



Instituto Politécnico, Nova Friburgo  
August 30<sup>th</sup>- September 3<sup>rd</sup>, 2004

Paper CRE04-TF48

## Deslocamento de Materiais Viscopoplásticos em Tubos

José Roberto R. Siffert<sup>1</sup>, Eduardo S. S. Dutra<sup>2</sup> e Paulo R. Souza Mendes<sup>3</sup>

Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica,  
Rua Marquês de São Vicente 225, RJ 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
<sup>1</sup>jrsiffert@mec.puc-rio.br, <sup>2</sup>essd@mec.puc-rio.br, <sup>3</sup>pmendes@mec.puc-rio.br

O escoamento de fluidos imiscíveis em tubos ocorre em diferentes processos industriais. Particularmente, os processos de extração de óleo em meios porosos e cimentação de poços de petróleo, envolvem um fluido deslocado e um deslocador. Nestes casos, espera-se remover o máximo de fluido deslocado. Já no revestimento de superfícies internas de tubos deseja-se, com precisão, que a espessura de fluido na parede seja constante. Para uma boa compreensão e otimização destes processos, é extremamente relevante o estudo da influência de parâmetros adimensionais no padrão de escoamento. Além disso, os materiais envolvidos são frequentemente polímeros com propriedades mecânicas não Newtonianas. Portanto, o estudo dos efeitos dos parâmetros reológicos faz-se igualmente importante. O deslocamento de fluidos Newtonianos e a sua deposição em geometrias tubulares foram estudados experimental e teoricamente [1,2]. Nestes estudos, mostrou-se que a fração adimensional de massa ( $m$ ) depositada aumenta com o número de capilaridade ( $Ca$ ) até atingir um patamar constante. Estes parâmetros são definidos da seguinte forma:

$$m = \frac{U - u}{U}, \quad Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad (1)$$

onde  $U$  é a velocidade da interface,  $u$  é a velocidade média do escoamento longe da interface,  $\mu$  é a viscosidade de cisalhamento Newtoniana e  $\sigma$  é a tensão interfacial do fluido deslocado em relação ao ar. Mais recentemente, diversos pesquisadores estudaram o deslocamento de líquidos viscoelásticos por gases ou líquidos. Uma pesquisa bibliográfica extensa é encontrada em [3].

Neste trabalho estudamos o deslocamento de um fluido viscopoplástico por um Newtoniano em um tubo, e vice-versa. A secção de testes consiste basicamente de um tubo de vidro de diâmetro interno igual a 3 mm conectado a dois reservatórios, um contendo o líquido deslocador, e o outro contendo o líquido deslocado. O tubo é cheio com a solução que será deslocada antes de iniciar cada teste. O início do teste se caracteriza pelo escoamento do fluido deslocador, que avança no tubo empurrando o deslocado. O movimento da interface entre os dois líquidos e a camada do primeiro que permanece não deslocada na parede ( $m$ ) são visualizados com o auxílio de uma câmera CCD para diferentes vazões (ou números de capilaridade  $Ca$ ) do líquido deslocador. Este experimento permite observar a dependência de  $m$  com  $Ca$  para cada combinação de reologias dos líquidos envolvidos. A reologia da solução de Carbopol é modificada com a concentração, enquanto que a do óleo se resume à viscosidade Newtoniana.

A Fig. 1 mostra a interface entre uma solução de Carbopol (0,15%) e óleo lubrificante com viscosidade constante 0,01Pa.s em um escoamento a baixas velocidades. Observa-se que a interface é plana e a deposição de massa na parede é pequena.

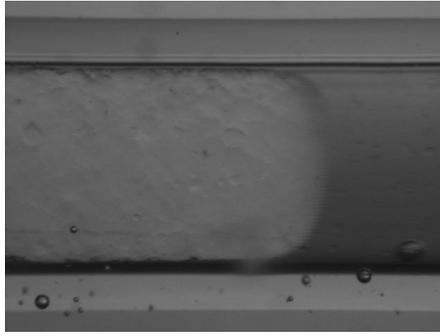


Figura 1

A massa depositada na parede é avaliada a partir da Eq. (1). Através do princípio de conservação de massa, essa se torna somente função de parâmetros geométricos, a saber, o raio interno do tubo,  $R_{tubo} = 1,5$  mm; e o raio da bolha de óleo,  $R_{bolha}$ :

$$m = 1 - \frac{R_{bolha}}{R_{tubo}} \quad (2)$$

Por se tratar de um material viscoplástico, o mesmo apresenta uma tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), abaixo da qual exibe um comportamento Newtoniano com alta viscosidade. Ao atingir  $\tau_0$ , observa-se uma queda dramática da viscosidade. A tensões superiores a  $\tau_0$ , a viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento. Este comportamento é bem representado pela função viscosidade a seguir [4]:

$$\eta = (1 - \exp(-\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau_0})) (\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}) \quad (3)$$

Os parâmetros da equação (3) são obtidos a partir de dados experimentais de testes realizados em um reômetro rotacional.

O número de capilaridade  $Ca$  é calculado pela Eq. (1), onde a velocidade da bolha é avaliada a partir de medições do tempo que a frente da interface leva para percorrer uma distância fixa (marcada no tubo de vidro). A viscosidade é avaliada utilizando-se a Eq. (3) para uma taxa de cisalhamento igual a  $U/R_{tubo}$ . A tensão interfacial  $\sigma$  é medida com um goniômetro de gota pendente.

Os resultados experimentais são apresentados graficamente em curvas  $m \times Ca$  para diferentes reologias do líquido deslocado.

## REFERÊNCIAS

- [1] Taylor, G. I., Deposition of a Viscous Fluid on the Wall of a Tube, *J. Fluid Mech.*, **10**:161-165, 1961.
- [2] Bretherton, F. P., The Motion of Long Bubbles in Tubes, *J. Fluid Mech.*, **10**:166-188, 1961.
- [3] Soares, E. J., Deslocamento de Fluido Imiscíveis em Tubos: Efeito de Capilaridade, Inércia, Razão de Viscosidades e Propriedades Reológicas. Tese de Doutorado – Eng. Mecânica – PUC-Rio, 2002.
- [4] Souza Mendes, P. R., and Dutra, E. S. S., Viscosity Function for Yield-Stress Liquids, *Applied Rheology*, 2004 (submitted).