

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SILVIO MANENTI JUNIOR

**VISUALIZAÇÃO DO REINICIO DE ESCOAMENTO DE
MATERIAL ELASTOVISCOPLASTICO EM TUBO CIRCULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

TCC2 – N° de Inscrição - 57

CURITIBA

2016

Silvio Manenti Junior

VISUALIZAÇÃO DO REINICIO DE ESCOAMENTO DE UM MATERIAL
ELASTOVISCOPLASTICO EM UM TUBO

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Admilson T. Franco

Coorientadores: Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
MSc., Rubens Rosario Fernandes

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "VISUALIZAÇÃO DO REINICIO DE ESCOAMENTO DE MATERIAL ELASTOVISCOPLASTICO EM TUBO CIRCULAR", realizado pelo aluno(s) Silvio Manenti Junior, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Admilson T. Franco, Dr
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Eduardo Matos Germer, Dr.
DAMEC, UTFPR
Coorientador

Rubens R. Fernandes, MSc
DAMEC, UTFPR
Coorientador

Prof. Cezar O. R. Negrão, PhD
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Raul Henrique Erthal, MSc
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 30 de novembro de 2016.

RESUMO

Fluidos viscoplásticos são observados em diversos processos produtivos, destacando-se os problemas relacionados à extração de petróleo com alto teor de parafina a baixas temperaturas e perfuração de poços de petróleo. Esses materiais possuem uma tensão limite de escoamento, a qual deve ser superada para que ocorra novamente o escoamento e o material apresente comportamento predominantemente viscoso. Assim, tem-se como objetivo visualizar os fenômenos associados ao reinício de fluido gelificado dentro de um tubo circular e transparente, associando a tensão limite de escoamento do material e a pressão aplicada. Para isso, propõe-se construir uma bancada experimental que possibilite avaliar os fenômenos associados ao reinício de escoamento de fluidos com tensão limite de escoamento, utilizando-se uma dispersão comercial de Carbopol[®] como material gelificado. A aplicação da pressão para deslocamento do fluido ocorre através da pressão hidrostática de um óleo hidráulico com viscosidade newtoniana e imiscível ao gel, contido em um reservatório a uma determinada altura. Desta forma, são aplicadas três faixas de tensão de cisalhamento na parede, considerando a tensão limite de escoamento do material, medida em um reômetro. Os resultados obtidos com o auxílio de uma filmadora passam por um pós-processamento de imagem, de maneira a se obter uma relação entre a pressão aplicada e a presença ou não de deslocamentos do fluido gelificado. Com isso é possível verificar a potencialidade da bancada em relacionar os diferentes níveis de tensão com o deslocamento do material gelificado, sugerindo alterações possíveis de forma a melhorar os resultados.

Palavras-Chave: Reinício de Escoamento; Tensão Limite de Escoamento; Visualização de Escoamento; Tensão de Cisalhamento na Parede; Deslocamento de Fluidos.

ABSTRACT

Viscoplastic fluids are observed in several industrial processes. Particularly, waxy crude oils flows at low temperature and drilling operations are of singular importance to the Brazilian industry. These fluids have a yield stress limit that must be surpassed to restart the flow. Therefore, the aim of the present work is to visualize the interface and the associated phenomena to the restart flow of a gelled fluid in a transparent tube, relating the pressure required to break the structure and the correspondent wall shear stress. For this purpose, an experimental apparatus is proposed to evaluate and visualize the interface breakage, using a commercial dispersion of Carbopol[®] as fluid test. The displacement of the gel is the result of a hydrostatic pressure applied by immiscible and Newtonian hydraulic oil in a reservoir with height control. Thus, three shear stress bands are applied considering the material yield limit stress. The results were obtained using a camera with image post-processing, making possible to obtain a relation between the pressure applied and fluid displacement rate. So it's possible to verify the high potentiality of the experimental apparatus, relating the different levels of pressure with the gelled material displacement, with suggestions to improve the results.

Keywords: Restart Flow; Yield Stress Limit, Flow Visualization, Wall Shear Stress; Fluid Displacement.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Lista de derivadas parciais da função $R = \tau_w$ em relação às variáveis mensuradas.	39
Tabela 3-2 – Evolução histórica de trabalhos sobre reinício de escoamento conforme o tipo de abordagem.	40
Tabela 5-1 – Relação de Incertezas de medição da bancada.	50
Tabela 5-2 – Valor percentual das incertezas para cada grandeza.	50
Tabela 5-3 – Pressões aplicadas nos testes.	52
Tabela 5-4 – Relação dos dados obtidos nos testes para cada Condição proposta.	57
Tabela A-1 – Viscosidade cinemática do óleo de acordo com a temperatura.	65
Tabela A-2 – Valores aferidos para cálculo da massa específica do óleo hidráulico.	66

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Desenho esquemático do reinício do escoamento de material gelificado.....	14
Figura 2.1 – Representação do comportamento dos materiais quando aplicada uma tensão de cisalhamento.....	17
Figura 2.2 – Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento de fluido newtoniano.....	19
Figura 2.3 – Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. Tipos de fluido: (1) Newtoniano; (2) Pseudoplástico; (3) Dilatante; e (4) Viscoplastico.....	21
Figura 2.4 – Gráfico de curvas genéricas da viscosidade aparente em função da taxa de deformação.....	22
Figura 2.8 – Força aplicada em um elemento infinitesimal devido a variação de pressão.....	23
Figura 3.1 – Efeito avalanche de uma suspensão de argila.....	28
Figura 3.2 – Bifurcação de viscosidade de uma suspensão de bentonita.....	28
Figura 3.3 – Rampa de tensão para uma dispersão de Carbopol (a) e uma solução de 10% de bentonita (b).....	29
Figura 3.4 – Elemento diferencial para balanço de forças em um material gelificado.....	31
Figura 3.5 – Tensão de falha pela taxa de resfriamento para falha adesiva e coesiva.....	33
Figura 4.1 – Circuito da bancada de testes.....	42
Figura 4.2 – Reservatório de líquido para quebra do gel.....	43
Figura 4.3 – Vista isométrica da proposta da estrutura para suporte da bancada.....	44
Figura 4.4 – Vista superior com a disposição dos elementos transversais para suporte da bancada.....	45
Figura 4.5 – Principais dimensões da estrutura da proposta de estrutura de suporte da bancada.....	45
Figura 4.6 – Esquema da interface do fluido gelificado.....	47
Figura 5.1 – Vista frontal da bancada montada.....	49
Figura 5.2 – Imagens do teste na Condição 1. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 600$ s.....	53
Figura 5.3 – Imagens do teste na Condição 2. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 600$ s.....	53

Figura 5.4 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 3.....	53
Figura 5.5 – Imagens do teste na Condição 3, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) t = 0s. (b) t = 120s. (c) t = 240s. (d) t = 360s. (e) t = 480s. (f) t = 600s.....	54
Figura 5.6 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 4.....	55
Figura 5.7 – Imagens do teste na Condição 4, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) t = 0s. (b) t = 120s. (c) t = 240s. (d) t = 360s. (e) t = 480s. (f) t = 600s.....	55
Figura 5.8 – Imagens do teste na Condição 5, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) t = 0s. (b) t = 9s. (c) t = 18s. (d) t = 27s. (e) t = 36s. (f) t = 52s.....	56
Figura 5.9 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 5.....	57
Figura A.1 – Curva da Tensão de Cisalhamento em função da Taxa de deformação.....	64
Figura A.2 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação a diferentes temperaturas.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

	Descrição	Unidade
τ	Tensão de cisalhamento	[Pa]
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	[s ⁻¹]
μ	Viscosidade newtoniana	[Pa.s]
η	Viscosidade aparente	[Pa.s]
τ_0	Tensão limite de escoamento	[Pa]
G	Módulo de Young	[Pa]
dF _x	Força infinitesimal no sentido do eixo x	[N]
dx	Comprimento infinitesimal no eixo x	[m]
dy	Comprimento infinitesimal no eixo y	[m]
dz	Comprimento infinitesimal no eixo z	[m]
$\frac{\partial p}{\partial x}$	Varição parcial infinitesimal da pressão no eixo x	[-]
dF _s	Varição infinitesimal do vetor força de superfície	[N]
p	Pressão	[Pa]
dF _B	Varição infinitesimal do vetor força de corpo	[Pa]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
V	Volume	[m ³]
\vec{a}	Vetor aceleração	[m/s ²]
h	Varição de altura hidrostática	[m]
F _p	Força devido à pressão	[N]
Δp	Varição de pressão	[Pa]
D	Diâmetro	[m]

F_w	Força da tensão de cisalhamento na parede	[N]
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede	[Pa]
L	Comprimento de tubo	[m]
α	Compressibilidade de fluido	[N/m ²]
c	Velocidade de propagação da onda de pressão	[m/s]
u_{Ri}	Incerteza associada a uma grandeza	[-]
x_i	Variável associada a função	[-]
R	Função analisada de incerteza experimental	[-]
u_{Xi}	Incerteza do instrumento de medição	[-]
t	tempo	[s]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS FLUIDOS.....	17
2.1.1	Fluidos Newtonianos.....	18
2.1.2	Fluidos Não Newtonianos.....	19
2.2	PRESSÃO HIDROSTÁTICA.....	22
2.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	25
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	26
3.1	FLUIDOS ESTRUTURADOS.....	26
3.1.1	Fluido Tixotrópico com tensão limite de escoamento.....	27
3.1.2	Fluido não-Tixotrópico com tensão limite de escoamento.....	29
3.2	REINÍCIO DE ESCOAMENTO.....	30
3.2.1	Compressibilidade do gel.....	31
3.2.2	Quebra de estrutura gelificada.....	32
3.2.3	Deslizamento nas paredes	33
3.2.4	Deslocamento de fluidos	34
3.2.5	Estudos anteriores	35
3.3	VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO.....	37
3.4	INCERTEZA EXPERIMENTAL	38
3.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	PROPOSTA DE BANCADA EXPERIMENTAL	41
4.1.1	Bancada experimental	41
4.1.2	Dimensões dos elementos utilizados na bancada experimental	42
4.1.3	Estrutura para suporte da bancada.....	43
4.2	PROTOCOLO DE EXPERIMENTO	46
4.2.1	Preparação de teste.....	46
4.2.2	Preparação de fluido gelificado dentro do tubo transparente	46
4.2.3	Visualização do reinício do escoamento	47
4.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	BANCADA EXPERIMENTAL.....	49
5.1.1	Faixa de pressão	49
5.1.2	Cálculo da incerteza experimental	50
5.1.3	Aplicação de pressão para quebra de interface.....	51
5.2	CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	58
6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE TESTE.....	64
	Propriedades do gel de ultrassom	64
	Propriedades do óleo hidráulico.....	65

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um material utilizado como matéria-prima para a produção de diversos produtos consumidos no mundo inteiro, como gasolina e óleo diesel. Além disso, o petróleo não é um bem renovável, sendo que a sua formação se deve ao depósito de matéria orgânica em camadas sedimentares ao longo de milhões de anos (TISSOT; WELTE, 1985). Reservas de petróleo podem estar em camadas muito profundas abaixo do solo ou do fundo do oceano, o que torna a sua exploração difícil e onerosa. Por isso, a pesquisa relacionada aos processos de perfuração e extração de petróleo torna-se atrativa, uma vez que permite a melhoria na eficiência e a redução de custos.

Ao longo do tempo, uma grande evolução tecnológica é percebida em equipamentos de visualização e captura de imagens, de forma que figuras de alta resolução sejam obtidas através de câmeras comerciais, assim como maior frequência de aquisição por segundo (FPS) sem perda de resolução. Dessa forma, conjuntamente ao aumento da capacidade de armazenamento e processamento de dados, é possível se observar fenômenos complexos de interesse tecnológico. Dentre os fenômenos interessantes sob o ponto de vista científico, pode ser destacado os escoamentos de fluidos em tubulações. Portanto, a medição de campos escalares e vetoriais de escoamentos através da captura de imagens é possibilitada pela evolução ocorrida nos dispositivos de aquisição de imagem (ADRIAN, 1991), o que favorece a evolução tecnológica de processos que envolvem os escoamentos em tubulações, como a produção de petróleo em águas profundas.

Segundo Bourgoyne *et al.* (1986), fluidos de perfuração auxiliam na remoção de cascalhos produzidos pela broca na escavação do poço e na sustentação hidrostática ao sistema de perfuração. Assim, evita-se o influxo de fluidos indesejados das formações porosas para o poço. Além disso, o fluido de perfuração auxilia na sustentação das paredes do poço enquanto não é realizada a cimentação (VIEIRA DA ROCHA, 2010). O fluido de perfuração também deve formar uma estrutura gelificada quando o escoamento é interrompido, de forma a manter os cascalhos em suspensão para evitar que sedimentem e sotorem a broca. Além disso, os fluidos de perfuração atuam como lubrificantes e refrigerantes do sistema de perfuração (DARLEY; GREY, 1988).

Outro exemplo de escoamento de fluido de grande interesse industrial é a extração do petróleo. Em geral, o petróleo é composto por diversos componentes orgânicos, entre eles as parafinas. As parafinas são compostos orgânicos formados basicamente por ligações simples

de átomos de carbono e hidrogênio. Por sua vez, essas ligações podem ser de cadeias simples, ramificadas ou cíclicas (THOMAS, 2011).

Segundo Thomas (2011), petróleos parafínicos são óleos que apresentam em sua composição química teor de parafina superior a 75% de massa. Este tipo de óleo possui comportamento reológico similar a fluidos newtonianos quando se encontram a temperaturas altas o suficiente para que não ocorra a nucleação de cristais de parafina (PEERAPORNLERD et al, 2014). Entretanto há situações operacionais nas quais escoamentos de óleos parafínicos são resfriados a temperaturas nas quais se observa precipitação de cristais de parafina, de forma que o fluido comece a apresentar comportamento reológico não newtoniano. Essa situação é recorrente no caso de exploração de campos de petróleo em águas profundas, sendo este processo representando quase 95% da produção total de petróleo no Brasil (ANP, 2016), uma vez que o leito do oceano se encontra a temperaturas de aproximadamente 4°C (OLIVEIRA; NEGRÃO, 2015). Isso ocorre quando o escoamento advindo da extração do poço de petróleo é interrompido, o que pode acontecer devido a manutenções programadas ou em emergências operacionais.

Para que um material gelificado comece a escoar, observa-se a necessidade de altas pressões necessárias para o reinício do escoamento. Essas pressões são usualmente maiores do que aquelas utilizadas para que se mantenha o escoamento subsequente do material (NEGRÃO; FRANCO; ROCHA, 2011). Logo, o pico de pressão necessário para o reinício do escoamento deve ser considerado no projeto de tubulações de regiões aonde se observa esse fenômeno.

Considerando que muitos dos fenômenos observados são de difícil compreensão e ocorrem em regiões de difícil acesso para uma montagem eficiente de equipamentos de observação e medição, torna-se atraente economicamente realizar testes em laboratório de forma a simular escoamentos de procedimentos industriais complexos. Dessa forma, através da visualização de escoamentos em bancadas experimentais torna-se possível a investigação dos fenômenos associados à quebra da estrutura gelificada e conseqüente reinício do escoamento dos fluidos. Por conseqüência, processos produtivos podem ser otimizados e terem seus custos reduzidos.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Fluidos complexos que podem formar uma estrutura gelificada em tubulações representam um desafio para operações industriais. Em geral, ao reiniciar um escoamento

ocorre um pico de pressão associado à quebra da estrutura gelificada do material. Na Figura x é mostrado de forma esquemática um problema de um fluido gelificado em uma tubulação e como é realizado o reinício do escoamento.

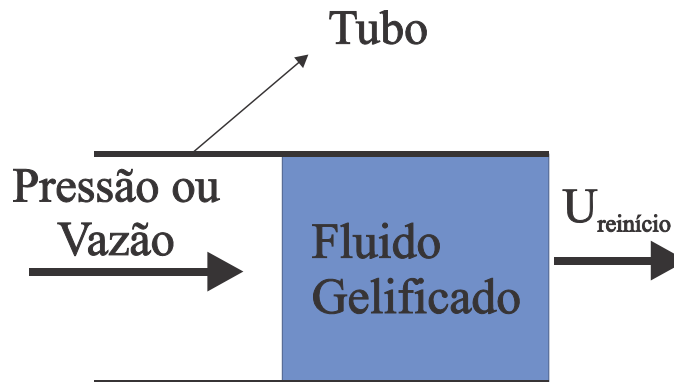


Figura 1.1 – Desenho esquemático do reinício do escoamento de material gelificado.

