



# VISUALIZAÇÃO DO REINÍCIO DE ESCOAMENTO DE UM FLUIDO TIXOTRÓPICO EM TUBO HORIZONTAL

## Visualization of restart flow of a thixotropic fluid in horizontal pipeline

Gustavo Henrique Ceccato<sup>1</sup>, Angel Rivera Jimenez<sup>2</sup>, Admilson Teixeira Franco<sup>3</sup>

### RESUMO

Na produção de petróleo em campos de águas ultraprofundas podem surgir dificuldades no transporte de petróleos com alto teor de parafina. Durante situações em que o escoamento é interrompido devido a problemas técnicos ou atividades de manutenção, o petróleo parafínico em repouso apresenta uma estrutura semelhante a um gel, geralmente exibindo um comportamento tixotrópico e tensão limite de escoamento após um período de tempo. Para romper a estrutura e reiniciar o escoamento, são aplicadas pressões acima do valor normal de operação e isso pode causar sérios danos à tubulação de transporte. O objetivo deste estudo experimental é investigar e visualizar a desestruturação do material gelificado e estabelecer a pressão mínima para reiniciar o escoamento de materiais tixotrópicos com tensão limite de escoamento em tubos lisos e ranhurados. Uma solução aquosa de Laponita® 2wt% foi usada como material tixotrópico. O sistema de Velocimetria por Imagem de Partículas vinculado a uma configuração experimental permitiu a análise e visualização do reinício de escoamento. Os mapas de deformação e perfis de velocidade revelaram que devido à deformação próxima à parede ocorre uma possível falha adesiva que favorece a quebra do material. Além disso, a pressão de reinício do escoamento é afetada pelo deslizamento da parede.

**PALAVRAS-CHAVE:** Laponita®, Petróleo parafínico, Tixotropia, Velocimetria por imagem de partícula.

### ABSTRACT

In oil production at ultra deep-water fields, difficulties may arise in transporting oil with a high paraffin content. During some conditions, where flow is interrupted due to technical problems or maintenance activities, paraffinic petroleum at rest presents a gel-like structure, generally exhibiting thixotropic behavior and yield stress after a period of time. To break the structure and restart flow, pressures above the normal operating value are applied and this can cause serious damage to the transport piping. The objective of this experimental study is to investigate and visualize the breaking of the gelled material structure and establish the minimum pressure to restart the flow of thixotropic materials with yield stress in smooth and grooved geometry. An aqueous solution of Laponite® 2wt% was used as a thixotropic material. The Particle Image Velocimetry attached to an experimental setup allowed visualization and analysis of the restart flow. The strain maps and velocity profiles showed that due to strain close to the wall, a possible adhesive failure occurs that facilitates the breakage of the material. Furthermore, the restart flow pressure is affected by the wall slip.

**KEYWORDS:** Laponite®, Paraffinic petroleum, Thixotropy, Particle image velocimetry.

<sup>1</sup> Bolsista PIBIT do CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [gustavoceccato.2001@alunos.utfpr.edu.br](mailto:gustavoceccato.2001@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9448804191210755>.

<sup>2</sup> Pesquisador no Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [angeljimenez@alunos.utfpr.edu.br](mailto:angeljimenez@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5807473658929267>.

<sup>3</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [admilson@utfpr.edu.br](mailto:admilson@utfpr.edu.br). ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3561428456009236>.



## INTRODUÇÃO

A produção de óleo parafínico em campos offshore, especialmente em águas ultraprofundas, é afetada por problemas de bloqueio das linhas de transporte, normalmente causados pelo crescimento de cristais de parafina devido à diminuição da temperatura abaixo da temperatura de cristalização. Com o aparecimento contínuo de cristais de parafina, as propriedades reológicas do petróleo tornam-se complexas, o que pode resultar numa estrutura semelhante a um gel (VENKATESAN et al., 2005; CHALA et al., 2018). Nessa condição, reiniciar o escoamento pode apresentar alguns riscos, pois o sistema de bombeamento precisa fornecer a pressão superior à pressão operacional para romper a estrutura do gel e reiniciar o escoamento.

O petróleo parafínico gelificado exibe um comportamento reológico complexo (BARNES, 1999). Devido a diversas dificuldades ao trabalhar com este material, é comum encontrar estudos experimentais de reinício de petróleo parafínico gelificado utilizando materiais que tem tensão limite de escoamento (TLE) (MOISÉS et al., 2018). A utilização de materiais modelo permite um melhor entendimento entre a pressão necessária de reinício do escoamento e a TLE.

