulares excêntricos. Eles obtiveram resultados para casos em que o colchão tinha densidade maior que a lama. A partir desses resultados, eles concluíram que os escoamentos turbulentos apresentam menores distorções na forma da interface do que nos casos laminares.

Dutra e co-autores [6] analisaram numericamente o escoamento de dois fluidos adjacentes através de espaços anulares excêntricos. Eles investigaram os efeitos dos parâmetros reológicos e da excentricidade na eficiência de deslocamento para diferentes vazões. Os resultados obtidos mostram que o deslocamento é mais eficiente quando um fluido mais viscoso é usado para empurrar um outro menos viscoso. Além disso, eles mostraram que a forma da interface é uma função do regime de escoamento e da razão de viscosidades.

Apesar de todos esses esforços realizados para o melhor entendimento do fenômeno de deslocamento de fluidos no interior de poços de petróleo, ainda não se encontra na literatura um estudo amplo o bastante, com uma compreensão do fenômeno que leve a maximização da eficiência de deslocamento de um fluido por outro. Por essa razão, uma investigação mais profunda do fenômeno se justifica.

## **Análise**

### **Função Viscosidade e Parâmetros Reológicos**

Nos experimentos de deslocamento de fluidos e na solução numérica das equações governantes dois tipos de materiais são utilizados: líquidos newtonianos e materiais viscoplásticos. Uma vez que é adotada a hipótese de que a temperatura permanece constante durante os experimentos, a viscosidade dos líquidos newtonianos é constante ( $\mu$ ), como descrito a seguir:

$$\eta = \mu \quad (1)$$

Para descrever o comportamento mecânico dos materiais viscoplásticos, duas funções viscosidades são utilizadas: a equação SMD [13] e uma função viscosidade Herschel-Bulkley regularizada [1]. A função SMD pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta = \left( 1 - \exp \left[ -\frac{\eta_o \dot{\gamma}}{\tau_o} \right] \right) \left( \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \right) \quad (2)$$

onde  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento e os parâmetros  $\eta_o$ ,  $\tau_o$ ,  $K$  e  $n$  são respectivamente a viscosidade do material no patamar newtoniano, a tensão limite de escoamento, o índice de consistência e o índice de comportamento [13].

Definindo  $\dot{\gamma}_o = \tau_o/\eta_o$  e  $\dot{\gamma}_1 = (\tau_o/K)^{1/n}$ , e escolhendo  $\tau_o$  como tensão característica e  $\dot{\gamma}_1$  como a taxa de cisalhamento característica, então:

$$\tau^* = \frac{\tau}{\tau_o}; \quad \dot{\gamma}^* = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \quad (3)$$

Com a Eq. (3), a função SMD pode ser escrita na forma adimensional [4]:

$$\eta^* = \frac{\tau^*}{\dot{\gamma}^*} = (1 - \exp[-(J+1)\dot{\gamma}^*]) \left( \frac{1}{\dot{\gamma}^*} + \dot{\gamma}^{*n-1} \right) \quad (4)$$

onde  $\tau^*$  é a tensão de cisalhamento adimensional,  $\dot{\gamma}^*$  é a taxa de cisalhamento adimensional,  $n$  é o índice de comportamento e  $J$  é o “jump number”, descrito pela seguinte expressão:

$$J \equiv \frac{\dot{\gamma}_1 - \dot{\gamma}_o}{\dot{\gamma}_o} \quad (5)$$

A outra função viscosidade utilizada para descrever o comportamento de materiais viscoplásticos, a função Herschel-Bulkley regularizada [1], pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta = \frac{\tau_o + k \left[ \dot{\gamma}^n - \left( \frac{\tau_o}{\mu_o} \right)^n \right]}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

onde  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento e os parâmetros  $\mu_o$ ,  $\tau_o$ ,  $K$  e  $n$  são respectivamente a viscosidade do material no patamar newtoniano, a tensão limite de escoamento, o índice de consistência e o índice de comportamento.