Fonte: Autoria própria¹

Assim, compreender os mecanismos para o reinício de escoamento de fluidos gelificados em tubulações permite a viabilidade de projetos considerando o pico de pressão que deve ser aplicado.

Existem diversas formas de se abordar o reinício do escoamento de fluidos gelificados. Dentre elas, podem-se citar a construção de aparatos experimentais que representem em escala reduzida os fenômenos que ocorrem em operações de perfuração e produção, o uso de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) e abordagens teóricas, com base em modelos matemáticos. Dentre essas abordagens, tem destaque o uso de aparatos experimentais pela confiabilidade nos resultados obtidos e pela melhor representatividade de fenômenos complexos em experimentos com condições operacionais bem controladas.

1.2 OBJETIVOS

No presente trabalho é projetada e construída uma bancada experimental que possibilite a visualização do deslocamento de material viscoplástico no interior de tubo circular empurrado por um óleo newtoniano à pressão constante, utilizando-se uma câmera de vídeo. Paralelamente, visa-se estimar a tensão de cisalhamento na parede necessária para o que o material se movimente conforme a tensão limite de escoamento do material.

¹ Figuras e tabelas sem indicação de fonte são de autoria própria.

1.3 JUSTIFICATIVA

Considerando que a indústria do petróleo representou aproximadamente 13% do PIB brasileiro em 2014 (PETROBRAS, 2014) e que a produção da área do pré-sal tem registrado aumento na produção média diária de 41 mil barris por dia, em 2010, para 1 milhão de barris por dia, em 2016 (PETROBRAS, 2016), o desafio de compreender e melhorar processos de perfuração e extração de poços de petróleo torna-se atrativo do ponto de vista econômico. Entre 2012 e 2014, a Petrobrás investiu cerca de R\$ 3,4 bilhões em pesquisa e desenvolvimento, sendo 60,7% do montante total destinado à área de Exploração e Extração (PETROBRAS, 2014). Há uma estimativa de aproximadamente R\$ 130,3 bilhões investidos nas diversas áreas de produção para o quadriênio 2015-2019. Por isso, pesquisas focadas na resolução de problemas encontrados na indústria do petróleo, na Petrobras, têm grande aporte financeiro, principalmente nas áreas de exploração e produção.

Estes dados financeiros são um grande atrativo para o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de perfuração e extração de poços de petróleo. Este trabalho motiva-se também pelo fato do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não-Newtonianos (CERNN) da UTFPR – Curitiba possuir projetos de pesquisa voltados para o estudo do fenômeno de reinício de escoamento de materiais gelificados. A caracterização do comportamento reológico de fluidos é um objeto de estudo da mecânica dos fluidos, disciplina ministrada para o curso de engenharia mecânica da UTFPR – Curitiba.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é organizado em seis capítulos e um apêndice, sendo o Capítulo 1 a introdução do trabalho que situa a proposta de pesquisa abordando um problema específico, os objetivos pretendidos e a justificativa para a realização do mesmo.

No Capítulo 2 são abordados os conhecimentos básicos necessários para a realização do trabalho. Este conteúdo explora conceitos vistos no curso de Engenharia Mecânica da UTFPR.

No Capítulo 3 é realizado uma revisão de trabalhos relacionados ao reinício de escoamento de fluidos gelificados em tubulações. Nesta seção procura-se levantar os efeitos associados ao problema proposto e como os mesmo afetam a dinâmica do escoamento. Também se apresentam brevemente conceitos sobre visualização de escoamentos em tubos.

No Capítulo 4 é proposto uma bancada experimental para a realização deste trabalho, além da metodologia necessária para a resolução do problema que é abordado. Os aspectos considerados estão vinculados aos fenômenos citados no Capítulo 3.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a bancada experimental. Estes resultados são baseados nas imagens capturadas durante os testes experimentais realizados.

Por fim, no Capítulo 6 é realizada a conclusão do trabalho, juntamente com uma breve discussão dos resultados. Também são propostos temas para trabalhos futuros, considerando os resultados obtidos.

No Apêndice A são apresentadas as curvas de escoamento e viscosidade obtidas dos fluidos utilizados nos testes de visualização do reinício do escoamento, utilizando-se um reômetro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do trabalho é feita uma revisão sobre a Mecânica dos Fluidos, abordando as definições de fluidos newtonianos e não newtonianos a partir do comportamento viscoso de diferentes materiais, considerando-se também fluidos que possuem suas propriedades reológicas dependentes do tempo, além da definição de fluidos viscoelásticos. Uma breve revisão sobre pressão hidrostática também é apresentada de forma a possibilitar que esses conceitos possibilitem o estudo e a compreensão do fenômeno de quebra de interface de fluidos gelificados, que é estudado neste trabalho.

2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS FLUIDOS

Segundo White (2003), sob a ótica da mecânica dos fluidos podem-se distinguir dois estados da matéria: sólido e fluido. O que diferencia é o seu comportamento mecânico ao ser submetido a uma tensão de cisalhamento. Os sólidos apresentam recuperação elástica quando submetidos a tensões normais ou de cisalhamento menores que a tensão limite de escoamento. Por outro lado, fluidos não apresentam recuperação elástica, mas dissipam a energia imposta. Isso fica mais claro quando um sólido elástico e um fluido viscoso são submetidos à mesma tensão de cisalhamento. Enquanto o sólido é capaz de suportar a tensão de cisalhamento, de forma a manter uma deformação proporcional à tensão imposta, os fluidos se deformam continuamente com uma taxa de deformação constante. (FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2010). A Figura 2.1 apresenta de forma genérica a diferença de resposta entre um sólido elástico e um fluido viscoso quando submetido a uma tensão de cisalhamento. Como exemplos de fluidos têm-se a água, ar atmosférico e óleos lubrificantes.

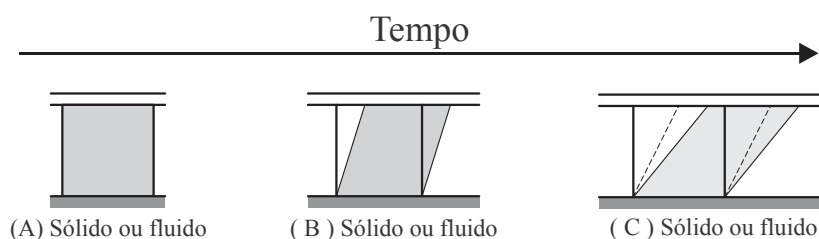


Figura 2.1 – Representação do comportamento dos materiais quando aplicada uma tensão de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de Fox, McDonald e Pritchard (2010).

Fluidos podem ser classificados de acordo com o comportamento da viscosidade, que pode ser definida como a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento τ e a taxa de deformação $\dot{\gamma}$. Podem-se classificar os fluidos conforme o comportamento de sua viscosidade, pois para alguns materiais pode ser constante, para outros depende da taxa de deformação imposta ou ainda do tempo de aplicação do cisalhamento. Além disso, alguns materiais podem ainda apresentar simultaneamente efeitos viscosos e elásticos (MACOSKO, 1994). Dessa forma, apresenta-se a seguir uma breve revisão a respeito dos diferentes comportamentos reológicos de fluidos newtonianos e não newtonianos.

2.1.1 Fluidos Newtonianos

O fluido newtoniano é a representação mais simples do comportamento de fluido. A lei de Newton para viscosidade considera que a tensão de cisalhamento aplicada é diretamente proporcional à taxa de deformação, sendo que para escoamento unidimensional a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é representada na Equação (2.1).

$$\tau = \dot{\gamma}\mu \quad (2.1)$$

Sendo τ a tensão cisalhante, μ a viscosidade newtoniana e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação. É possível verificar através da Equação (2.1) que a constante de proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é a viscosidade. Para o caso de um fluido newtoniano, a viscosidade é constante e independente do tempo e da taxa de deformação ou da tensão de cisalhamento imposta, sendo função apenas do material observado, da temperatura e da pressão na qual é realizado o escoamento (BARNES, 2000). A Figura 2.2 mostra, de forma genérica, um gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para um fluido newtoniano. Observa-se que a curva passa pela origem, indicando que mesmo pequenas tensões de cisalhamento são capazes de provocar o escoamento viscoso do material, representado pela taxa de deformação não nula.

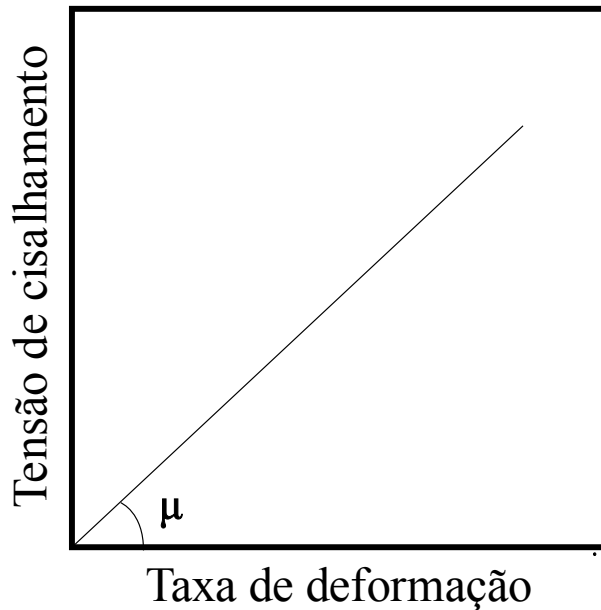


Figura 2.2 – Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento de fluido newtoniano.

Porém, Chhabra e Rhicardson (1999) ressaltam que a classificação completa de fluido newtoniano também deve levar em conta a resposta do material com relação as tensões normais. Quando um fluido newtoniano é submetido a uma tensão de cisalhamento, o material não apresenta tensões normais perpendiculares ao sentido do escoamento, além das tensões compressivas causadas pela pressão hidrostática.

2.1.2 Fluidos Não Newtonianos

Em grande parte das aplicações industriais os fluidos não apresentam o comportamento de um fluido newtoniano (BIRD; ARMSTRONG; HASSAGER, 1987). A viscosidade depende de outros fatores, como a taxa de deformação ou o tempo, levando a caracterizações mais complexas. Fluidos que apresentam relações não lineares entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação ou que não passam pela origem são classificados como fluidos não newtonianos (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Com isso, torna-se importante compreender os diferentes comportamentos reológicos dos fluidos não newtonianos. A viscosidade, para estes casos não é mais constante e passa ser função da taxa de deformação e/ou do tempo, além da temperatura e pressão.

Chhabra e Richardson (1999) sugerem a classificação dos fluidos não newtonianos da seguinte maneira:

- Fluidos cuja viscosidade é função apenas da taxa de deformação são chamados de Fluidos Newtonianos Generalizados (FNG);
- Materiais que possuem sua viscosidade dependente do tempo quando submetidos ao cisalhamento são chamados de fluidos dependentes do tempo;
- Por fim, materiais que apresentam comportamento misto entre comportamento viscoso e elástico são denominados viscoelásticos.

Essas características, em alguns fluidos, podem ocorrer de forma conjunta, ou seja, um fluido pode ser FNG e dependente do tempo, sendo até mesmo observado fluidos que apresentam as três características simultaneamente (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Dessa forma, a seguir, são apresentadas as características inerentes a cada classe apresentada, de maneira a possibilitar uma melhor compreensão no comportamento reológico de fluidos complexos.

2.1.2.1 Fluido Newtoniano Generalizado (FNG)

FNG são materiais que possuem a viscosidade dependente da taxa de deformação (BIRD; ARMSTRONG; HASSAGER, 1987). Assim, de uma forma generalizada, para um escoamento unidimensional em regime isotérmico, a tensão de cisalhamento é dada pela Equação (2.2).

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) \quad (2.3)$$

Sendo que η é a viscosidade aparente do fluido, de maneira que é possível notar que a Equação (2.2) assemelha-se a Lei de Newton da Viscosidade, descrita na Equação (2.1), porém com a viscosidade aparente sendo função da taxa de deformação, como visto na Equação (2.3). Sendo assim, a Lei de Newton da Viscosidade é um caso particular de quando $\eta = \mu$.

A correlação apresentada na Equação (2.2) provém de diferentes correlações empíricas como as equações de ajuste de viscosidade de Lei de Potência, Herschel-Bulkley, Bingham, entre outros. Essas equações visam descrever os diferentes tipos de curvas observadas em FNG. A Figura 2.3 ilustra os diferentes comportamentos observados para os fluidos independentes do tempo.

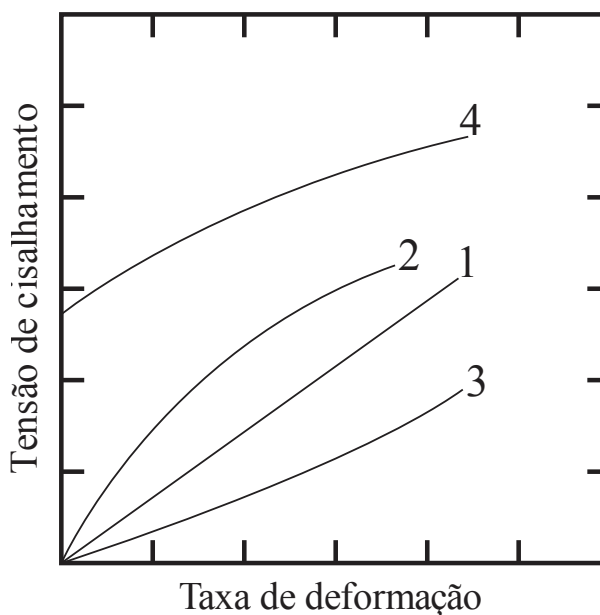


Figura 2.3 – Curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. Tipos de fluido: (1) Newtoniano; (2) Pseudoplástico; (3) Dilatante; e (4) Viscoplástico. Adaptado de Chhabra e Richardson (1999).

Na Figura 2.3 a curva 1 representa o comportamento de um fluido newtoniano, descrito na Seção 2.1.1. A curva 2 representa o comportamento dos fluidos chamados de pseudoplásticos que apresentam um decréscimo no valor de η com o aumento da taxa de deformação $\dot{\gamma}_{yx}$. A curva 3 descreve o comportamento dos fluidos dilatantes, os quais apresentam acréscimo no valor de η com o aumento da taxa de deformação. Finalmente, a curva 4 representa o comportamento dos fluidos viscoplásticos, que possuem uma tensão limite de escoamento τ_0 que deve ser superada para que ocorra o escoamento do material e podem apresentar η variável ou constante.

Na Figura 2.4 é apresentado de forma genérica o comportamento da viscosidade aparente η em função da taxa de deformação. Sendo assim, para um fluido newtoniano a viscosidade é constante, enquanto para um fluido dilatante a viscosidade aparente aumenta e para o fluido pseudoplástico a viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação.

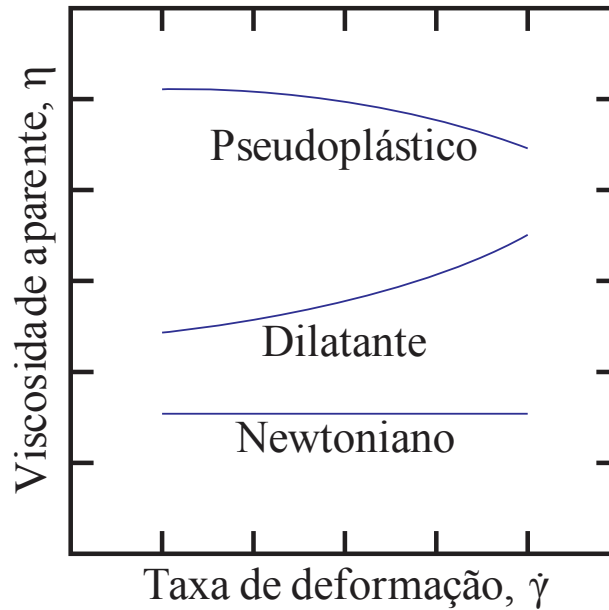


Figura 2.4 – Gráfico de curvas genéricas da viscosidade aparente em função da taxa de deformação.

A classificação apresentada possui modelos matemáticos que conseguem descrever de forma eficiente e simples escoamentos de FNG. Porém para fluidos complexos, que possuem sua viscosidade dependente do tempo e efeitos de tensão normal, os modelos de FNG não são adequados. Para isso necessita-se descrever os fluidos dependentes do tempo e os fluidos viscoelásticos, que são apresentados nas seções a seguir.