Se o material apresenta tixotropia, além da TLE, ele apresenta um atraso de tempo entre a mudança de tensão e um nível de desestruturação, o que torna a abordagem do estudo desses materiais não trivial (WALLS et al., 2003). Muitos métodos para calcular a TLE, nesse tipo de material, têm sido amplamente reportados (DZUY; BOGER, 1983), mas nenhum pode ser adotado como universal, devido em parte ao fato de que o valor da TLE depende também do tempo do processo que se deseja analisar. Por outro lado, existem outros fatores que podem afetar o cálculo da TLE, como o deslizamento na parede. Vários estudos relatam a presença e os efeitos deste fenômeno de deslizamento no escoamento de materiais com TLE (SOCHI, 2011; POUMARE et al., 2014; GARCÍA-BLANCO et al., 2023).

Neste artigo relatamos os resultados de um estudo experimental cujo objetivo é investigar o processo de quebra de materiais tixotrópicos e verificar se fenômeno de deslizamento afeta a pressão requerida para o reinício de escoamento.

## METODOLOGIA

### Preparação do Fluido

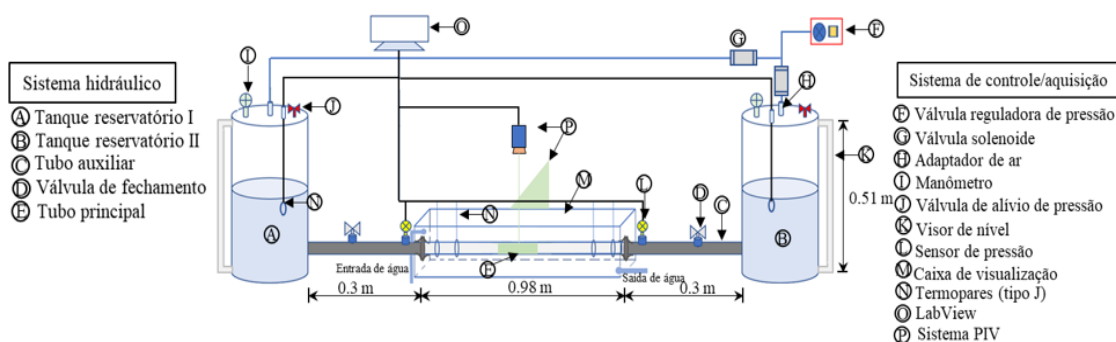
A preparação do fluido de Laponita® 2wt% foi realizada de acordo com Moisés et al., (2018). Inicialmente, foi necessário neutralizar a água destilada com um pH = 10. Após isso, foi feita a mistura de Laponita® 2wt% com água em um recipiente e misturado a 1600 rpm. Ao final de 30 minutos foi adicionado o cloreto de sódio (NaCl) na solução, e foi misturado por mais 30 minutos a 1600 rpm para garantir a homogeneização da solução. Após finalizar

a preparação do fluido foi coletada uma amostra da solução e monitorado o pH durante 7 dias para verificar a estabilização do fluido.

## Configuração experimental

Uma configuração experimental foi projetada para estudar o reinício de escoamento da solução Laponita® 2wt%. O dispositivo é composto basicamente por dois sistemas: um hidráulico e um sistema de controle e aquisição de dados. A Figura 1 mostra uma ilustração esquemática que identifica os componentes principais e os subcomponentes da bancada experimental.

Figura 1 - Ilustração esquemática dos componentes da configuração experimental



Fonte: Autor (2023)

## Procedimento experimental

Para analisar o reinício do escoamento transitório sob aplicação de pressão constante, foi necessário realizar uma rotina de trabalho definida pelos seguintes passos:

1. Definir a pressão necessária.
2. Iniciar o registro de dados de pressão e imagens do escoamento usando sensores de pressão e a técnica PIV 10 segundos antes de impor uma pressão.
3. Abrir a válvula reguladora de pressão.
4. Gravar as imagens da movimentação do fluido até atingir a pressão configurada no passo 1.
5. Em  $t=300$  s, gravar imagens usando a técnica PIV
6. Em  $t=600$  s, gravar imagens utilizando a técnica PIV.
7. Finalizar o registro de dados e imagens após  $t=600$ s.
8. Por fim, fechar a válvula reguladora de pressão.

