

Modelagem matemática da equação constitutiva no reinício de escoamento em fluidos gelificados

RESUMO

Hiago Souza da Silva
hiago@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Cezar Otaviano Ribeiro Negrão
negrão@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

OBJETIVO: Nos processos de produção *offshore* de petróleo, o óleo é levado do reservatório até a costa por tubulações passando no fundo do mar. Devido à transferência de calor entre o óleo e o mar, ocorre uma queda na temperatura do petróleo. Essa redução de temperatura acarreta em um aumento da viscosidade e mudança de comportamento de newtoniano para não newtoniano. Além disso, observa-se também a deposição de parafinas na tubulação, aumentando a dificuldade no transporte do petróleo. Em casos de parada no processo, o óleo pode gelificar. Para reiniciar o escoamento, pressões maiores que as usuais às de trabalho são necessárias. A característica de gelificar em repouso e quebrar o gel na restituição do fluxo, deve-se à tixotropia do petróleo parafínico. De modo a poder prever as pressões necessárias no reinício, é necessário modelar matematicamente o comportamento tixotrópico do óleo. Assim, o objetivo desse trabalho é propor uma nova equação constitutiva para representar fluidos dependentes do tempo. **MÉTODOS:** Uma equação constitutiva será proposta com base em propriedades dependentes do tempo. Essas propriedades são avaliadas por uma equação diferencial que relaciona a propriedade atual e a de equilíbrio. O conjunto de equações diferenciais do modelo será resolvido através de um programa em linguagem Matlab. **RESULTADOS:** Os resultados de testes de tensão e taxa de cisalhamento controladas mostram o efeito avalanche e o pico de tensão. **CONCLUSÕES:** O modelo foi capaz de reproduzir os resultados esperados nos testes aplicados, com a vantagem de ser mais simples que os outros já existentes.

PALAVRAS-CHAVE: Petróleo parafínico. Reinício de escoamento. Tixotropia. Modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

O petróleo é um material de origem fóssil com alto teor energético. É considerado um recurso natural não renovável de relevância na produção de combustíveis, geração de energia, e demais derivados (MORAIS, 2013). Devido à sua inerente escassez, vem se tornando cada vez mais raro encontrar reservas petrolíferas de fácil acesso. Nesse contexto, perfurações distantes da terra firme (*offshore*) foram vistas como uma maneira de contornar esse inconveniente.

Juntamente à essa descoberta, têm-se os desafios de ordem tecnológica, no que diz respeito a como proceder para a extração e transporte desse recurso (PETROBRAS, 2014). Após a perfuração, o petróleo é levado do reservatório (temperatura na ordem de 65 °C) até a costa continental por tubulações instaladas no fundo do mar (temperatura em torno de 5 °C) (LEE *et al.*, 2008). Devido a esse gradiente térmico, ocorre a transferência de calor do óleo para oceano, promovendo uma redução da temperatura do petróleo, e acarretando em um aumento da viscosidade do composto e à transição do comportamento newtoniano para não-newtoniano do fluido. Em situações de parada de processo (interrupção do fluxo), o petróleo gelifica na tubulação (AHMADPOUR; SADEGHY, 2014). O reinício do escoamento em uma tubulação obstruída dessa maneira é entendido como uma tarefa complexa. Para quebrar a estrutura do gel e restabelecer o escoamento, deve-se aplicar um gradiente de pressão maior que o usual de trabalho na entrada da tubulação. No entanto, essa abordagem somente funciona se a pressão de reinício não exceder a máxima pressão admissível dos tubos. Caso contrário, há o risco de colapso dos equipamentos de transporte (rompimento das tubulações), trazendo prejuízos de ordem financeira e ambiental (vazamentos de petróleo no mar, causando contaminações em geral).

Devido à sua característica de gelificar quando em repouso e desestruturar o gel ao reiniciar o escoamento, pode-se caracterizar o petróleo parafínico como um fluido tixotrópico (BARNES, 1997). Esse fenômeno ainda é de difícil caracterização físico-matemática, e consequentemente, quantificação. Um modelo de tixotropia capaz de descrever o comportamento do petróleo é de grande valia na avaliação das pressões requeridas para o reinício de escoamento de óleos parafínicos, auxiliando na otimização do processo de transporte como um todo. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é propor uma nova equação constitutiva para fluidos dependentes do tempo.