2.2 PRESSÃO HIDROSTÁTICA

Segundo Fox, McDonald E Pritchard (2010), o estudo de fluidos em repouso é observado quando o material não é submetido a tensões de cisalhamento. Este campo da mecânica dos fluidos é o caso mais simples a ser estudado, porém com aplicação prática dos seus conceitos desenvolvidos. Como exemplo podem-se citar os medidores de pressão, o estudo de forças atuando em corpos submersos e sistemas hidráulicos.

Considerando um volume infinitesimal em repouso em relação ao sistema inercial de coordenadas, como visto na Figura 2.5, apenas a tensão normal atua em cada face do corpo. Ressalta-se que neste caso apenas se representa a aplicação de uma força nas faces do plano yz para facilitar a visualização.

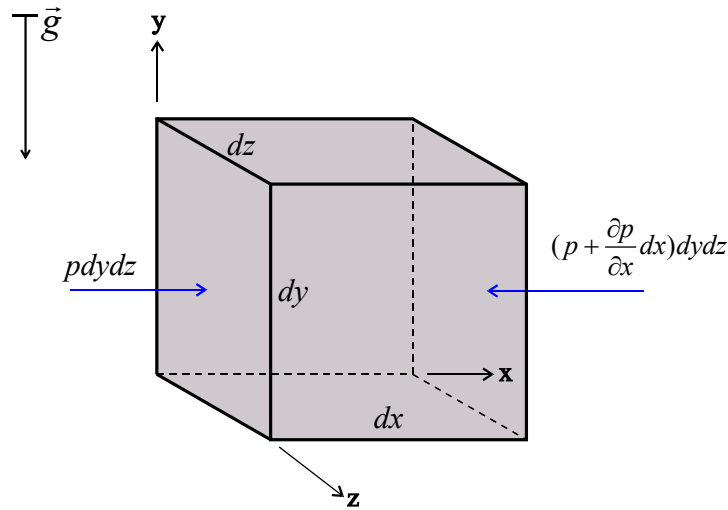


Figura 2.5 – Força aplicada em um elemento infinitesimal devido a variação de pressão.

Fonte: Adaptado de White (2003).

Desta forma, considerando a pressão normal aplicada nas superfícies do elemento, paralelas ao plano yz , tem-se que a resultante de forças de superfície no sentido do eixo x é dado pela Equação (2.6).

$$dF_x = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \quad (2.6)$$

Sendo dF_x a componente da força de superfície infinitesimal no sentido x , dx , dy e dz as dimensões do elemento infinitesimal e $\frac{\partial p}{\partial x}$ a variação da pressão no sentido do eixo x .

Logo, estendendo a mesma aplicação de forças nas outras faces que são paralelas aos planos xz e xy , o vetor das forças de superfície, $d\vec{F}_s$, aplicadas ao elemento é dado pela Equação (2.7).

$$d\vec{F}_s = dF_x \vec{i} + dF_y \vec{j} + dF_z \vec{k} = -\left(\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k}\right) dx dy dz = -(\nabla p) dx dy dz \quad (2.7)$$

Conjuntamente com as forças de superfícies atuantes no elemento, também atuam forças de campo, que para este caso é representado pela força da gravidade $\vec{g} = -g\vec{j}$, atuando apenas no sentido do eixo y, conforme a Figura 2.5. Isto posto, a Equação (2.8) representa o vetor das forças de corpo atuando no elemento.

$$d\vec{F}_B = \rho \vec{g} dx dy dz = \rho g(\vec{i}) dx dy dz = \rho g(\vec{i}) dV \quad (2.8)$$

Sendo $d\vec{F}_B$ a força de corpo, ρ a massa específica do elemento e dV o volume infinitesimal do elemento. Com a definição das forças de corpo e de superfície, a força atuando no elemento infinitesimal é a soma de $d\vec{F}_B$ e $d\vec{F}_S$, conforme visto na Equação (2.9).

$$d\vec{F} = d\vec{F}_B + d\vec{F}_S \quad (2.9)$$

Com isso, aplicando a segunda Lei de Newton, na qual $d\vec{F} = \vec{a} dm$, sendo $dm = \rho dV$, desconsiderando os efeitos viscosos e que o elemento está em estado estacionário, ou seja, a aceleração do corpo é $\vec{a} = 0$, obtém-se a Equação (2.10).

$$(-\nabla p) + \rho \vec{g} = 0 \quad (2.10)$$

Por fim, considerando que a aceleração da gravidade atua apenas no sentido do eixo y, de forma que $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0$, a variação infinitesimal da pressão é mostrada pela Equação (2.11).

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g \quad (2.11)$$

A Equação (2.11) ao ser integrada, considerando que o material do elemento é incompressível, remete à Equação (2.12) usualmente utilizada para mensurar a variação de pressão hidrostática (WHITE, 2003). Dessa forma, a Equação (2.12) mostra que a variação hidrostática depende apenas da variação da altura (h) da coluna de fluido, no eixo y, independentemente do comportamento viscoso do material ser newtoniano ou não newtoniano.

$$\Delta p = \rho gh \quad (2.12)$$

2.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

No Capítulo 2 foi apresentado uma breve revisão sobre conceitos fundamentais da mecânica dos fluidos, como a hipótese de modelagem como um meio contínuo, como classificar os diferentes tipos de fluidos, as diferenças entre cada classificação a partir da viscosidade e a aplicação da pressão hidrostática em fluidos.

Foram introduzidos conceitos fundamentais da diferença entre fluido newtoniano e fluido não newtoniano, além da subdivisão, comumente presente na literatura, dos fluidos não newtonianos. Essa subdivisão é conveniente, visto que fluidos utilizados em processos industriais apresentam as características mostradas: FNG, fluidos dependentes do tempo e fluidos viscoelásticos.

Por fim, é importante ressaltar que fluidos complexos podem apresentar a combinação de características, como por exemplo, as dispersões de Carbopol[®], que são fluidos poliméricos que apresentam comportamento viscoplástico (LUU; PHILLIPE; CHAMBOM, 2015; BENMOUFFOK-BENBELKACEM et al., 2010). É possível que ocorra a combinação das três características ao simultaneamente, ou seja, que um fluido seja viscoelástico, com tensão limite de escoamento e dependente do tempo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre os principais assuntos relacionados ao experimento proposto por este trabalho. Primeiramente, conceitos de fluidos estruturados são apresentados, descrevendo uma forma de classificação considerando se há dependência com o tempo das propriedades do fluido.

Em seguida, conceitos sobre o reinício de escoamento são apresentados de forma a relacionar a quebra da estrutura com a tixotropia do material, além de efeitos relevantes como o pico de pressão, compressibilidade do material e sua influência na propagação da onda de pressão, e deslizamento na parede. Uma tabela com trabalhos relevantes que são encontrados na literatura sobre o assunto é mostrada de forma a resumir os esforços de pesquisadores nos últimos anos.

Por fim, uma breve descrição sobre visualização de escoamentos é apresentada, considerando que o experimento proposto requer a captura de imagens no instante da quebra da interface.

3.1 FLUIDOS ESTRUTURADOS

No Capítulo 1 é introduzido o fenômeno de gelificação de fluidos dentro de tubulações, um aspecto a ser considerado no projeto de tubulações e dutos. Fluidos gelificados são materiais que possuem microestruturas complexas e quando submetidas a determinadas condições de escoamento podem se comportar de forma similar a sólidos elásticos. Podem-se citar dispersões de Carbopol (CARNALI; NASER, 1992), óleos parafínicos resfriados abaixo da temperatura de cristalização (PEERAPORNLERD et al., 2014), cosméticos e produtos alimentícios (STOKES; TELFORD, 2004), fluido de perfuração (BALHOFF et al., 2011), entre outros.

Uma característica de materiais gelificados é a presença de uma tensão limite de escoamento, a qual deve ser superada para que o material possa escoar como um fluido viscoso. Dessa forma, Moller et al (2009) sugerem a distinção entre dois tipos de fluidos que apresentam tensão limite de escoamento, não-tixotrópico e tixotrópico. Essa distinção é importante pelo fato de que um fluido tixotrópico possuir a sua viscosidade dependente do tempo, além do histórico térmico e de cisalhamento do material, e da taxa de cisalhamento. Por outro lado, fluidos não-tixotrópicos e que apresentam tensão limite de escoamento possuem apenas a sua viscosidade dependente da taxa de cisalhamento.

Essa diferenciação é importante pelo fato de que os projetos de bancadas experimentais devem considerar a natureza do fluido utilizado, de modo que a preparação de amostras para testes deve ser criteriosamente desenvolvida, considerando o comportamento reológico desses materiais.

3.1.1 Fluido Tixotrópico com tensão limite de escoamento

Fluidos tixotrópicos, como apresentado na Seção **Erro! Fonte de referência não encontrada**, apresentam decréscimo de viscosidade ao longo do tempo, além da dependência da taxa de deformação, pressão e temperatura. O decréscimo contínuo e reversível da viscosidade ao longo do tempo deve-se a desestruturação da microestrutura do material (MEWIS; WAGNER, 2009).

Entretanto, mantendo-se uma taxa de deformação constante ao longo do tempo com magnitude capaz de desestruturar o material e superar a tensão limite de escoamento, a viscosidade tende a atingir um valor finito e constante (MEWIS; WAGNER, 2009), de forma que a velocidade de quebra da microestrutura do material é igual a de regeneração da mesma ao alcançar um patamar constante de tensão à uma dada taxa de deformação (MOLLER et al, 2009).

Essa característica de regeneração da estrutura molecular é um dos critérios para a distinção de um fluido tixotrópico com tensão limite de escoamento e um não-tixotrópico. Coussot et al. (2002a) mostram que há uma diferença entre esses dois tipos de materiais através de um teste de plano inclinado, o qual consiste em aumentar o ângulo de inclinação de um plano até que o material comece a escoar. Se o material for tixotrópico, ocorre um efeito chamado avalanche, que acontece quando o plano é inclinado até um ângulo crítico no qual o fluido comece a escoar abruptamente com decréscimo da viscosidade ao longo do tempo até um patamar finito. Na Figura 3.1 mostra-se um experimento desse efeito para uma suspensão de argila em um plano inclinado.



Figura 3.1 – Efeito avalanche de uma suspensão de argila.

Fonte: Coussot et al. (2002b).

Com esse experimento é possível compreender a bifurcação de viscosidade, como visto na Figura 3.2. Para exemplificar a bifurcação de viscosidades é necessário mensurar sob qual tensão aplicada há uma maior taxa de destruturação da microestrutura em comparação à taxa de reconstrução. Aplicando-se diferentes tensões ao longo do tempo em um fluido tixotrópico, obtém-se a um gráfico similar a Figura 3.2, na qual é delineada uma faixa de bifurcação do comportamento da viscosidade. Portanto, quando aplicada uma tensão menor que uma tensão crítica, a viscosidade tende a um valor infinito, enquanto, para o caso de a tensão aplicada ser maior que a tensão crítica, a viscosidade tende a um patamar finito.

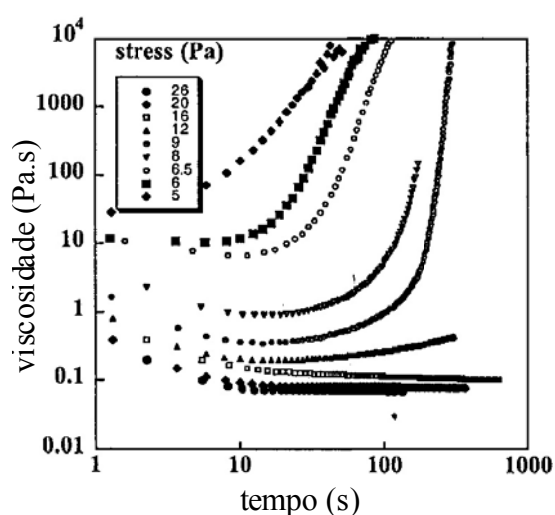


Figura 3.2 – Bifurcação de viscosidade de uma suspensão de bentonita.

Fonte: Adaptado de Coussot et al. (2002b).

Fluidos tixotrópicos também possuem sua tensão limite de escoamento dependente do histórico de cisalhamento, ou seja, um parâmetro estrutural dependente do tempo afeta o nível de estruturação da microestrutura do material (COUSSOT et al. 2002a). Assim, quanto mais estruturado o material, maior é a tensão que deve ser aplicada para que o material escoe.

Fernandes et al. (2016) mostram que para testes em reômetro, ao se manter condições iniciais de pré-cisalhamento e temperatura iguais, o pico de pressão ocorre para valores menores conforme menor for o tempo de recuperação da amostra, demonstrando o efeito do tempo de repouso de um material tixotrópico.

3.1.2 Fluido não-Tixotrópico com tensão limite de escoamento

Um experimento que mostra de forma simples como um fluido não-tixotrópico com tensão limite de escoamento se comporta é a rampa de tensão. Neste experimento é imposta uma taxa de deformação, de forma a medir a tensão de cisalhamento imposta ao material. Esse processo é realizado aumentando-se gradualmente a taxa de deformação até um determinado valor, seguido por um decréscimo na taxa de deformação. Um fluido não-tixotrópico apresenta um comportamento como visto na Figura 3.3(a), enquanto um fluido tixotrópico é representado pela Figura 3.3(b).

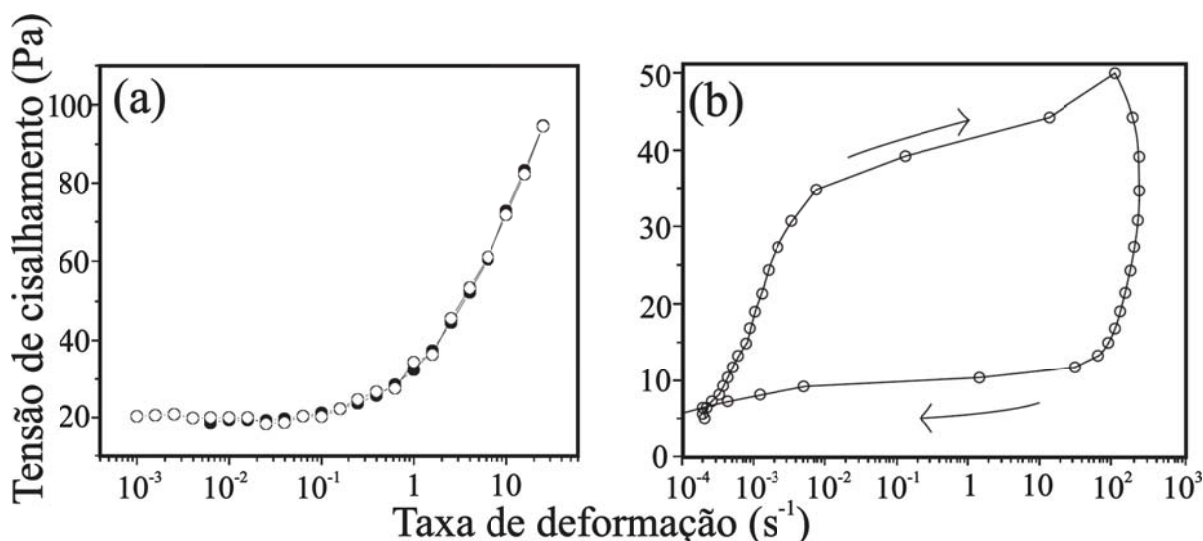


Figura 3.3 – Rampa de tensão para uma dispersão de Carbopol (a) e uma solução de 10% de betonita (b).

Fonte: Adaptado de Möller et al. (2009).

A diferença observada em um teste de rampa de tensão advém do fato que o fluido tixotrópico tem sua viscosidade dependente do tempo e de como a sua estrutura se reorganiza

após ser quebrada. Por outro lado, fluidos não-tixotrópicos que apresentam tensão limite de escoamento tem a capacidade de reorganizar sua estrutura rapidamente, diferentemente de como ocorre com fluidos tixotrópicos que necessitam largas escalas de tempo para recuperar plenamente sua estrutura.

3.2 REINÍCIO DE ESCOAMENTO

Nos casos em que é observada a formação de uma estrutura gelificada dentro de tubos, com ênfase aos casos da gelificação de óleo parafínicos extraídos de poços de petróleo e do fluido de perfuração, em algum momento é necessário que o escoamento desses fluidos seja reiniciado.

Em geral, altas pressões de bombeamento são requeridas para dar o reinício do escoamento (OLIVEIRA; NEGRÃO, 2015), sendo interessante compreender os mecanismos de como isso ocorre de forma a viabilizar processos produtivos nos quais ocorre a formação de uma estrutura gelificada.