## Parâmetros Governantes

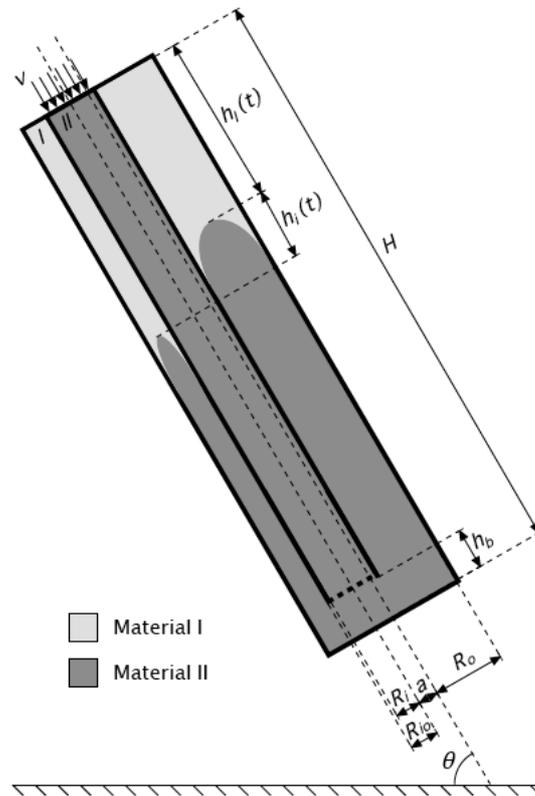


Figura 1: Desenho esquemático da geometria.

Um desenho esquemático da geometria de poço utilizada na análise do problema de deslocamento de fluidos no interior de poços de petróleo encontra-se na Fig.1. A análise indica que esse problema é governado por sete parâmetros adimensionais. Dois deles dependem somente das propriedades dos fluidos utilizados, a razão de densidades  $\rho^*$  e a razão de viscosidades  $\eta^*$ . Existem também outros três parâmetros denominados razão de raios  $R^*$ , excentricidade adimensional  $e^*$  e inclinação adimensional  $\theta^*$ , que dependem somente dos parâmetros geométricos do poço. Um outro parâmetro que pode afetar a forma da interface e conseqüentemente a eficiência de deslocamento é a posição adimensional da interface  $H^*$ , que é uma função do tempo. O último deles é um parâmetro do escoamento, a velocidade média adimensional  $u^*$ . Todos esses parâmetros adimensionais são definidos a seguir:

$$\rho^* = \frac{\rho_{II}}{\rho_I}; \quad \eta^* = \frac{\eta_{II}}{\eta_I} \quad (7)$$

onde  $\rho_{II}$  e  $\eta_{II}$  são respectivamente a densidade e a viscosidade do fluido deslocador e  $\rho_I$  e  $\eta_I$  são a densidade e a viscosidade do fluido deslocado.

É importante ressaltar que se tiver algum material viscoplástico envolvido no deslocamento, a viscosidade do material, necessária para o cálculo da razão de viscosidades, pode ser definida como a viscosidade avaliada em  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1$ .

Os parâmetros geométricos são:

$$R^* = \frac{R_o}{R_i}; \quad e^* = \frac{(R_o - R_{io}) - a}{R_o - R_{io}}; \quad \theta^* = 1 - \frac{2\theta}{\pi} \quad (8)$$

onde  $R_o$  e  $R_i$  são respectivamente o raio interno do tubo externo e o raio interno do tubo interno,  $R_{io}$  é o raio externo do tubo interno,  $a$  é a distância entre os eixos dos tubos e  $\theta$  é o ângulo definido na Fig.1.

E finalmente a posição adimensional da interface  $H^*$ , e a velocidade média adimensional,  $\bar{u}^*$ :

$$H^* = \frac{h_l}{H}; \quad \bar{u}^* = \frac{\bar{u}}{(R_o - R_{io})\dot{\gamma}_1} \quad (9)$$

onde  $\bar{u}$  é a velocidade média,  $R_o$  e  $R_{io}$  foram anteriormente definidos,  $\dot{\gamma}_1$  é a taxa de cisalhamento característica,  $H$  é o comprimento do tubo externo e  $h_l$  é a posição da interface na região mais larga do anular (no caso dos tubos serem concêntricos  $h_l$  pode ser a posição da interface em qualquer parte do anular, devido ao fato do problema ser axissimétrico).

### Experimentos

Para a realização dos ensaios foi construída uma planta experimental que encontra-se ilustrada na Fig. 2 [5]. Essa planta é constituída basicamente de um espaço anular formado por dois tubos concêntricos de vidro, de uma caixa de visualização, de quatro reservatórios e uma bomba. O diâmetro interno do tubo externo é de 16mm, enquanto a folga do espaço anular é de 7,15mm.