MODELAGEM MATEMÁTICA

A equação constitutiva proposta (equação (1)) foi baseada na equação do modelo de Jeffrey:

$$\tau + \theta_1 \frac{d\tau}{dt} = \eta_v \left(\dot{\gamma} - \frac{d\tau}{dt} \right) \quad (1)$$

em que θ_1 é o tempo de relaxação, dado pela equação (2), θ_2 é o tempo de retardo, dado pela equação (3), e η_v é a viscosidade instantânea, dada pela equação (4). Esses três parâmetros são dependentes da tensão de cisalhamento e do tempo.

$$\theta_1(\tau, t) = \frac{\eta_v - \eta_\infty}{G} \quad (2)$$

$$\theta_2(\tau, t) = \frac{\eta_v - \eta_\infty}{\eta_v} \frac{\eta_\infty}{G} \quad (3)$$

$$\frac{d\eta_v(\tau, t)}{dt} = \frac{\eta_{v,e}(\tau) - \eta_v(\tau, t)}{t_{eq}} \quad (4)$$

em que t_{eq} é o tempo necessário para a viscosidade alcançar exponencialmente 67% de seu valor de final, se uma tensão constante for aplicada, η_∞ é a viscosidade à uma taxa de deformação infinita, e $\eta_{v,e}$ é a viscosidade de equilíbrio, definida em função da taxa de deformação por Blackwell e Ewoldt (2014), na equação ((5)):

$$\eta_{v,e}(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + a\dot{\gamma}^*} \quad (5)$$

Para maior facilidade em tratamentos computacionais, as equações foram adimensionalizadas em função de η_∞ e de uma taxa de deformação de referência. Nota-se que o modelo possui três parâmetros adimensionais: η_0^* , a^* e t_{eq}^* .

RESULTADOS

De maneira a avaliar o modelo, foram conduzidos testes de tensão de cisalhamento controlada e taxa de deformação controlada. Essa seção traz os resultados de tais testes, através da resolução numérica do conjunto das equações na forma adimensionalizada. Na condição inicial, o fluido está totalmente relaxado ($\tau^* = 0$) e em repouso ($\dot{\gamma}^* = 0$). Os valores para os parâmetros adimensionais são: $a^* = 10^5$ e $\eta_0^* = 10^6$.

TAXA DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA

No teste de taxa de deformação controlada, um valor constante de taxa de deformação $\dot{\gamma}_f^*$ é aplicado, no tempo $t^* = 0$, e a tensão de cisalhamento é então avaliada. **A Fonte de referência não encontrada.** **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a tensão de cisalhamento em função do tempo para $\dot{\gamma}^*$ igual a 10^{-1} , 1, 10, 10^2 e 10^3 , e t_{eq}^* igual a 1.

Como mostrado por Souza Mendes e Thompson(2013), a tensão de cisalhamento inicial é $\tau_i^* = \dot{\gamma}_f^*$. Após a imposição da taxa de deformação, há um aumento linear na tensão, devido à resposta elástica. Nota-se, então, um pico de tensão, o que indica a transição de um comportamento predominantemente elástico para um predominantemente viscoso. Em seguida, o material relaxa e a tensão cai, tendendo ao seu valor de regime permanente. Para a menor taxa

aplicada, 10^{-1} , não houve o pico de tensão, havendo somente o comportamento viscoelástico, em detrimento do tixotrópico.

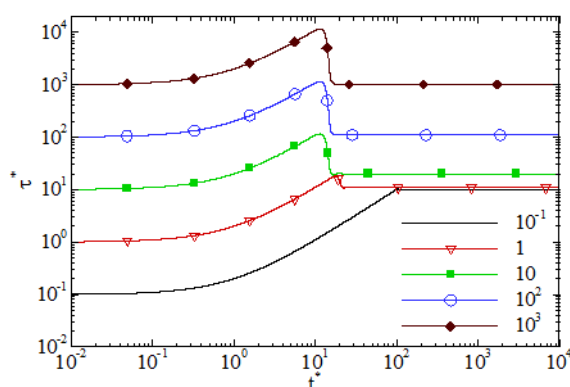
TENSÃO DE CISALHAMENTO CONTROLADA

Para o teste de tensão controlada, uma tensão de cisalhamento constante τ_f^* foi aplicada e a taxa de cisalhamento foi avaliada em relação ao tempo. Os parâmetros foram os mesmos do teste anterior, com exceção de t_{eq}^* , que passou a assumir o valor de 100. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a taxa de deformação em função do tempo para τ_f^* igual a 10^{-1} , 1, 10, 10^2 e 10^3 .

De maneira similar ao que ocorreu no teste anterior, de acordo com Souza Mendes e Thompson(2013), na condição inicial, $\dot{\gamma}_i^* = \dot{\gamma}_f^*$. Após a aplicação da tensão, as taxas de deformação iniciais sofrem uma leve redução, seguida de uma queda abrupta. Então, após manterem-se em valores relativamente baixos, as taxas sobem rapidamente, até seus respectivos valores de regime permanente.

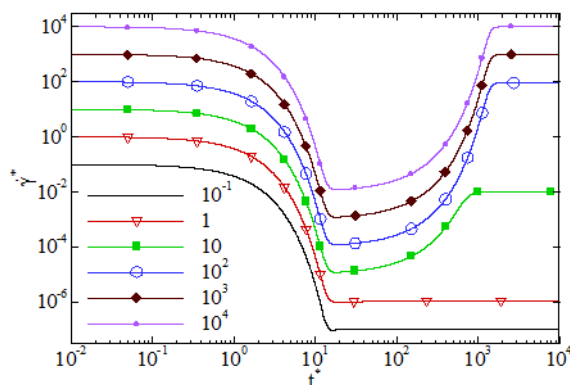
Esse comportamento é conhecido como efeito avalanche. Para tensões mais baixas que a limite de escoamento (TLE), a taxa de deformação mantém-se baixa, acarretando inclusive na parada do escoamento. Para tensões acima da TLE, acontece o efeito avalanche e a taxa de deformação aumenta até atingir o valor de equilíbrio. Dessa forma, nas tensões mais baixas (10^{-1} e 1) nota-se que o efeito não acontece, uma vez que a taxa de deformação é muito baixa. Pode-se supor que o material não chegou a fluir.