Além disso, o comportamento reológico de materiais gelificados apresenta características não newtonianas apresentando tensão limite de escoamento e em alguns casos efeitos de tixotropia, como relatados em óleos parafínicos (DIMITRIOU; McKINLEY, 2014) e fluidos de perfuração (ANDRADE et al., 2016), por exemplo.

De maneira simples, Perkins e Turner (1971) propõe um balanço de forças sendo que a força devido à pressão sobre o material gelificado seja igual à força resultante da resistência ao cisalhamento do material na parede, conforme mostrado no elemento diferencial da Figura 3.4. A força devido à aplicação da pressão é dada pela Equação (3.1), sendo F_p a força devido à pressão, Δp a variação da pressão e D o diâmetro do tubo. Enquanto a força decorrente ao cisalhamento nas paredes, F_w , é descrita na Equação (3.2), sendo τ_w a tensão na parede e L o comprimento da tubulação em contato com o material gelificado. Assim, o balanço de forças é descrito pela Equação (3.3).

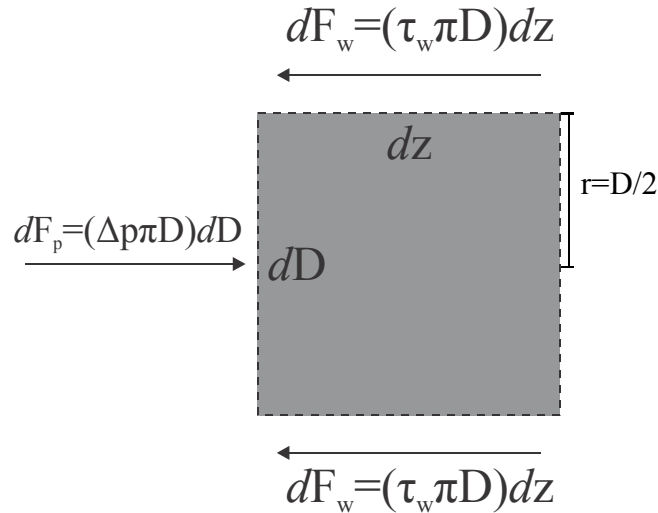


Figura 3.4 – Elemento diferencial para balanço de forças em um material gelificado.

$$F_p = \frac{\Delta p \pi D^2}{4} \quad (3.1)$$

$$F_w = \tau_w \pi D L \quad (3.2)$$

$$\Delta p = \tau_w \frac{4L}{D} \quad (3.3)$$

A Equação (3.3) é considerada uma simplificação e pode levar a valores de pressão muito altos para restabelecer o escoamento, podendo tornar os projetos das tubulações muito caras. Esse modelo simplificado não leva em consideração outros efeitos associados, como a tixotropia do material e compressibilidade. Desta forma, Oliveira e Negrão (2015) citam que o problema pode ser estudado de duas maneiras, sendo uma possibilidade considerando a aplicação de uma pressão cuja magnitude supera a tensão limite de escoamento e a segunda possibilidade determinando a tensão máxima obtida com uma determinada vazão, de forma a considerar efeitos de compressibilidade do material. A segunda proposição é usualmente utilizada pelo fato que bombas são controladas através de suas vazões.

3.2.1 Compressibilidade do gel

Segundo Anderson (1990), a compressibilidade de um fluido é a variação da massa específica com a variação de pressão e pode ser relacionada com a propagação de pressão no fluido e pode ser escrita conforme a Equação (3.4).

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \left. \frac{d\rho}{dp} \right|_T = \frac{1}{\rho c^2} \quad (3.4)$$

Sendo α a compressibilidade do fluido, p a pressão aplicada, ρ a massa específica e c a velocidade de propagação da onda de pressão no fluido. Desta maneira, o tempo de propagação da onda de pressão ao longo do fluido gelificado dentro de um tubo, por exemplo, tem um papel importante a ser considerado na modelagem de problemas de reinício de escoamento (OLIVEIRA; NEGRÃO, 2015) e de tempo de limpeza de tubulações.

Em óleos parafínicos, mesmo o óleo podendo ser considerado como incompressível, ao formar uma estrutura gelificada bolhas de gases podem ser aprisionadas, formando uma estrutura heterogênea e compressível devido a heterogeneidades do material devido ao resfriamento não uniforme ao longo da tubulação (DAVIDSON et al., 2004).

3.2.2 Quebra de estrutura gelificada

Outro ponto importante no reinício de escoamentos de fluidos gelificados é como a estrutura gelificada é quebrada, ou seja, como ocorre a transição gel-líquido (ANDRADE et al., 2016). Como o material apresenta uma tensão limite de escoamento na qual deve ser superada, efeitos elásticos podem ter influência no processo (SOUZA MENDES; THOMPSON, 2013).

O mecanismo de quebra de gel, do ponto de vista microestrutural, pode ocorrer através de falha adesiva ou coesiva. Lee et al. (2008) relacionam a taxa de resfriamento com o formato dos cristais de parafina formados para resfriamento estático de óleos parafínicos, similarmente como ocorre quando há uma interrupção no escoamento através do oleoduto.

Para taxas de resfriamento rápidas; os cristais de parafina não têm tempo suficiente para se organizar e formam pequenos cristais, diminuindo a força de ligação da estrutura, porém aumento a área de contato com a parede. Por outro lado, se a taxa de resfriamento é baixa, as moléculas possuem tempo suficiente para interagir entre si e formar grandes cristais, aumentando a força de ligação da estrutura.

Desta forma, a falha coesiva ocorre quando a microestrutura tem baixa resistência devido a baixa força de interação entre os cristais, ocorrendo a desestruturação do material gelificado. Enquanto a falha adesiva ocorre quando a tensão aplicada supera a força de interação entre o gel e a parede do tubo (LEE et al., 2008). A Figura 3.5 mostra um teste realizado em reômetro considerando a magnitude da força adesiva e da força coesiva para diferentes taxas de resfriamento, sendo que é possível identificar uma taxa na qual há uma transição entre os efeitos.

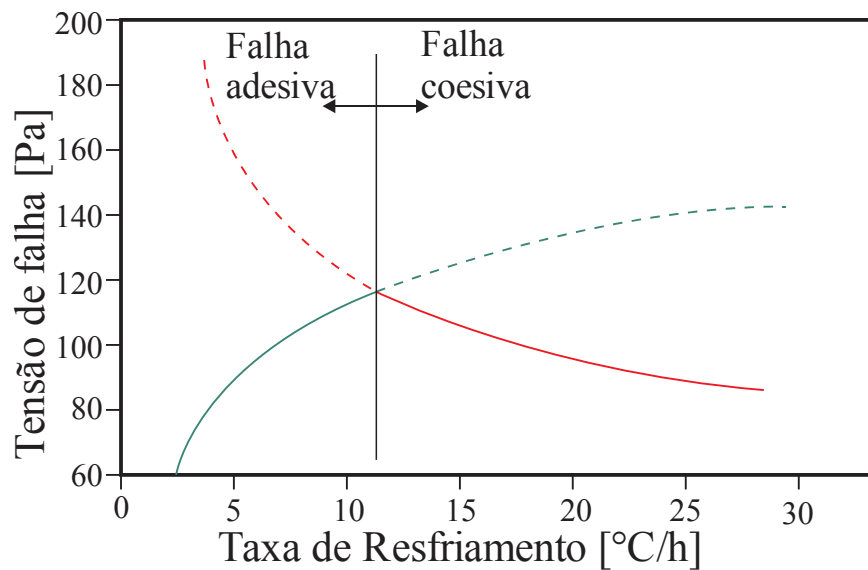


Figura 3.5 – Tensão de falha pela taxa de resfriamento para falha adesiva e coesiva.

Fonte: Adaptado de Lee et al. (2008).

Lee et al. (2008) em seu aparato experimental utilizam taxas próximas àquelas encontradas em situações reais, cujo valor da taxa de resfriamento é próximo à 3,5 °C/h. Desta forma, a falha investigada é predominantemente adesiva, de forma que a falha ocorre na região adjacente à parede da tubulação.

3.2.3 Deslizamento nas paredes

Um fenômeno que pode ser observado durante a reinicialização de escoamentos de fluidos gelificados em tubos é a presença de deslizamento na parede, devido os efeitos elásticos associados (BURGHELEA et al., 2014).

Esse efeito está acoplado a visualização de perfis de velocidade para escoamentos de fluidos viscoplásticos, como dispersões de Carbopol. Desta maneira, os perfis de velocidade para fluidos com tensão limite de escoamento apresentam uma velocidade não nula na parede, o que entra em desacordo com a condição de não deslizamento usualmente utilizado para fluidos puramente viscosos.

3.2.4 Deslocamento de fluidos

Uma forma de aplicação da pressão é através do deslocamento de fluidos, ou seja, um fluido diferente àquele gelificado é utilizado para aplicar a tensão necessária para promover o reinício do escoamento, formando um sistema multifásico (SOARES DUTRA; MENDES; NACCACHE, 2005). Desta forma, faz-se necessário saber como os fluidos interagem entre si, ou seja, se são imiscíveis ou não. Dependendo da forma como ocorre o contato entre fluidos podem-se distinguir dois efeitos: difusão em caso de miscibilidade ou de tensão superficial se forem imiscíveis.

No processo de perfuração esse processo é observado quando o fluido de perfuração deve ser substituído pelo material de revestimento, sendo este que dá o acabamento e sustentação ao poço ao final do processo de perfuração. A forma como ocorre a interação entre os fluidos deve ser considerado dentro do projeto de perfuração, pois a pressão aplicada para este procedimento não deve superar a janela operacional de pressão, evitando a fratura da estrutura rochosa do poço (OLIVEIRA, 2011).

Jakobsen et al. (1991) realizam um estudo de deslocamento de fluidos simulando a operação de cementação do poço em um aparato experimental em escala. Neste trabalho é relatada a influência de outros fatores para melhorar o deslocamento de fluidos dentro, sendo os parâmetros investigados a razão de viscosidade entre o fluido deslocado e que desloca, efeito do número de Reynolds e efeitos de empuxo devido a diferença de massa específica entre os fluidos.

Como consequência, Jakobsen et al. (1991) conseguem aferir que a eficiência de deslocamento de fluidos é melhorada com o aumento do número de Reynolds, devido ao aumento do atrito gerado, de maneira que esse efeito é predominante sobre os outros parâmetros quando o escoamento é turbulento. Para o caso laminar, deve-se observar com mais atenção os efeitos de empuxo e razão de viscosidade.

3.2.5 Estudos anteriores

Estudos relacionados ao reinício de escoamento e quebra de estrutura tem grande relevância na literatura. Fluidos que possuem uma tensão limite de escoamento são alvo de estudos, pois a sua compreensão leva a melhora de processos produtivos nos quais ocorrem a formação de um gel.

Perkins e Turner (1971) fazem um estudo sobre o comportamento reológico de um óleo parafínico extraído da baía de Prudhoe, EUA. Os autores introduzem a hipótese do equilíbrio de força imposto na interface e a força devido ao cisalhamento na parede, de forma a correlacionar a tensão limite de escoamento com a pressão aplicada para a quebra da estrutura gelificada. Também é realizado um estudo reológico sobre o comportamento do óleo extraído nessa região, considerando o alto teor de parafina na mistura. Por fim, efeitos de tixotropia são relacionados ao reinício do escoamento.

Nguyen e Boger (1985) fazem um estudo de reologia sobre uma lama proveniente da extração de alumínio da bauxita. Os autores investigam a tixotropia desse material, considerando os efeitos de histórico de cisalhamento e tempo de repouso, e como esses parâmetros influenciam na tensão limite de escoamento do material. Um modelo é proposto para descrever o comportamento tixotrópico a partir de um parâmetro estrutural que computa os efeitos dependentes do tempo, sendo comparado com os dados obtidos através de dados experimentais.

Ronningsen (1992) propõe o estudo da mensuração da tensão limite de escoamento através de experimentos em um reômetro e modelos experimentais de forma a simular casos reais. Uma comparação entre os valores de tensão limite de escoamento mensurado com o auxílio de um reômetro e de um aparato experimental a tubulação experimental é realizada e discutida. O autor cita as dificuldades de realizar experimentos em bancadas experimentais devido ao alto grau de complexidade do problema e as variáveis para serem controladas para que os resultados sejam confiáveis.

Lee et al. (2008) investigam a forma como ocorre a quebra do gel, de forma a relacionar a taxa de resfriamento com o tipo de falha. Um experimento é proposto, de forma a mensurar o pico de pressão para a quebra do gel e a consequente limpeza do tubo preenchido com o material gelificado. Efeitos de compressibilidade associado a propagação de pressão ao longo do material também são estudados.

El-Gendy et al. (2012) realizam um estudo do reinício de escoamento através de uma tubulação experimental com o uso da técnica de PIV de forma a investigar a validade da Equação (3.3). O aparato experimental também é configurado para mensurar a onda de propagação da pressão ao longo da tubulação de testes e como essa onda se comporta dentro da faixa de tempo de observação do experimento.

A mensuração de tensão limite de escoamento em bancadas experimentais não possui muitos estudos desenvolvidos pela quantidade de variáveis que devem ser controladas de forma a fornecer dados confiáveis. Para isso, modelos matemáticos são propostos de forma a tentar simular o reinício de escoamento, utilizando-se de dados fornecidos por caracterizações reológicas dos fluidos.

Coussot et al. (2002a) descrevem o efeito avalanche associado a fluidos tixotrópicos e que apresentam tensão limite de escoamento. Adicionalmente, os autores descrevem seu modelo matemático a partir de um parâmetro estrutural e um índice de potência. Esse modelo é uma forma simplificada de descrever o comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para três tipos de comportamento da viscosidade: pseudoplástico, viscoplástico e tixotrópico.

Davidson et al. (2004) apresentam um modelo numérico considerando que óleo parafínico pode ser modelado como um fluido de Bingham, porém considerando efeitos de compressibilidade devido a transitoriedade do escoamento e da propagação da onda de pressão. Desta forma, efeitos inerciais e cinemáticos são considerados na formulação das hipóteses da resolução do sistema.

Souza Mendes e Thompson (2013) introduzem um modelo considerando os efeitos elásticos associados ao mecanismo de quebra de gel. Assim o parâmetro estrutural varia de zero, que descreve o material completamente desestruturado, até infinito, indicando a presença de uma tensão limite de escoamento e efeitos análogos à elasticidade.

No CERNN há diversos estudos relacionados ao reinício de escoamento de fluidos estruturados. Os trabalhos representados se concentram em estudos de reologia e numéricos. A ausência de trabalhos experimentais é justificada pelo alto grau de complexidade que experimentos envolvendo fluidos não newtonianos exigem.

Entre os trabalhos numéricos pode-se citar o modelo proposto por Oliveira e Negrão (2015), no qual é desenvolvido um estudo para o reinício de escoamento de óleos parafínicos, considerando o modelo proposto por Souza Mendes e Thompson (2013) para a quebra do

material gelificado. Dessa forma, determina-se a pressão de entrada requerida para a quebra do gel e a tensão máxima obtida através da aplicação de uma vazão. Também são considerados efeitos de compressibilidade do material.

Andrade et al. (2016) realizam um estudo de pico de pressão de um fluido de perfuração à base de óleo, de forma a investigar a transição gel-líquido. Também se propõe um modelo algébrico, com parâmetros determinados por experimentos de reologia, de forma a computar os efeitos de elasticidade associados aos viscoplásticos.

A Tabela 3-2 apresenta um resumo dos trabalhos descritos, relacionando à natureza do experimento (experimental, numérico ou reológico). É possível notar que a maioria dos autores valida seus modelos através de estudos reológicos.

3.3 VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO

Com a melhoria dos equipamentos de captura de imagem ao longo dos anos possibilitou que escoamentos fossem mais bem compreendidos. Campos escalares e vetoriais instantâneos são mais bem compreendidos e estudados (ADRIAN, 1991). Esse tipo de experimento possui a vantagem de ser pouco intrusivo, ou seja, pouco afeta nas propriedades dos escoamentos (PALACIOS S., 2011).

Diversas técnicas podem ser utilizadas para medir campos associados a escoamentos de fluidos e em diferentes casos, como ressonância magnética, monitoramento de posicionamento de partículas com o auxílio de laser, velocimetria por imagem de partículas (PIV), entre outros (ADRIAN, 1991).

Técnicas que utilizam partículas para realizar medições de campos escalares e vetoriais, como o PIV, também necessita de um laser como fonte de luz. Assim, é possível avaliar as propriedades de escoamentos em um determinado plano no qual há interesse.

Cabe ressaltar que as imagens obtidas devem passar por um pós-processamento, de forma que a imagem tenha qualidade suficiente para captar apenas os movimentos das partículas traçadoras (PALACIOS S., 2011).