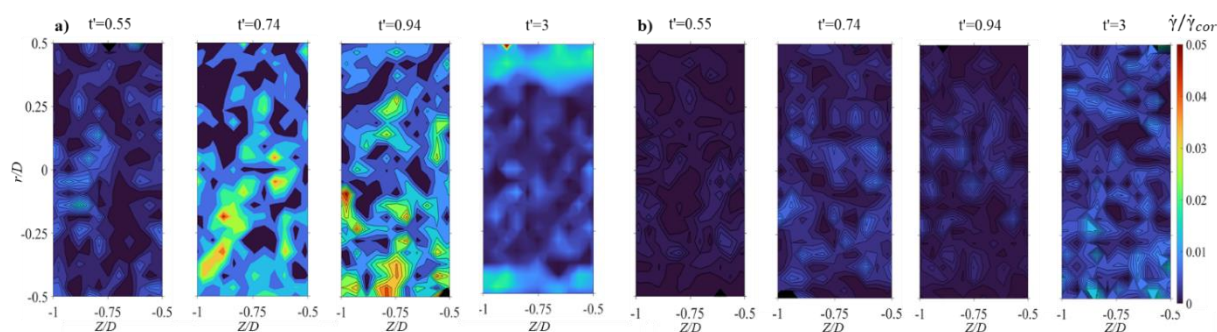
Com o objetivo de comparar os resultados dos campos de deformação e perfis de velocidade foi estabelecido uma escala de tempo adimensional ( $t'$ ). O tempo adimensional é a razão entre o tempo total do teste e o tempo crítico ( $t_c$ ), que é o tempo em que é atingido o valor de pressão configurado no passo 1 do procedimento experimental.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Evolução temporal dos mapas de deformação

A Figura 2 mostra a evolução temporal dos mapas de deformação da suspensão Laponita® 2wt% quando está sob uma pressão aproximada de 3120 Pa (tensão de cisalhamento na parede ( $\tau_w$ ) aproximada de 15 Pa). A Figura 2a mostra os resultados em tubo liso e observa-se que o valor de deformação varia entre  $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_{cor} = 0.025$  e  $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_{cor} = 0.035$  para os tempos adimensionais analisados. Também é possível observar que quando  $t^*=3$  a deformação se concentra próximo à parede do tubo, porém o valor é menor. Este comportamento oscilatório é semelhante a um sólido elástico, e também foi observado por Benmouffok-Benbelkacem et al., (2010). Um comportamento semelhante é observado no tubo ranhurado (Figura 2b), onde a deformação oscila em torno de  $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_{cor} = 0.015$ . Para o mesmo valor de pressão aplicado ao fluido em ambos os tipos de tubulação, é possível identificar que o fluido não quebrou sua estrutura gelificada e como consequência não se observa escoamento. Porém, a deformação é maior no tubo liso, portanto se o valor de pressão de 3120 Pa tivesse permanecido por mais tempo, um valor de deformação maior teria sido alcançado e como consequência poderia ter ocorrido o reinício do escoamento.

**Figura 2 – Campos de deformação para Laponita® 2wt% sob uma pressão de 3120 Pa: (a) configuração de tubo liso, (b) configuração para tubo ranhurado. Os valores de deformação e tempo são adimensionais**



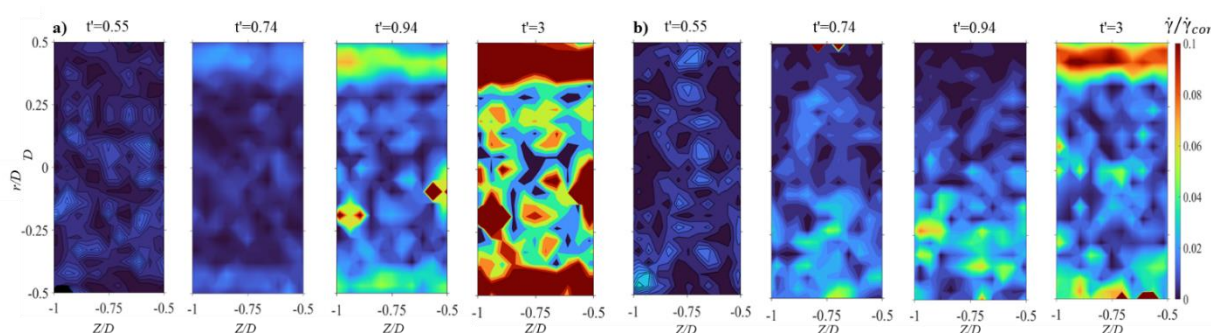
Fonte: Autor (2023)

A Figura 3 mostra os resultados da evolução temporal da deformação sob pressão aproximada de 3750 Pa ( $\tau_w=18Pa$ ). A Figura 3(a) mostra que após atingir o  $t_c$  a estrutura apresenta dois estágios de deformação. Inicialmente, quando  $t^*=0,55$  o material é insensível ao valor pressão e tende a se comportar como um sólido elástico, semelhante ao reportado na Figura 2(a). Quando o tempo atinge os valores de  $t^*=0.74$  e  $t^*=0.94$  pode-se observar que o material sofre uma deformação próximo à parede e como consequência ocorre uma falha adesiva nesta área. Em outras palavras, é gerada uma camada líquida entre a superfície de corte e o corpo principal do material. Esta camada de líquido ou camada de deslizamento permite iniciar a movimentação do material. Posteriormente, em  $t^*=3$ , observa-se que a região



de deformação perto da parede aumenta e que o material escoar com mais facilidade, mas na forma de coexistência de estados estruturados (sólidos) e fluidos. Esta descoberta é comparável com o segundo regime de escoamento reportado em alguns estudos do reinício de escoamentos de materiais com TLE e baixa tixotropia (POUMARE et al., 2014; LIU; DE BRUYN, 2018). Uma possível causa deste tipo de escoamento pode estar relacionada aos efeitos tixotrópicos, pelo que o material não consegue atingir a desestruturação completa.