Figura 1 Tensão de cisalhamento em função do tempo.



Fonte: Autoria própria (2017)

Figura 2 - Taxa de deformação em função do tempo.



Fonte: Autoria própria (2017)

CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi proposta uma nova equação constitutiva para modelar fluídos com dependência temporal. Foi utilizada uma equação constitutiva baseada no modelo de Jeffrey e uma equação para a viscosidade de equilíbrio baseada no modelo de Blackwell e Ewoldt (2014). O modelo possui apenas três parâmetros adimensionais, um número significativamente menor do que outros modelos presentes na literatura.

Os resultados para tensão e taxa de deformação controlada apresentam as características mais marcantes da tixotropia. No teste de taxa de deformação constante, a tensão sofre um aumento linear elástico, e um pico de tensão, o que é esperado para materiais viscoelástico-tixotrópicos. No teste de tensão constante, foi observado o efeito avalanche, para as tensões mais altas. Dessa forma, conclui-se que o modelo apresenta as características mais relevantes dos materiais dependentes do tempo, da mesma maneira que outros modelos mais complexos.

Mathematical modeling of the constitutive equation for gelled fluids in flow start-up situations

ABSTRACT

OBJECTIVE: In petroleum offshore production, waxy crude oil is transported from the reservoir to the shore through pipelines passing over the seabed. Due to the heat transfer between the oil and the sea, there is a drop of temperature. This temperature reduction entails in a raise of the viscosity and a change from Newtonian to non-Newtonian behavior. Besides, a paraffin deposition is observed along the walls of the pipeline, thus making the oil transportation more difficult. In cases of interruption, the oil may gel. To restart the flow, pressures higher than the usual ones are necessary. The gel like behavior in rest and the breakage of the gel at the flow start-up is caused by the thixotropy of the waxy oil. In order to predict the necessary pressures during restart, it is necessary to model the thixotropic behavior of the oil. Therefore, the goal of this work is to propose a new constitutive equation to represent time dependent fluids. **METHODS:** A constitutive equation based on time dependent properties will be proposed. These properties are assessed by a differential equation, which relates the current and the equilibrium properties. The set of equations will be solved through a numerical program in Matlab language. **RESULTS:** The results of shear stress and shear rate controlled tests show the avalanche effect and the stress overshoot, both already expected. **CONCLUSIONS:** The model was capable of reproducing the expected results in the tests that were conducted and it has the advantage of being simpler than previous ones.

KEYWORDS: Waxy crude oil. Flow restart. Thixotropy. Mathematical modelling.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR, por propiciar a oportunidade de trabalhar na área de pesquisa e desenvolvimento, assim como à Fundação Araucária, pelo fomento financeiro a essas atividades.

REFERÊNCIAS

- AHMADPOUR, A.; SADEGHY, K. Start-up flows of Dullaert-Mewis viscoplastic-thixoelastic fluids: A two-dimensional analysis. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2014. v. 214, p. 1–17.
- BARNES, H. A. Thixotropy - A review. **Journal of non-Newtonian fluid mechanics**, 1997. v. 70, n. 97, p. 1–33. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377025797000049>>.
- BLACKWELL, B. C.; EWOLDT, R. H. A simple thixotropic-viscoelastic constitutive model produces unique signatures in large-amplitude oscillatory shear (LAOS). **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, 2014. v. 208–209, p. 27–41. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2014.03.006>>.
- LEE, H. S. *et al.* Waxy oil gel breaking mechanisms: Adhesive versus cohesive failure. **Energy and Fuels**, 2008. v. 22, n. 1, p. 480–487.
- MORAIS, J. M. De. **Petróleo em Águas Profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- PETROBRAS. **Relatório de tecnologia PETROBRAS**. [S.l.]: [s.n.], 2014.
- SOUZA MENDES, P. R. DE; THOMPSON, R. L. A unified approach to model elasto-viscoplastic thixotropic yield-stress materials and apparent yield-stress fluids. **Rheologica Acta**, 2013. v. 52, n. 7, p. 673–694.

Recebido: 31 ago. 2017.

Aprovado: 02 out. 2017.

Como citar:

SILVA, H. S. et al. Modelagem matemática da equação constitutiva no reinício de escoamento em óleos gelificados. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>. Acesso em: .

Correspondência:

Hiago Souza da Silva

Rua Abílio Monteiro, número 215, Bairro Bom Jesus, Campo Largo, Paraná, Brasil.

Direito autoral:

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