3.4 INCERTEZA EXPERIMENTAL

Considerando os ajustes realizados, é possível inferir o erro experimental da bancada, considerando as variáveis necessárias para o cálculo da tensão na parede devido um gradiente de pressão, conforme a Equação (3.3). Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2010) a incerteza experimental é calculada conforme a Equação (3.5).

$$u_{R_i} = \frac{x_i}{R} \frac{\partial R}{\partial x_i} u_{x_i} \quad (3.5)$$

Sendo que u_{R_i} é a incerteza associada a uma grandeza de uma função $R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ e x_i a variável associada à função descrita por R e u_{x_i} a incerteza do instrumento de medição, com i variando de 1 até n , sendo n o número de grandezas a serem avaliadas. Porém, essa equação descreve apenas a incerteza de uma variável mensurada, sendo que a soma das incertezas u_R é dada pela Equação (3.6).

$$u_R = \pm [u_{R_1}^2 + u_{R_2}^2 + \dots + u_{R_n}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Para o cálculo da incerteza experimental é necessário rearranjar a Equação (3.3), considerando que Δp é descrito pela Equação (2.12), ou seja, aplica-se apenas uma pressão hidrostática resultante da altura relativa de fluido dentro do tubo, resultando na Equação (3.7).

$$\tau_w = \frac{1}{4}(\rho gh \frac{D}{L}) = \frac{1}{4}(\frac{m}{V} ghD \frac{1}{L}) \quad (3.7)$$

Dessa forma, considerando que as variáveis utilizadas para o cálculo da tensão de cisalhamento na parede do tubo são todas de primeira ordem, o termo que multiplica é reduzido a 1, conforme mostrado na Tabela 3-1, resultando em $u_{R_i} = u_{x_i}$. Assim, rearranjando-se a Equação, tem-se a Equação (3.8).

$$u_R = \pm [u_{x_1}^2 + u_{x_2}^2 + \dots + u_{x_n}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

A Tabela 3-1 apresenta as incertezas experimentais associadas a cada componente da Equação (3.7), considerando cada tipo de instrumento de medição associado à grandeza a ser determinada e que a aceleração da gravidade possui valor tabelado, sem valor de incerteza associada significativa.

Tabela 3-1 – Lista de derivadas parciais da função $R = \tau_w$ em relação às variáveis mensuradas.

i	x_i	$\frac{\partial R}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_w}{\partial x_i}$	$\frac{x_i}{R} \frac{\partial \tau_w}{\partial x_i}$
1	m	$\frac{1}{4} \frac{ghD}{VL}$	1
2	V	$-\frac{1}{4} \frac{mghD}{V^2 L}$	1
3	h	$\frac{1}{4} \frac{mgD}{VL}$	1
4	D	$\frac{1}{4} \frac{mgh}{VL}$	1
5	L	$-\frac{1}{4} \frac{mghD}{VL^2}$	1

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos associados ao reinício do escoamento de fluidos gelificados. Conceitos como a tixotropia e a tensão limite de escoamento são fundamentais para que o fenômeno seja mais bem compreendido.

Além disso, outras considerações são levantadas para possibilitar uma abordagem mais efetiva do problema, como a compressibilidade do fluido e o efeito de deslizamento na parede do tubo, devido ao comportamento majoritariamente elástico que um gel pode apresentar.

Também é abordada a visualização de escoamentos, técnica que é necessária para avaliar experimentalmente a interação das interfaces entre o fluido gelificado e o fluido limpo usado para o reinício do escoamento.

Tabela 3-2 – Evolução histórica de trabalhos sobre reinício de escoamento conforme o tipo de abordagem.

Autor (ano)	Resumo	Tipo de trabalho
Perkins e Turner (1971)	Estudo da tensão necessária para o reinício de escoamento de um óleo parafínico. Relaciona a tensão limite de escoamento com a pressão aplicada	Reológico
Nguyen e Boger (1985)	Estudo reológico do comportamento da tensão limite de escoamento de uma lama proveniente do processo de extração de alumínio de minério de bauxita, considerando diferentes tempos de agitação da amostra e tempo de repouso.	Reológico
Ronningsen (1992)	Medição da tensão limite de escoamento em uma seção de testes e em reômetro.	Reologia e experimental
Coussot et al. (2002a)	Realiza um experimento para demonstrar o efeito avalanche. Propõe um modelo para descrever o comportamento de fluidos pseudoplásticos, viscoplásticos e tixotrópicos, a partir de um parâmetro estrutural.	Experimental e numérico
Davidson et al. (2004)	Utiliza um modelo tixotrópico considerando o fluido como um plástico de Bingham.	Numérico
Lee et al. (2008)	Discute sobre o tipo de falha que ocorre para que ocorra o reinício do escoamento.	Numérico, experimental e reológico.
El-gendy et al. (2012)	Verifica o comportamento da onda de pressão dentro de um intervalo de tempo. Mensura perfis de velocidade com o auxílio da técnica de PIV.	Experimental e reológico
Souza Mendes e Thompson (2013)	Propõe um modelo matemático para descrever o efeito de pico de pressão considerando efeitos elásticos associados aos efeitos viscoplásticos.	Reológico e numérico
Oliveira e Negrão (2015),	Realiza um estudo numérico do reinício de escoamento a partir do modelo proposto por Souza Mendes e Thompson, considerando efeitos de compressibilidade do fluido	Numérico
Andrade et al. (2016)	Mensura os picos de pressão a diferentes taxas de cisalhamento, em um reômetro, necessários para reiniciar o escoamento em um fluido de perfuração a base de óleo.	Reologia

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a proposta de estrutura para a bancada experimental e o procedimento para a realização do experimento. A descrição dos materiais utilizados serve de base para que modificações possam ser sugeridas, considerando os fenômenos nos quais há interesse de visualização efetiva.

O protocolo de testes é importante pelo fato de se reproduzir da mesma forma o experimento proposto por este trabalho, independente da pessoa que manipula a bancada experimental. A seguir são detalhados o protocolo de experimento e a proposta de bancada experimental.

4.1 PROPOSTA DE BANCADA EXPERIMENTAL

Para que seja possível visualizar o deslocamento da interface de um material gelificado dentro de tubo circular, propõe-se uma bancada experimental que é apresentada mais detalhadamente a seguir.

Primeiramente, é apresentada a concepção dos elementos hidráulicos que compõem o experimento. Nesta etapa são definidos os materiais das tubulações utilizados, diâmetros internos e externos e os acessórios necessários. Especificar estes elementos é importante para que seja possível visualizar os fenômenos associados ao reinício de escoamento de fluidos gelificados, conforme o abordado no Capítulo 3.

Também é proposta uma estrutura metálica para o suporte da linha de teste e uma mesa óptica, que também serve de suporte para a fonte de luz. A estrutura metálica também é projetada para que uma câmera possa ser acoplada para a aquisição de imagens do experimento.

4.1.1 Bancada experimental

O circuito proposto para realizar a tarefa é mostrado na Figura 4.1, que apresenta a disposição dos elementos principais da bancada. O ponto 1 representa a saída do reservatório, o ponto 2 é a região do início da seção de visualização da interface do material gelificado e o ponto 3 é a saída da tubulação.

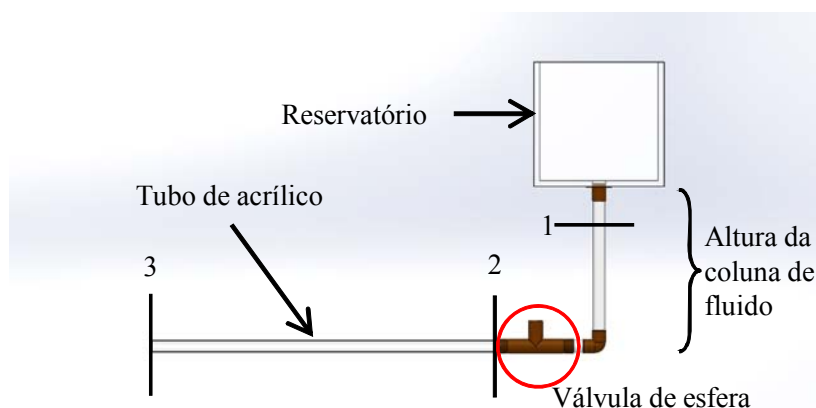


Figura 4.1 – Circuito da bancada de testes.

Na seção entre os pontos 1 e 2 são utilizados tubos e conexões comerciais de PVC. Esta seção serve para conectar o reservatório com o tubo de acrílico e configurar a altura da coluna de fluido de óleo.

4.1.2 Dimensões dos elementos utilizados na bancada experimental

De forma a padronizar o projeto, define-se o diâmetro externo do tubo de acrílico em 20 mm e espessura da parede de 1 mm. Considerando as bitolas de tubulações comerciais de PVC, as dimensões do tubo transparente servem de referência para todos os acessórios necessários para a construção do circuito hidráulico. O comprimento do tubo de acrílico é definido em 600 mm, conforme a relação para reinício de escoamento, como visto na Equação (3.4).

O reservatório sugerido para a bancada é uma montagem de placas de acrílico, com volume interno calculado de 12 L, sendo as dimensões internas: comprimento (l) de 300 mm, largura (w) de 200 mm e altura (h) de 200 mm. A espessura das placas é de 10 mm cada. O desenho representativo da montagem é apresentado na Figura 4.2. Dessa forma é possível considerar a pressão hidrostática constante, considerando que o volume interno do tubo de acrílico inteiramente preenchido causa uma variação de apenas 2 mm na altura do reservatório.

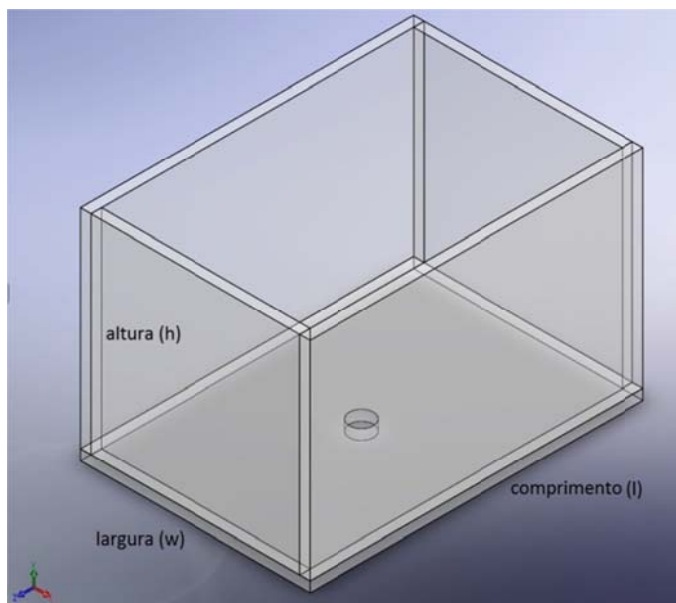


Figura 4.2 – Reservatório de líquido para quebra do gel.

A saída do reservatório é feita por um adaptador com anel para caixa d'água, feito de PVC. O elemento é utilizado para a saída de caixas d'água e é encontrado em catálogos comerciais de fabricantes de tubos e conexões. O adaptador possui uma borracha para vedação. Além disso, pode-se comprar a junta roscável, facilitando a troca de tubulação em caso de manutenção ou modificações de projeto, como altura relativa do reservatório.

4.1.3 Estrutura para suporte da bancada

Os elementos básicos que compõe a estrutura para a acomodação do sistema de testes são perfis extrudados de alumínio. Os perfis apresentam boa resistência mecânica e baixa massa, devido ao elevado momento de inércia da seção transversal do perfil. Além disso, a montagem do suporte é simples, assim como a fixação de outros acessórios como pés niveladores e elementos de fixação.

A Figura 4.3 apresenta a proposta de montagem realizada em CAD, sendo posicionados de forma genérica os elementos do circuito hidráulico. O suporte para a fixação da câmera é posicionado no plano formado pelo perfil posicionado logo acima da mesa óptica, conforme indicado na imagem.

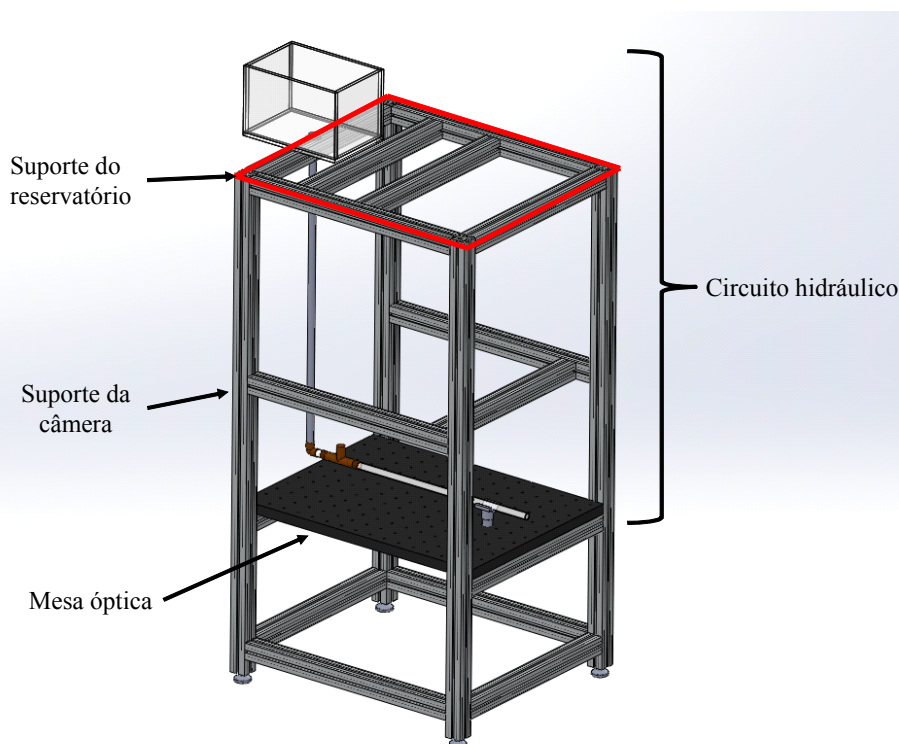


Figura 4.3 – Vista isométrica da proposta da estrutura para suporte da bancada.

Por fim, no último nível situa-se o reservatório do fluido utilizado para a quebra do gel e posicionado a 1500 mm de altura, sendo a disposição dos perfis vista na Figura 4.4. Nela está representada uma base de um reservatório para demonstrar como ficaria o posicionamento. Como não há previsão de problemas com vibrações devido ao escoamento de fluido dentro da tubulação durante o teste, o reservatório está apenas apoiado nas peças transversais sem fixação específica.

Conforme visto na Figura 4.4, o perfil número 3, que não possui contato com a representação do reservatório, serve como um possível apoio, caso seja necessário transladar o reservatório. Há a possibilidade de deslocar os elementos 2 e 3 se for necessário ajustar o comprimento da tubulação de acrílico da Linha Horizontal.

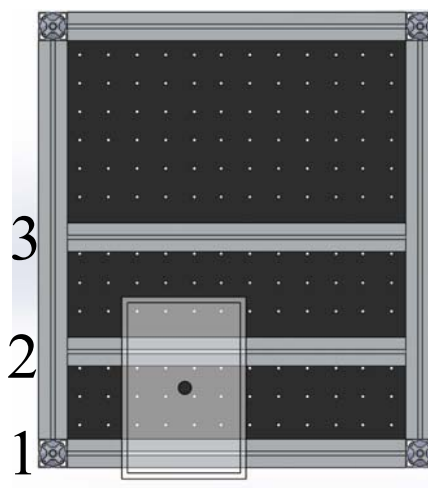


Figura 4.4 – Vista superior com a disposição dos elementos transversais para suporte da bancada.

As principais dimensões da estrutura são apresentadas na Figura 4.5, sendo a unidade das cotas em milímetros. No desenho não são detalhados os posicionamentos das barras de suporte da câmara, nem do reservatório, pois suas posições podem variar conforme a necessidade do projeto. As alturas dos elementos podem variar conforme necessidade do projeto e da grade de testes.