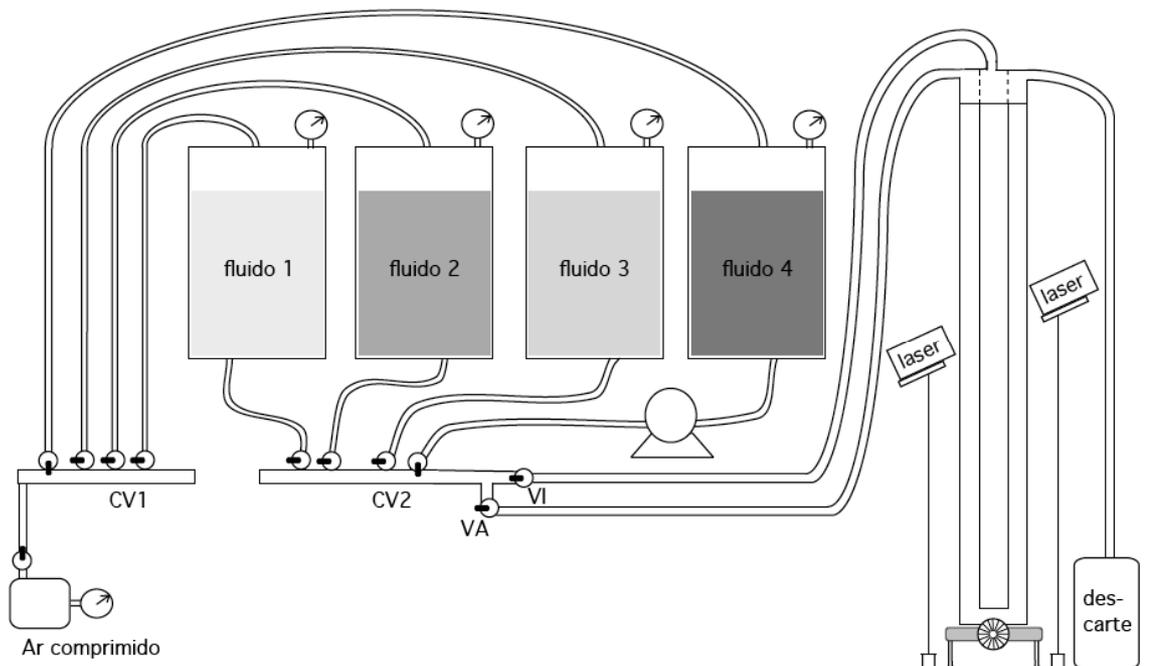


Figura 2: Desenho esquemático da planta experimental.

Para começar cada experimento, inicialmente o tubo interno é preenchido com o fluido deslocador através da pressurização do reservatório. O espaço anular é então preenchido com

fluido a ser deslocado da mesma maneira. A seguir, a conexão entre o espaço anular e o tubo interno é aberta, permitindo o contato entre os dois fluidos e formando a interface inicial.

Em seguida os lasers são ligados e os feixes de luz atravessam a caixa de visualização, formando um plano de luz. As luzes do laboratório são apagadas e então o processo de deslocamento está pronto para ser iniciado. O escoamento se dá para baixo no tubo interno e para cima na região anular.

O formato da interface entre os fluidos é então fotografado conforme ela evolui pelo espaço anular. A câmera é capaz de capturar 6,5 fotos por segundo, possibilitando assim a posterior análise das imagens e avaliação da eficiência de deslocamento.

### Solução Numérica

Soluções numéricas dos experimentos foram obtidas para comparação dos resultados. Ambas as equações SMD [13] e uma equação regularizada de Herschel-Bulkley [1] foram usadas para descrever a viscosidade de um determinado fluido, quando este apresenta comportamento viscoplástico.

Para realizar as soluções numéricas das equações governantes, o programa comercial FLUENT [1] foi utilizado. Esse programa é baseado no método de volumes finitos descrito por Patankar [14] para discretizar as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. Além disso, o algoritmo SIMPLE [14] foi utilizado para o cálculo dos campos acoplados de pressão e velocidade e o método *volume of fluid* (VOF) [10] foi usado para o cálculo da fração volumétrica de cada fase em todo o domínio, i.e. para calcular a fração volumétrica das fases em cada célula do domínio.

Em todos os casos estudados nesse trabalho, a partir da solução numérica das equações governantes e da informação da fração volumétrica de cada fase em todas as células foi obtida a forma da interface entre os diferentes materiais para cada passo de tempo. Dependendo do caso estudado, uma malha bi ou tridimensional foi criada e testada para simular o escoamento transiente e garantir que a solução numérica seja independente da malha (erro  $\leq 0,1\%$ ).