**Figura 3 – Campos de deformação para Laponita® 2wt% sob uma pressão de 3750 Pa: (a) configuração de tubo liso, (b) configuração para tubo ranhurado. Os valores de deformação e tempo são adimensionais**



Fonte: Autor (2023)

A Figura 3(b) mostra os resultados para o mesmo valor pressão em tubo ranhurado. Observa-se que o material é insensível mesmo por tempos adimensionais mais longos e que somente em  $t'=3$  é observado um valor de deformação significativamente maior, mas ao parecer não gera nenhuma quebra estrutural no material gelificado. Este resultado é semelhante ao reportado na Figura 2b, mas com a diferença de que se observa uma evolução da deformação sem oscilações, embora insuficiente para quebrar o fluido.

Os resultados apresentados permitiram determinar que o valor da pressão para quebrar a estrutura gelificada e reiniciar o fluido num período de tempo de 600 segundos é de 3750 Pa. Também é possível concluir que o deslizamento da parede facilita a deformação de materiais gelificados em tubos lisos em comparação com o tubo ranhurado e como consequência, é necessária uma menor pressão para reiniciar o escoamento.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho, o reinício de um material viscoplástico em um tubo liso e ranhurado foi analisado. Os resultados de testes de visualização permitiram obter e comparar a deformação de um material de TLE e comportamento tixotrópico em tubos lisos e ranhurados. Observou-se que para um mesmo valor de tensão cisalhamento aplicado ao material, as superfícies lisas possibilitaram o reinício do escoamento devido a uma falha adesiva que trouxe como consequência o deslizamento da parede. O que influencia no requerimento de pressão para reiniciar o material dentro da tubulação.



## Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro da CNPq, Fundação Araucária e a UTFPR através do programa INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA (PIBIT). Agradecimentos especiais a Angel Rivera Jimenez, Yamid García, Eduardo Germer e Admilson Teixeira Franco pela ajuda e supervisão nos trabalhos.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- BARNES, H.A. A Brief History of the Yield Stress, *Applied Rheology*, v. 9, n. 6, p. 262 – 266, 1999.
- BENMOUFFOK-BENBELKACEM, G. et al. Non-linear viscoelasticity and temporal behavior of typical yield stress fluids: Carbopol, xanthan and ketchup. ***Rheologica acta***, v. 49, n. 3, p. 305-314, 2010.
- CHALA, G. et al. A Flow start-up and transportation of waxy crude oil in pipelines-A review. ***Journal of Non-Newtonian fluid mechanics***, v. 251, p. 69-87, 2018.
- DZUY, N.Q; BOGER, D.V. Yield stress measurement for concentrated suspensions. ***Journal of Rheology***, v. 27, n. 4, p. 321-349, 1983.
- GARCÍA-BLANCO, Y.J. et al. Rheological characterization of viscoplastic fluid flow in a pipe with wall slip using in situ particle image velocimetry. ***Rheologica Acta***, v. 62, n. 2-3, p. 93-110, 2023.
- LIU, Y.; DE BRUYN, J.R. Start-up flow of a yield-stress fluid in a vertical pipe. ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, v. 257, p. 50-58, 2018.
- MOISÉS, G. V. L. et al. The influence of thixotropy in start-up flow of yield stress fluids in a pipe. ***Journal of Petroleum Science and Engineering***, v. 171, p. 794-807, 2018.
- NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Measuring the flow properties of yield stress fluids. ***Annual Review of Fluid Mechanics***, v. 24, n. 1, p. 47-88, 1992.
- POUMAERE, A. et al. Unsteady laminar flows of a carbopol® gel in the presence of wall slip. ***Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics***, v. 205, p. 28-40, 2014.
- SOCHI, T. Slip at fluid-solid interface. ***Polymer Reviews***, v. 51, n. 4, p. 309-340, 2011.
- VENKATESAN, R. et al. The strength of paraffin gels formed under static and flow conditions. ***Chemical Engineering Science***, v. 60, n. 13, p. 3587-3598, 2005.
- WALLS, H. J. et al. Yield stress and wall slip phenomena in colloidal silica gels. ***Journal of Rheology***, v. 47, n. 4, p. 847-868, 2003.