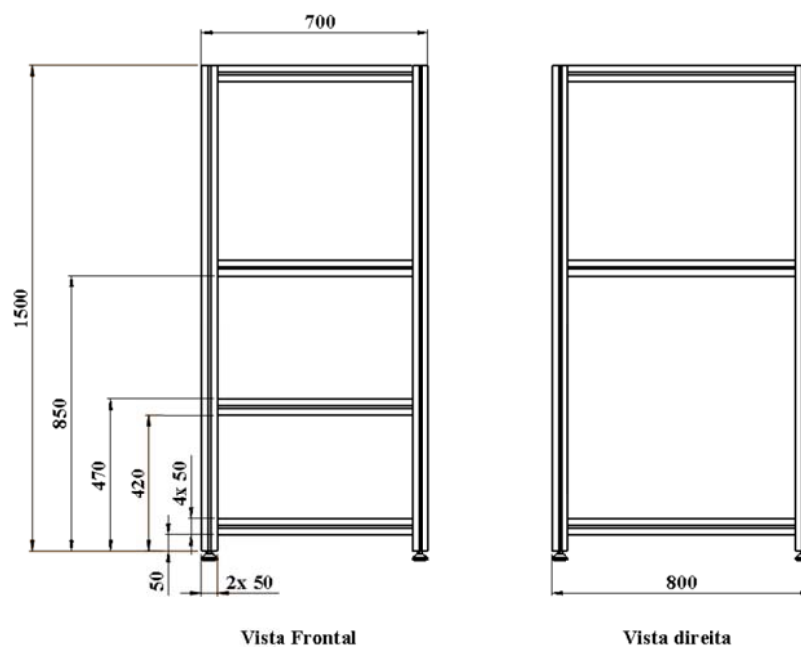


Figura 4.5 – Principais dimensões da estrutura da proposta de estrutura de suporte da bancada.

4.2 PROTOCOLO DE EXPERIMENTO

O procedimento para a visualização do deslocamento da interface entre o fluido gelificado e o óleo hidráulico é descrito nesta seção. Este protocolo é elaborado de forma a descrever duas etapas, sendo a preparação de teste e a visualização da quebra da interface. A seguir, é explicado o que é realizado em cada etapa de forma detalhada. O procedimento adotado é um guia para que experimentos futuros sejam realizados e aprimorados.

4.2.1 Preparação de teste

A preparação de teste é a etapa anterior à realização do experimento de visualização do deslocamento da interface do fluido gelificado dentro do tubo transparente e serve para garantir que as condições iniciais sejam próximas entre diferentes experimentos. Os seguintes parâmetros devem ser realizados para este procedimento:

- Verificar se os registros componentes do sistema estão fechados;
- Regular a altura de fluido limpo no reservatório;
- Limpeza do tubo transparente.

Realizado essa etapa preliminar, procede-se ao preenchimento do tubo e realização do experimento.

4.2.2 Preparação de fluido gelificado dentro do tubo transparente

A etapa de preparação do fluido gelificado deve ser cuidadosamente realizada para que haja condições parecidas entre diferentes testes realizados. Para isso, desenvolve-se a seguinte rotina:

- Desacoplar o tubo de acrílico do circuito hidráulico;
- Preenchimento com material gelificado;
- Formação da interface;
- Acoplamento do tubo ao circuito hidráulico.

O preenchimento ocorre pelo orifício de saída do tubo transparente com o auxílio de um bico injetor que acompanha a embalagem do material. Preenche-se até a marca do comprimento desejado e com o auxílio de um bastão com ponta plana a interface é modelada, conforme o desenho representativo mostrado na Figura 4.6.

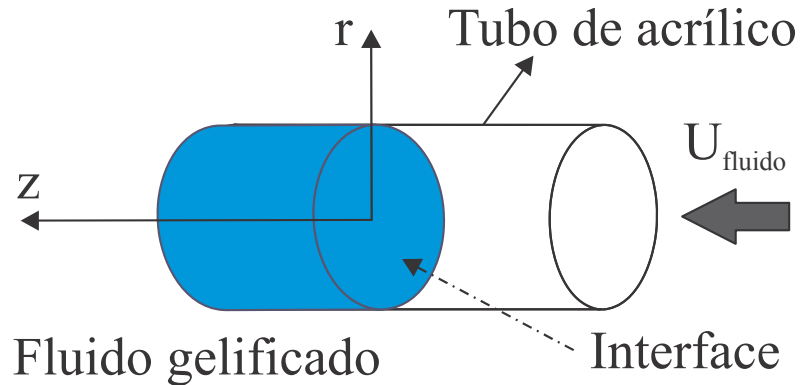


Figura 4.6 – Esquema da interface do fluido gelificado.

4.2.3 Visualização do reinício do escoamento

Com a etapa de preparação de teste terminada, prossegue-se à visualização do reinício do escoamento. Esse passo é o mais importante e o que concentra a retirada de dados, como a pressão de quebra de fluido, para posterior análise.

Pode-se dividir a visualização em dois processos, sendo a aplicação de pressão no sistema para que o fluido limpo empurre o fluido gelificado e a captura de imagens.

A aplicação da tensão de cisalhamento na parede designada para o teste no sistema ocorre unicamente pela imposição da pressão hidrostática da coluna de fluido devido a diferença de altura entre o tubo transparente e o nível de óleo hidráulico no reservatório.

Para a visualização do escoamento é utilizada uma câmera comercial capaz de captar vídeos de qualidade 1080p a uma taxa de 30 Hz. A câmera é posicionada acima do tubo transparente e as imagens geradas são transferidas para um computador. No computador são realizados os procedimentos de pós-processamento de imagens e a medição da velocidade média de deslocamento da interface. Assim que as imagens são obtidas, fecha-se a válvula de controle de escoamento para o tubo transparente e se procede a limpeza do sistema para a preparação de outros testes.

4.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi definida a bancada experimental, detalhando cada parte que a compõe a seção de teste e a estrutura em perfil de alumínio que serve de suporte dos elementos da linha de teste.

Também foi definido o protocolo de testes que foi elaborado com o intuito de que o experimento seja realizado da mesma forma diversas vezes. Neste protocolo está descrito os procedimentos de preparação do experimento e de realização da visualização da quebra da interface.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, conforme a metodologia proposta. Primeiramente, é mostrada a montagem da bancada e a sua incerteza experimental associada à medição da tensão de cisalhamento na parede. Em seguida, são apresentadas as imagens capturadas nos ensaios realizados a diferentes pressões hidrostáticas aplicadas.

5.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental proposta no Capítulo 4 é apresentada a seguir na Figura 5.1. Na imagem é mostrada a estrutura metálica que serve de suporte para o sistema hidráulico de testes, o reservatório, e a mesa óptica.



Figura 5.1 – Vista frontal da bancada montada.

5.1.1 Faixa de pressão

Considerando o projeto da bancada, pode-se adaptar a altura da mesa na qual é feito o encaixe dos elementos da linha horizontal. Para isso determina-se a faixa de altura na qual é possível realizar o experimento, desconsiderando a altura de fluido dentro do reservatório. Assim, pode-se montar a bancada com altura mínima de 60 mm mais a altura do reservatório até 1425 mm mais a altura do reservatório.

Levando-se em conta a massa específica do óleo caracterizado no Apêndice A e a pressão gerada por uma coluna de fluido, descrita pela Equação (2.12), a faixa de pressões possíveis para a aplicação no reinício do escoamento situa-se entre 466 e 11085 Pa.

5.1.2 Cálculo da incerteza experimental

Para utilizar de forma adequada a Equação (3.8) é necessário que u_{x_i} seja expresso em forma de porcentagem em relação ao valor mensurado. Para isso, a Tabela 5-2 apresenta as condições nas quais são realizadas as medições das grandezas consideradas para o cálculo.

Tabela 5-1 – Relação de Incertezas de medição da bancada.

Grandeza	Instrumento de medição	Incerteza
Massa	Balança de precisão	0,05 g
Volume	Proveta	0,5 ml
h	Escala graduada	0,5 mm
D	Paquímetro	0,025 mm
L	Escala graduada	0,5 mm

É possível aferir que quanto maior a altura relativa do reservatório, menor é o erro, considerando o uso do mesmo instrumento de medição. Maiores medidas tendem a gerar menores dispersões de erro, sendo este fato relacionado à escala do instrumento utilizado. Por isso é necessário se ter escalas de medição adequadas à medida avaliada.

Tabela 5-2 – Valor percentual das incertezas para cada grandeza

Grandeza	Valor considerado	Incerteza [%]
Massa	8 g	0,63
Volume	10 ml	5,00
h	15,5 cm	0,32
D	20 mm	0,13
L	50 cm	0,10

Dessa forma a incerteza calculada para a mensuração da tensão de cisalhamento na parede é de $\pm 5,1\%$, considerando apenas as incertezas de cada instrumento utilizado nesta bancada. É possível aferir que o gargalo do sistema de medição é a proveta para a medição do volume de óleo, para a verificação da massa específica.

Considerando os controles realizados de forma manual, a incerteza de medição apresenta um valor razoável. Se considerar uma tensão aplicada na parede de 25 Pa, a faixa de valores se encontra dentro de 23,75 e 26,25 Pa, valores que não são tão distantes de ambos.

5.1.3 Aplicação de pressão para quebra de interface

Para realizar os testes de visualização do deslocamento da interface do fluido gelificado é proposto que o fenômeno seja filmado por 10 min, para que após a aquisição das imagens seja possível verificar a velocidade na qual o material é deslocado, se este for movimentado ao longo do tempo. A câmera utilizada para captação de imagens é o equipamento acoplado no celular Motorola Moto X – Segunda geração, com capacidade para filmagem em *FullHD* a taxa de 30 Hz. O tratamento de imagens e mapeamento da posição da interface é realizado com o auxílio do software ImageJ.

O material gelificado que é depositado dentro do tubo transparente é uma solução comercial de Carbopol[®] comumente utilizada como gel para exames de ultrassom. O uso desse material como fluido de testes justifica-se pela classificação de fluido com tensão limite de escoamento não tixotrópico (MOLLER et al., 2009). Por isso, não são considerados os históricos térmico e de cisalhamento.

O fluido que é utilizado para deslocar o sistema é um óleo hidráulico de baixa viscosidade e imiscível com o material gelificado. As propriedades e caracterização dos fluidos de testes estão descritas no Apêndice A, sendo que para o material gelificado é apresentada a tensão limite de escoamento e para o óleo a viscosidade newtoniana em diferentes faixas de temperatura.

Do Apêndice A, obtém-se que a tensão limite de escoamento do Carbopol utilizado para os testes é de $24,8 \pm 1,24$ Pa a 25°C . Posto isso, então se realiza a visualização da interface considerando três condições distintas, ou seja, $\tau_w < \tau_0$, $\tau_w \approx \tau_0$ e $\tau_w > \tau_0$.

O controle da pressão aplicada é feito unicamente pelo cálculo da pressão hidrostática da coluna de fluido, considerando a altura relativa ao centro da tubulação da linha horizontal e da altura do nível observado no reservatório, medido com o auxílio de uma escala graduada.

A Tabela 5-3 apresenta as condições nas quais são realizados os ensaios experimentais, sendo mostrada a altura presente no reservatório, além da altura total da coluna de fluido e em qual condição está enquadrado o teste conforme a tensão de cisalhamento na parede aplicado pela pressão hidrostática da coluna de fluido.

Os testes foram realizados a temperatura ambiente, entretanto os ensaios foram realizados em dias diferentes e sob condições ambientais de temperatura distintas. Por isso,

verifica-se a temperatura do fluido contido no reservatório com um termômetro digital da marca Incoterm[®], com resolução de 1°C. As temperaturas para cada condição são apresentadas na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Pressões aplicadas nos testes

Condição	Altura reservatório [cm]	Altura da tubulação [cm]	Pressão hidrostática [Pa]	Relação de tensões	Temperatura [°C]
1	5	10,5	12,86 ±0,66	$\tau_w < \tau_0$	20
2	10	10,5	17,01±0,87	$\tau_w < \tau_0$	20
3	15	10,5	21,16±1,08	$\tau_w \approx \tau_0$	21
4	19	10,5	24,48±1,25	$\tau_w \approx \tau_0$	18
5	3,5	92	79,26±4,04	$\tau_w > \tau_0$	21

Para as Condições 1 e 2, durante o tempo de visualização não há movimentação perceptível da interface. A Figura 5.2 mostra o instante inicial, (a), e o instante t=600 s, (b), com a configuração da Condição 1, enquanto a Figura 5.3 apresenta o resultado para a Condição 2.

Ressalta-se que um filtro de imagem foi aplicado com o intuito de eliminar um problema ocorrido com o fundo da imagem. Nos primeiros testes não foram utilizados anteparos adequados ao fundo da captação do vídeo, com a presença de uma mancha com cor distinta à mesa optica. Porém ainda é possível facilmente identificar a interface entre fluidos, pois o óleo forma um menisco, devido a presença de uma bolha de ar na região, caracterizado por um reflexo que contorna a interface de contato entre os fluidos.

O resultado do teste conforme a Condição 3 é mostrado na Figura 5.5. Nesta figura são mostrados seis intervalos de tempo diferentes começando com t=0 s, até t= 600 s. Após o instante t= 360 s, o material gelificado não é mais visualizado na imagem.

Assim, é possível detectar a posição da interface a cada instante de tempo desejado. Para realizar essa tarefa, utiliza-se o software de tratamento de imagens ImageJ, sendo possível colocar pontos na região de fronteira da interface entre o material gelificado e o óleo. A escala é indicada conforme o diâmetro do tubo, que é conhecida e tem valor de 20 mm. Assim é possível mensurar a velocidade média de deslocamento do sistema, como é apresentado na Figura 5.4. A velocidade média do sistema é de 0,133 mm/s.

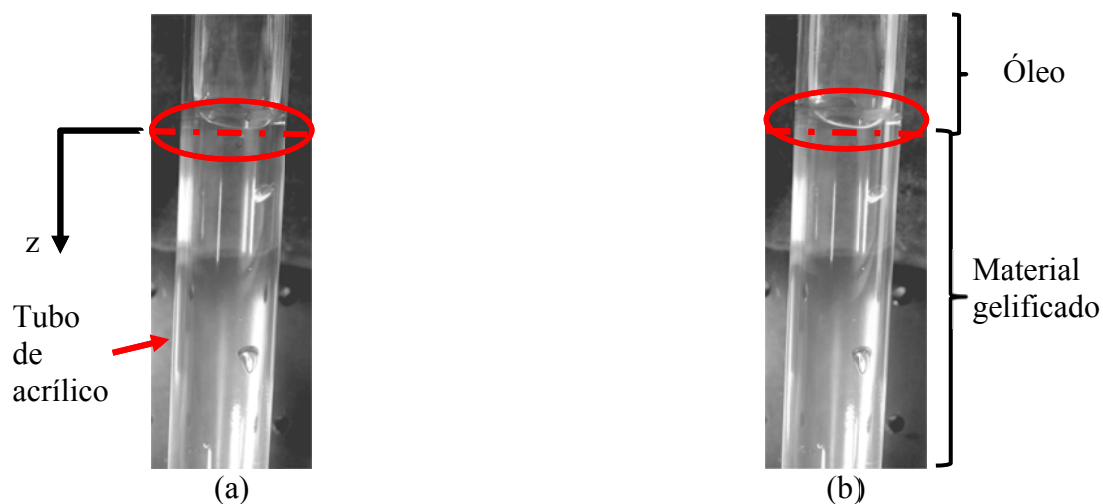


Figura 5.2 – Imagens do teste na Condição 1. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 600$ s.

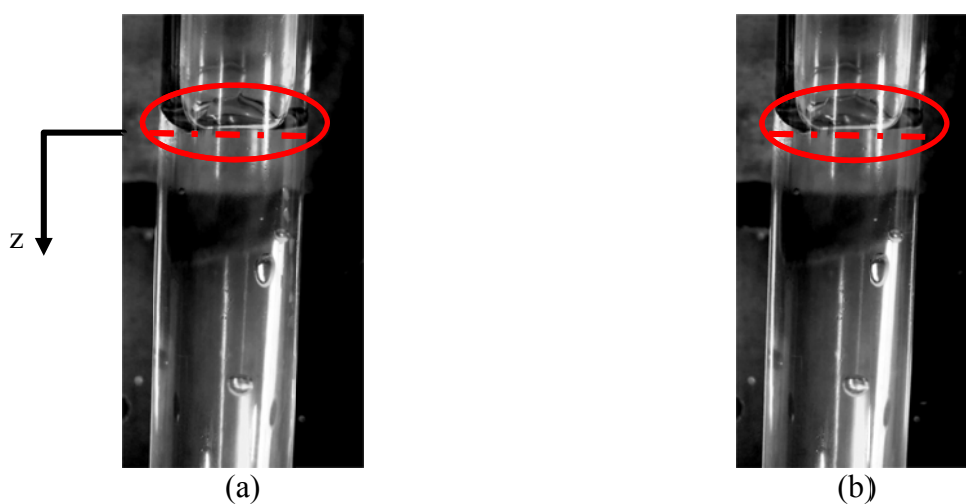


Figura 5.3 – Imagens do teste na Condição 2. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 600$ s.