### Resultados e discussão

Como exemplo dos resultados obtidos, na Fig.3 encontra-se uma seqüência de fotos de um experimento realizado no simulador físico de deslocamento de fluidos em espaços anulares da PUC-Rio. O ensaio consiste em óleo sendo deslocado por glicerina. As imagens mostram a evolução da interface entre os dois líquidos com o tempo. A partir das imagens é possível observar uma alta eficiência de deslocamento, caracterizada por uma forma da interface mais plana, ou seja, não muito pontiaguda. Quando a interface atinge o topo do campo visual todo o óleo é removido, indicando um deslocamento eficiente para o dado conjunto de parâmetros.

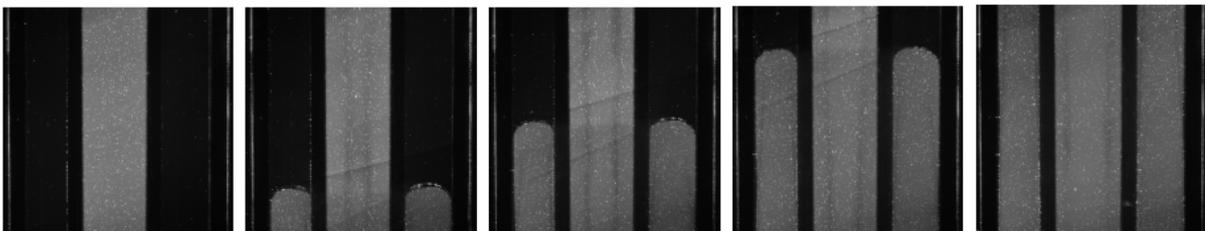


Figura 3: Imagens da evolução da interface com o tempo de óleo sendo deslocado por glicerina:  $\rho^* = 1,36$ ,  $\eta^* = 20,5$  e  $\bar{u} = 1,431\text{mm/s}$ .

Nas Figs.4(a), (b), (c) e (d) encontram-se imagens tratadas de quatro experimentos do mesmo óleo sendo deslocado por glicerina para uma mesma posição da interface, mas

variando a vazão. A velocidade média da interface nas Figs.4(a), (b), (c) e (d) é respectivamente igual a 0,5908, 1,431, 8,026 e 15,331mm/s. A partir das imagens tratadas é possível também quantificar a eficiência de deslocamento. Maiores informações sobre o cálculo da eficiência a partir dos resultados experimentais, assim como outros experimentos com diferentes conjuntos de parâmetros adimensionais e suas respectivas simulações numéricas serão apresentados no dia da apresentação do pôster.

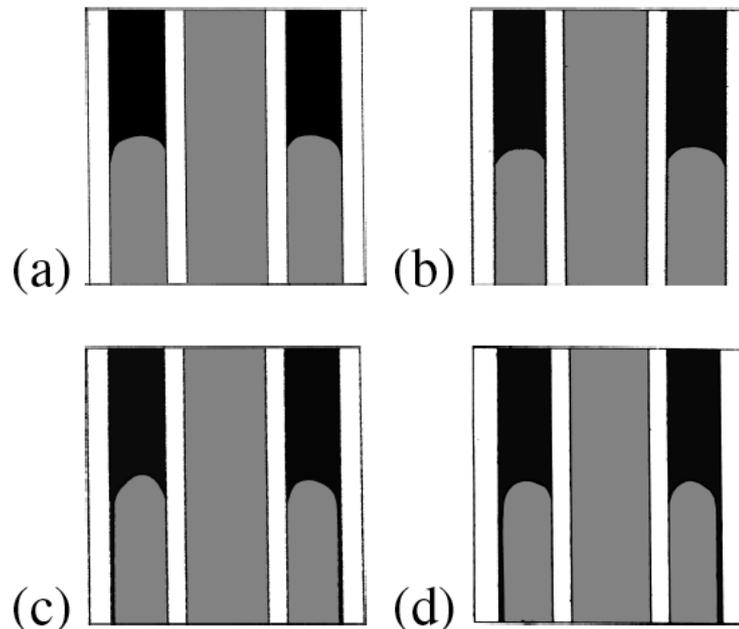


Figura 4: Imagens tratadas da interface entre óleo e glicerina para diferentes velocidades médias: (a)  $\bar{u} = 0,5908\text{mm/s}$ , (b)  $\bar{u} = 1,431\text{mm/s}$ , (c)  $\bar{u} = 8,026\text{mm/s}$  e (d)  $\bar{u} = 15,331\text{mm/s}$ .