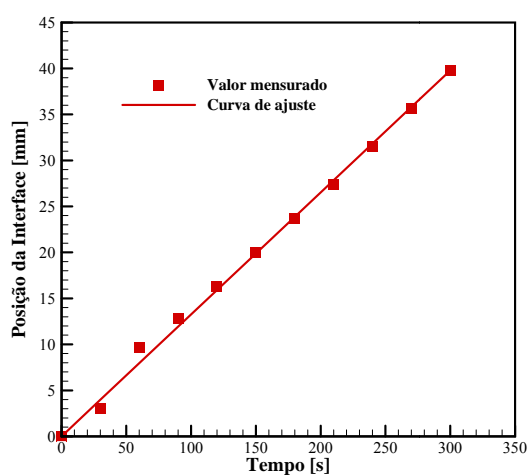


Figura 5.4 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 3.

Os resultados obtidos nos testes conforme a Condição 4 são mostrados na Figura 5.7. De maneira similar à condição 3, apresenta-se seis instantes de tempo do experimento entre os tempos $t=0$ s e $t=600$ s. Também é realizado o mapeamento da posição da interface do gel ao longo do tempo com o objetivo de se obter a velocidade média para a Condição 4, sendo este resultado apresentado na Figura 5.6. A velocidade média obtida é de $0,133$ mm/s.

Nota-se que a velocidade média para as Condições 3 e 4 possuem mesmo valor. Este fato pode estar associado à diferença de temperatura cujos testes são realizados, o que pode impactar nas propriedades reológicas do material. Outro fato a ser notado é o valor da tensão obtida pela Equação (3.3) ser maior que a tensão mensurada para se obter um movimento do fluido gelificado. Esse fato pode estar associado a não homogeneidade do material, devido a presença de bolhas de ar, como visto nas Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.5, sendo necessária uma investigação mais aprofundada da compressibilidade do material e seus efeitos sobre a dinâmica do deslocamento de fluidos.

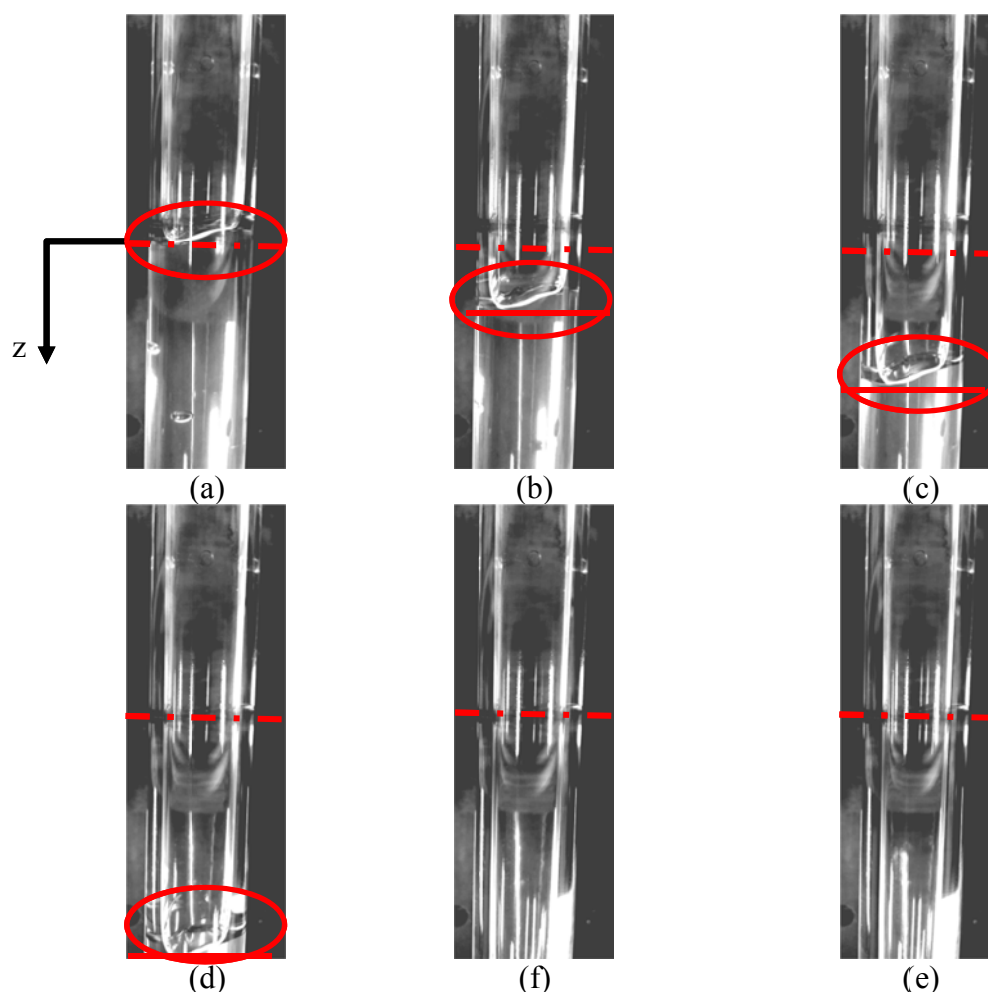


Figura 5.5 – Imagens do teste na Condição 3, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 120$ s. (c) $t = 240$ s. (d) $t = 360$ s. (e) $t = 480$ s. (f) $t = 600$ s.

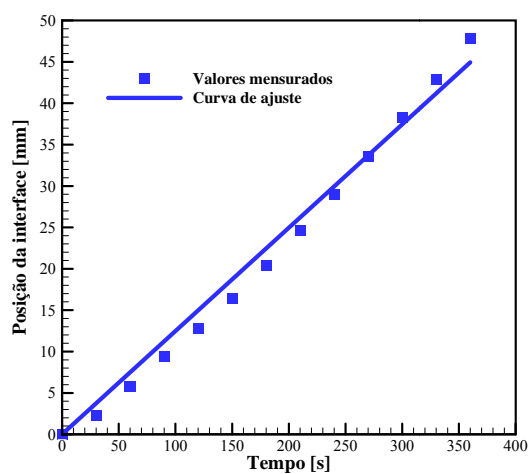


Figura 5.6 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 4.

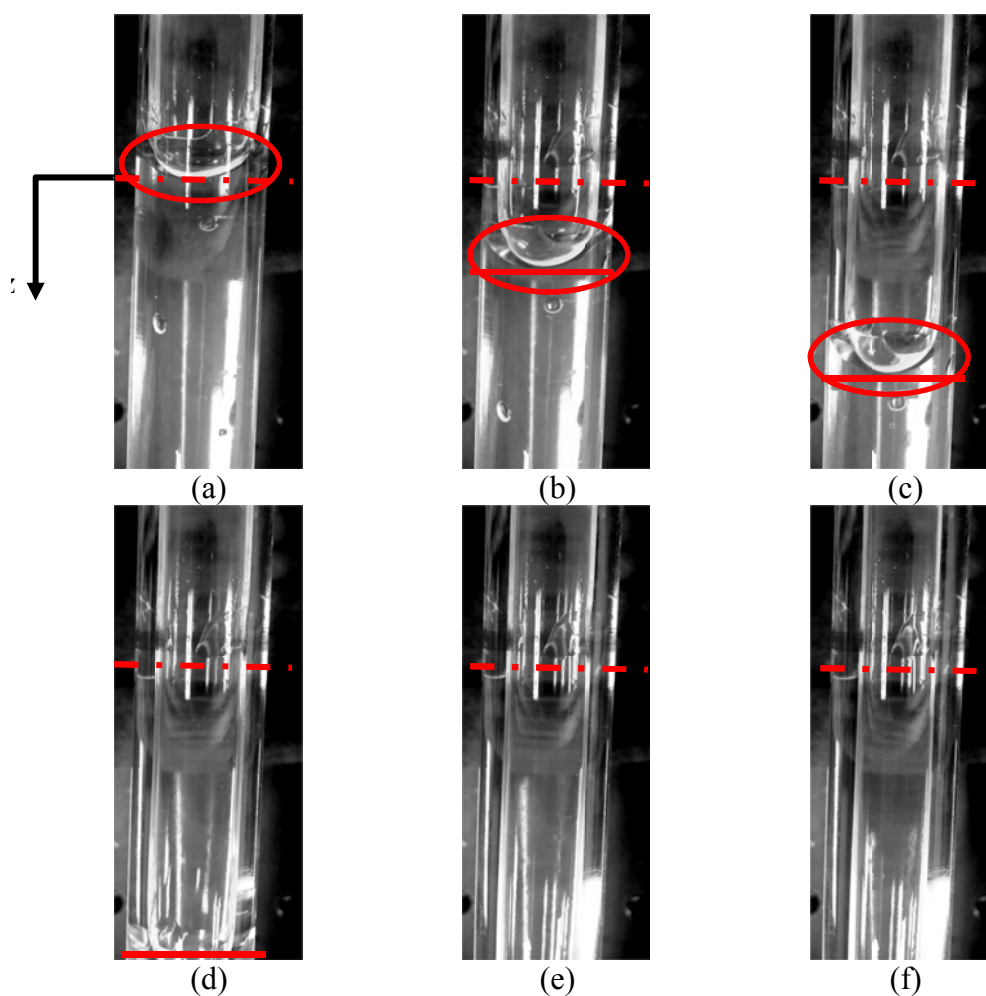


Figura 5.7 – Imagens do teste na Condição 4, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) $t = 0s$. (b) $t = 120s$. (c) $t = 240s$. (d) $t = 360s$. (e) $t = 480s$. (f) $t = 600s$.

Além disso, considerando que a tensão aplicada é menor que a tensão limite de escoamento do material, a consideração de como o material está se deslocando dentro do tubo é necessária. Entretanto, não é possível afirmar se o gel está sendo empurrado como um sólido, conseqüentemente deslizando ao longo das paredes do tubo, ou se está escoando, com a formação de uma fina lâmina de Carbopol entre a parede e o núcleo que apresenta comportamento viscoso, como visualizado na investigação realizada por Burghlea et al. (2014), o qual utiliza partículas traçadoras para mapear o movimento do fluido gelificado.

Por fim, os resultados da Condição 5 são apresentados. Para esta configuração é importante ressaltar que o experimento ocorre de forma muito mais rápida em comparação que as Condições 3 e 4, sendo que em menos de um minuto o óleo substitui completamente o material gelificado na tubulação transparente, necessitando interromper o experimento. As imagens do teste da Condição 5 são mostradas na Figura 5.8, em um intervalo de $t=0$ s até $t=52$ s. O gráfico da posição em função do tempo é apresentado na Figura 5.9, obtendo-se uma velocidade média do deslocamento do material de 3,27 mm/s.

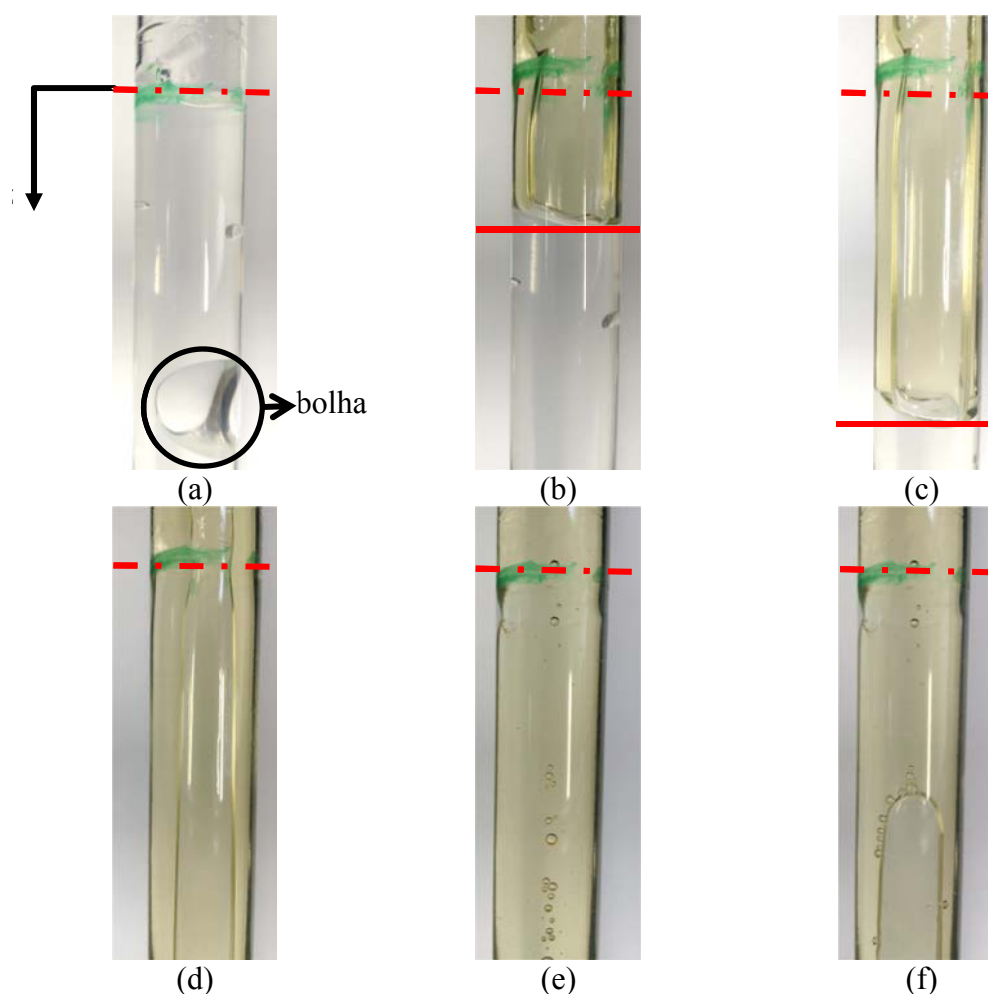


Figura 5.8 – Imagens do teste na Condição 5, com deslocamento no sentido do eixo z. (a) $t = 0$ s. (b) $t = 9$ s. (c) $t = 18$ s. (d) $t = 27$ s. (e) $t = 36$ s. (f) $t = 52$ s.

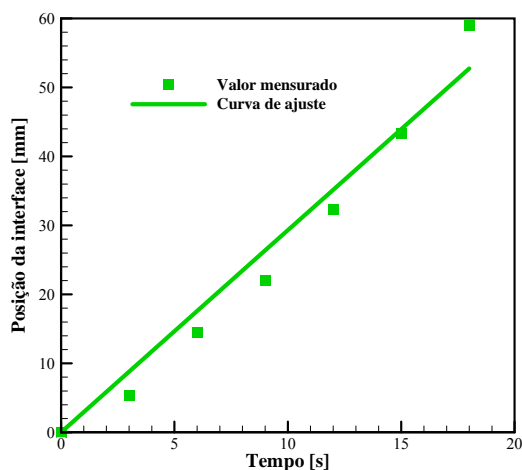


Figura 5.9 – Posição pelo tempo mensurado conforme teste na Condição 5.

Nos testes da Condição 5 foi resolvido o problema do fundo da imagem com o posicionamento de um anteparo branco. É possível notar pela Figura 5.9 que a qualidade da imagem colorida é boa. Dessa forma é possível visualizar melhor a interface, devido o contraste de cor entre o gel e o óleo.

Também é interessante destacar que a velocidade de deslocamento do gel é superior na Condição 5 se comparado às Condições 3 e 4. Isso é esperado, pelo fato de que a tensão gerada na parede é superior na Condição 5 em comparação às outras condições de teste. Essa constatação ainda não é suficiente para afirmar se o material está escoando ou deslizando.

Assim, considerando os resultados obtidos em todos os testes, a Tabela 5-4 apresenta os dados mensurados, relacionando a pressão aplicada com a presença ou não de deslocamento do material gelificado e a velocidade calculada a partir do rastreamento da posição da interface ao longo do tempo.

Tabela 5-4 – Relação dos dados obtidos nos testes para cada Condição proposta.

Condição	Pressão [Pa]	Desloca-se?	Velocidade [mm/s]
1	12,86 ±0,66	Não	-
2	17,01±0,87	Não	-
3	21,16±1,08	Sim	0,133
4	24,48±1,25	Sim	0,133
5	79,26±4,04	Sim	3,27

5.2 CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos decorrente do projeto proposto por este trabalho. Primeiramente, foi mostrada a montagem da bancada juntamente com o cálculo da incerteza experimental associado à medição da tensão de cisalhamento na parede.

Em seguida foram abordadas as faixas de trabalho possível para a configuração atual do projeto da bancada, seguido de uma análise de fenômenos que ocorrem quando se aplica a pressão no sistema. Os resultados foram basicamente a obtenção de imagens dos instantes de tempo e a mensuração do deslocamento do material dentro do tubo.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Tendo em vista os resultados obtidos e apresentados no Capítulo 5 é possível aferir que a bancada apresenta enorme potencial a ser explorado. As visualizações foram realizadas de forma simples para verificar se há a possibilidade de observar a interface entre um fluido viscoso e um material gelificado dentro de um tubo transparente. Porém há vários pontos operacionais que devem ser corrigidos para que os resultados obtidos com esta bancada sejam efetivamente melhores.

Primeiramente, não houve controle de temperatura em nenhum dos experimentos realizados. A temperatura afeta diretamente a intensidade da tensão limite de escoamento de um material, sendo que se o fluido é resfriado a tensão limite de escoamento tende a aumentar.

Outro ponto que deve ser corrigido é o preenchimento do tubo com o material gelificado, de forma que a interface que se forme seja o mais plano possível. Observando as Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.5, Figura 5.7 e Figura 5.8 é possível notar que as interfaces não possuem a mesma forma nos diferentes testes, o que pode ocasionar em erros experimentais, de forma a não garantir repetitividade.

Não é possível afirmar se o material que está sendo deslocado está deslizando ou escoando, conforme discussões apresentadas na Seção 5.1.3, pois não é possível mensurar o perfil de velocidades ao longo do eixo radial em uma determinada seção com a técnica de visualização utilizada neste trabalho.

Com isso, para trabalhos futuros alguns parâmetros poderiam ser estudados para comparar os seus efeitos no reinício de escoamento de fluidos gelificados, podendo-se listar a viscosidade relativa entre fluidos e diferentes comprimentos de tubo preenchido com o material gelificado. Uma investigação da questão da miscibilidade entre os fluidos e como isso afeta a dinâmica da interface seria interessante, visto que apenas um tipo de fluido deslocante é utilizado.

Um controle de temperatura é necessário para garantir melhores resultados, sendo assim investigar o impacto da temperatura para a realização de testes dentro dos mesmos parâmetros operacionais.

Também seria interessante o uso de partículas traçadoras, de forma que a sua captura seja realizada através de um sistema de PIV, por exemplo. Assim seria possível compreender

melhor os fenômenos associados à quebra da interface na região próxima à parede e afirmar o que ocorre nas diferentes pressões aplicadas no sistema e se o material está sendo empurrado como um sólido ou se está escoando como um fluido.

Outra sugestão para melhoria da bancada concentra-se no esforço de preencher completamente a região anterior ao material gelificado de forma a eliminar a bolha que se forma. O gás retido pode alterar a área de contato e a aplicação da pressão na interface, prejudicando o experimento.

Por fim, o controle atual de pressão é precário, possuindo um ajuste lento e pouco prático, sendo que para se alterar a altura da mesa são necessários muitas regulagens, tanto de posição da bancada quanto a troca da tubulação rígida da saída do reservatório até a linha horizontal. Sugere-se que um sistema de elevação seja utilizado como controle de altura e uma mangueira flexível façam a ligação do reservatório com a linha horizontal, facilitando o posicionamento da mesa em relação ao reservatório.

REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R. J. (1991). Particle-Image Techniques for Experimental Fluid Mechanics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, p. 261-304, 1991.
- ANDERSON, J. D. **Modern Compressible Flow: With Historical Perspective**. 2^a ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1990.
- ANDRADE, Diogo E. V.; FERNANDES, Rubens R.; SANTOS, Tainan G. M.; CECCON, Emanuel V.; DA CRUZ, Ana C. B.; FRANCO, Admilson T.; NEGRÃO, Cezar O. R. Curve-fitting equation for prediction of the start-up stress overshoot of na oil-based drilling fluid. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 146, p. 902-908, 2016.
- BALHOFF, Matthew T.; LAKE, Larry W.; BOMMER, Paul M.; LEWIS, Rebecca E.; WEBER, Mark J.; CALDERIN, Jennifer M. Rheological and yield stress measurements of non-Newtonian fluids using a Marsh Funnel. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 77, p. 393-402, 2011.
- BENMOUFFOK-BENBELKACEM, G.; CATON, F; BARAVIAN, C.; SKALI-LAMI, S. Non-linear viscoelasticity and temporal behavior of typical yield stress fluids: Carbopol, Xanthan and Ketchup. **Rheological Acta**, v. 49, p. 305-314, 2010.
- BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. **Dynamics of Polymeric Liquids, Volume 1: Fluid mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- BOSMA, Martin; BRINKHUIS, Richard; COOPMANS, Jo; REUVERS, Bart. The role of sag control agents in optimizing the sag/leveling balance and a new powerful tool to study this. **Progress in Organic Coatings**, v. 55, p. 97-104, 2006.
- BOURGOYNE, A. T.; CHENEVERT, M. E.; MILLHEIM, K.; YOUNG, F. S. **Applied Drilling Engineering**. SPE Textbook series, v. 2, 1986.
- BURGHELEA, Teodor; POUMAERE, Antoine; MOYERS-GONZÁLEZ, Miguel; CASTELAIN, Cathy. 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.
- CARNALI, J. O.; NASER, M. S. The Use of dilute solution viscometry to characterize the network properties of carbopol microgels. **Colloid and Polymer Science**, v. 270, p. 183-193, 1991.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications**. Butterworth-Heinemann, 2011.
- MACOSKO, C. W. **Rheology: principles, measurements, and applications**. New York: Wiley - VCH, 1994.
- COUSSOT, P.; NGUYEN, Q. D.; HUYNH, H. T.; BONN, D. Avalanche behavior in yield stress fluids. **Physical review letters**, v. 88, 2002a.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**, 5^a ed. Estados Unidos: Gulf Professional Publishing - Butterworth-Heinemann, 1988.
- DAVIDSON, M. R.; CHANG, C.; RØNNINGSSEN, H. P.; NGUYEN, Q. D. A Model for Restart of a Pipeline with Compressible Gelled Waxy Crude Oil. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 123, p. 269-280, 2004.

DIMITRIOU, Christopher J.; MCKINLEY, Gareth H. A comprehensive constitutive law for waxy crude oil: A thixotropic yield stress fluid. **Soft Matter**, v. 10, p. 6619-6644. 2014

EL-GENDY, Husam; ALCOUTLABI, Mataz; JEMMETT, Mark; DEO, Milind; MAGDA, Jules; VENKATESAN, Rama; MONTESI, Alberto. The propagation of pressure in a gelled waxy oil pipeline as studied by particle imaging velocimetry. **AIChE Journal**, v. 58, p. 302-311, 2012.

FERNANDES, R. R.; ANDRADE, D. V. E. V.; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. R. O. R. Correlation between the gel-liquid transition stress and the storage modulus of an oil-based drilling fluid. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 231, p. 6–10, 2016.

FOX, Robert. W; PRITCHARD, Philip J.; McDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

IMAGEJ: Image Processing and Analysis in Java. EUA: National Institutes of Health. 2016.

JAKOBSEN, J.; STERRI, N.; SAASEN, A.; AAS, B. Displacements in Eccentric Annuli During Primary Cementing in Deviated Wells. **Society of Petroleum Engineers**, (21686), 1991.

KANYA PART CENTER. Disponível em:

<http://www.kanyaparts.com/selltec/engine/kanyashop/dg/products/profile/profilebasis40,1-en.xhtml?login_fb=1>. Acessado em: 09 de maio de 2016.

LEE, Hyun S.; SINGH, Probjot; THOMASON, William H.; FOGLER, Scott. Waxy oil gel breaking mechanisms: Adhesive versus Cohesive Failure. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 480-487, 2008.

LUU, Li-Hua; PHILIPPE, Pierre; CHAMBON, Guillaume. Experimental study of the solid-liquid interface in a yield-stress fluid flow upstream of a step. **Physical Review**, v. 91, 2015.

MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Thixotropy. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 147–148, p. 214–227, mar. 2009.

MØLLER, P. C. F.; FALL, A.; CHIKKADI, V.; DERKS, D.; BONN, D. An attempt to categorize yield stress fluid behaviour. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 367, n. 1909, p. 5139–5155, 16 nov. 2009b.

NEGRÃO, C. O. R.; FRANCO, A. T.; ROCHA, L. L. V. A Weakly Compressible Flow Model for the Restart of Thixotropic Drilling Fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 166, pp. 1369-1381, 2011.

NGUYEN, Q. D.; BOGER, D. V. Thixotropic behaviour of concentrated bauxite residue suspension. **Rheologica Acta**, v. 24, p. 427-437, 1985.

OLIVEIRA, Gabriel Merhy, **MODELAGEM DA PROPAGAÇÃO DE PRESSÃO NO REINÍCIO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO NÃO GELIFICADOS**, 2011, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 130 p.

OLIVEIRA, Gabriel M.; NEGRÃO, Cezar O. R. The effect of compressibility on flow start-up of waxy crude oils. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**. V. 220, p. 137-147, jan. 2015.

OPTRON MICROMECAÂNICA ÓPTICA LTDA. **Posicionadores**. Disponível em: <<http://www.optron.com.br/site/posicionadores.html>>. Acessado em: 15 de maio de 2016.

PALACIOS S., Fredy M. **Estudo Experimental do Escoamento de Fluido Newtoniano em Contração Abrupta Axissimétrica com a Técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas**, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 173 p.

PEERAPORNLERD, Siripong; EDVIK, Skyler; LEANDRO, Ana P.; HINCKLEY, Ryan;

DEO, Milind D.; VENKATESAN, Rama; MAGDA, Jules J. Effect of the Flow Shutdown Temperature on the Gelation of Slurry Flows in a Waxy Oil Pipeline. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v. 54, n. 16, p. 4455–4459, 2015.

PERKINS, T. K.; TURNER, J. B. Starting behavior of gathering lines and pipelines filled with gelled Prudhoe Bay oil. **Journal of Petroleum Technology**, p. 301-308, 1971.

PETRÓLEO BRASILEIRO – PETROBRÁS. **Pré-Sal**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acessado em: 26 de agosto de 2016.

RONNINGSEN, Hans P. Rheological behaviour of gelled, waxy North Sea crude oils. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 7, p. 177-213, 1992.

SOARES DUTRA, Eduardo Stein; MENDES, Paulo Roberto de Souza; NACCACHE, Mônica Feijó'. **Deslocamento de Líquidos não Newtonianos em Tubos Anulares Excêntricos**. Rio de Janeiro, 2005. 104 p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SOUZA MENDES, P. R.; THOMPSON, R. L. A unified approach to model elasto-viscoplastic thixotropic yield-stress materials and apparent yield-stress fluids. **Rheologica Acta**, v. 52, n. 7, p. 673–694, jul. 2013.

STOKES, J. R.; TELFORD, J. H. Measuring the yield behaviour of structured fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 124, n. 1–3, p. 137–146, dez. 2004.

VIEIRA DA ROCHA, Leandro Lourenço. **Modelagem do reinício do escoamento de um fluido de perfuração tixotrópico**, 2010. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VINAY, Guillaume. **Modélisation du redémarrage des écoulements de bruts paraffiniques dans les conduits pétrolières**. Tese (Ciências de Engenharia) – École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 2005.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 5th Edition. New York: McGraw-Hill, 2003.

THOMAS, J. E, *et al.* **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2. ed. Brasil: Editora Interciência, 2001.

Tigre S/A. **Predial – Água Fria**: catálogo técnico. Joinville – SC, 2008. 72 p.

TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. (1984). **Petroleum Formation and Occurrence**. Berlin: Springer-Verlag.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE TESTE.

As curvas de escoamento e caracterização dos fluidos utilizados nos testes são apresentadas a seguir. As medições foram realizadas utilizando-se um reômetro rotacional TA DHR-3, fabricado pela *TA Instruments*, com incerteza de medição de 5%. São caracterizados o gel de ultrassom e o óleo hidráulico.

Propriedades do gel de ultrassom

O fluido gelificado utilizado nos experimentos é uma dispersão comercial de Carbopol comumente utilizado como gel de ultrassom. Este fluido é considerado viscoplástico, por isso apresenta uma tensão limite de escoamento que deve ser superada para escoar.

A curva de escoamento, à 25°C, em escala logarítmica é apresentada na Figura A.1, relacionando a tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. Também é plotada a curva de ajuste conforme o modelo de Herschel-Bulkley, conforme mostrada na Equação (A.1), sendo que τ_0 é a tensão limite de escoamento, m e n parâmetros de ajuste da curva.

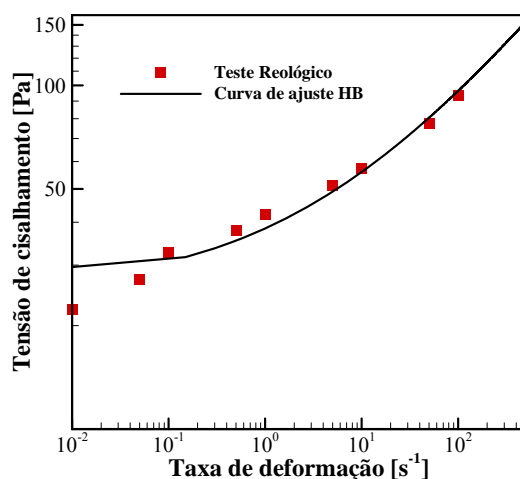


Figura A.1 – Curva da Tensão de Cisalhamento em função da Taxa de deformação

A tensão limite de escoamento é obtida utilizando-se o software Labfit, considerando os parâmetros apresentados na Equação (23), sendo $\tau_0 = 24,8$ Pa, $n=13,6$ e $m=0,361$.

$$\tau = \tau_0 + n\dot{\gamma}^m \quad (\text{A.1})$$

Propriedades do óleo hidráulico

O óleo hidráulico utilizado para a realização dos experimentos é o AZOLLA ZS 10, da Total. Para este fluido foi realizado apenas a medição da viscosidade newtoniana a diferentes faixas de temperatura, sendo a 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C e 40°C.

A seguir são mostradas as curvas da taxa de deformação pela tensão de cisalhamento e uma tabela com os dados referentes a curva para cada faixa de temperatura medida.

A Tabela A-1 apresenta a viscosidade mensurada em cada faixa de temperatura. A curva da relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento nas diferentes temperaturas é apresentada na Figura A.2.

Tabela A-1 – Viscosidade cinemática do óleo de acordo com a temperatura

Temperatura [°C]	Viscosidade [Pa.s]
15	0,0273
20	0,0228
25	0,0185
30	0,0152
35	0,0126
40	0,0107

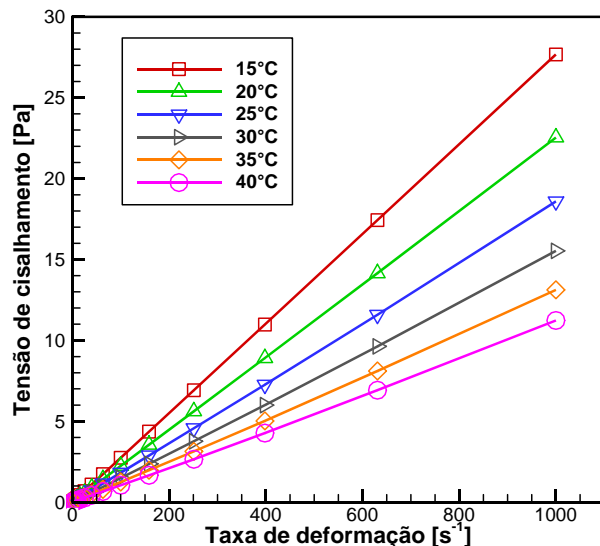


Figura A.2 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação a diferentes temperaturas.

Também foi mensurado a massa específica do óleo com o auxílio de uma balança de precisão e uma proveta graduada de 50 mL. Os dados referentes às medições realizadas e a massa específica aferida foram realizados à temperatura de 25°C e estão descritas na Tabela A-2.

Tabela A-2 – Valores aferidos para cálculo da massa específica do óleo hidráulico.

Massa [g]	Volume [mL]	Massa específica [kg/m ³]
8,0 ±0,05	10 ±0,5	800
8,1 ±0,05	10 ±0,5	810
7,9 ±0,05	10 ±0,5	790
8,0 ±0,05	10 ±0,5	800

A massa específica média é de 800 kg/m³, com desvio padrão de 8,16.