### Comentários Finais

Um estudo sistemático da influência de vários parâmetros que governam o escoamento em espaços anulares vem sendo realizado. Uma técnica experimental para a visualização de interfaces entre fluidos foi desenvolvida, assim como uma metodologia para o tratamento das imagens e o conseqüente cálculo da eficiência de deslocamento. De uma forma geral, observa-se que a eficiência de deslocamento aumenta com a razão de densidades e a de viscosidades, e diminui com o aumento da vazão. Além disso, os resultados mostram que a simulação numérica deste tipo de escoamento é uma poderosa ferramenta para a avaliação de deslocamento de fluidos no interior de espaços anulares. Mais detalhes serão apresentados no dia da apresentação do pôster.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS, ao CNPq, à CAPES, à FAPERJ, à FINEP e ao MCT pelo financiamento dado as pesquisas do GReo da PUC-Rio.

### Referências

- 1 – Ansys. Fluent Users Guide, 2008.
- 2 – BITTLESTON, S.H., FERGUSON, J. e FRIGAARD, I.A., Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well, **Journal of Engineering Mathematics**, p. 229-253, 2002.

- 3 – COUTURIER, M., GUILLOT, D., HENDRLKS, H. e CALLET, F., Design rules and associated spacer properties for optimal mud removal in eccentric annuli., **Society of Petroleum Engineering**, 1990.
- 4 – DE SOUZA MENDES, P.R., Dimensionless non-Newtonian fluid mechanics, **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v.147(1-2), p. 109-116, 2007.
- 5 – DE SOUZA MENDES, P.R., CELNIK, J. e MARCHESINI, F.H., Liquid-liquid displacement flows in an annular space including viscoplastic effects, **In XVth International Congress on Rheology**, 2008.
- 6 – DUTRA, E.S.S., NACCACHE, M.F., DE SOUZA MENDES, P.R., SOUTO, A.A.O., MARTINS, A.L. e MIRANDA, C.R. Analysis of interface between Newtonian and non-Newtonian fluids inside annular eccentric tubes., **ASME/IMECE**, (59335), 2004.
- 7 – FRIGAARD, I.A. e PELIPENKO, S., Effective and ineffective strategies for mud removal and cement slurry design, **Society of Petroleum engineering**, 2003.
- 8 – HAUT, R.C. e CROOK, R.J., Laboratory investigation of lightweight low-viscosity cementing spacer fluids., **J. Petroleum Tech.**, 1828-1834, 1982.
- 9 – HAUT, R.C. e CROOK, R.J., Primary cementing: the mud displacement process, **Society of Petroleum Engineering**, 1979.
- 10 – HIRT, C.W. e NICHOLS, B.D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, **J. Comp. Phys.**, v.39, p. 204-225, 1981.
- 11 – JAKOBSEN, J., STERRI, N., SAASEN, A., AAS, B., KJOSNES, I. e VIGEN, A., Displacements in eccentric annuli during primary cementing in deviated wells, **Society of Petroleum Engineering**, 1991.
- 12 – LOCKYEAR, C.F. e HIBBERT, A.P., Integrated primary cementing study defines key factors for field success, **J. Petroleum Tech.**, v.41(12), p. 1320-1325, 1989.
- 13 – DE SOUZA MENDES, P.R. e DUTRA, E.S.S., Viscosity function for yield-stress liquids, **Applied Rheology**, p. 269-302, 2004.
- 14 – PATANKAR, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow., **Hemisphere Publishing Corporation**, 1980.
- 15 – SAUER, C.W., Mud displacement during cementing: a state of the art, **J. Petrol. Tech.**, p. 1091-1101, 1987.
- 16 – TEHRANI, A., FERGUSON, J. e BITTLESTON, S.H., Laminar displacement in annuli: a combined experimental and theoretical study, **Society of Petroleum Engineering**, (24569), 1992.
- 17 – VEFRING, E.H., BJORKEVOLL, K.S., HANSEN, S.A., STERRI, N., SAEVAREID, O., AAS, B. e MERLO, A., Optimization of displacement efficiency during primary cementing, **SPE**, (39009), 1997.